



4 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik



4.1 Grenzen, (experimentelle) Erkenntnis

4.2 Wärmekraftmaschinen

4.3 Kältemaschinen

4.4 Carnot-Prozess



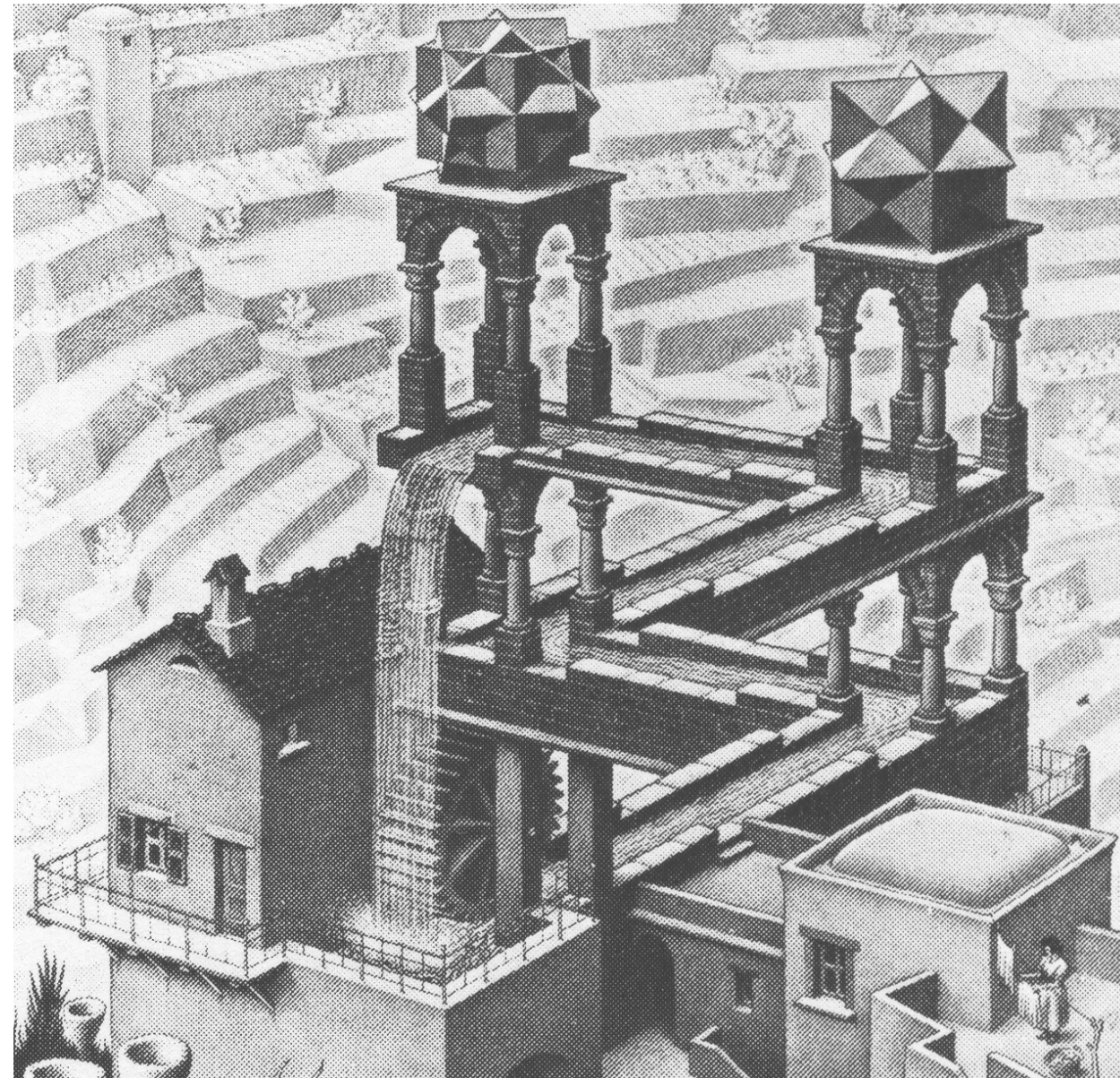
Erkenntnisse, die über den 1. Hauptsatz hinausgehen:

- * Wärme- und Kältekraftmaschinen**
- * optimaler Wirkungsgrad bei Kreisprozessen**
- * Irreversible Prozesse, die nicht umkehrbar sind**



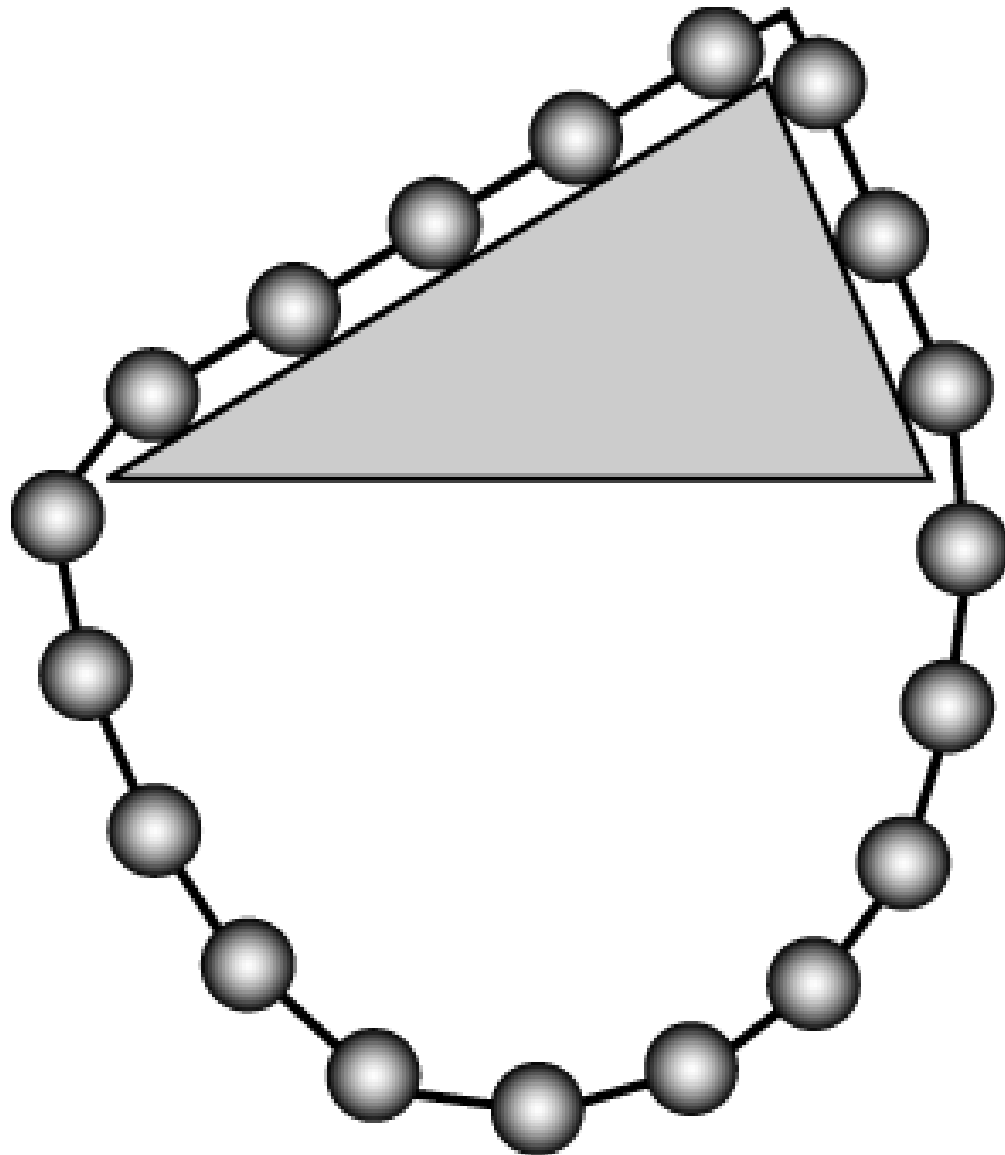
**Es folgt eine Serie von genialen Maschinen,
die unaufhörlich und "ohne Energieverbrauch" laufen
sollten.**

- perpetuum mobile -

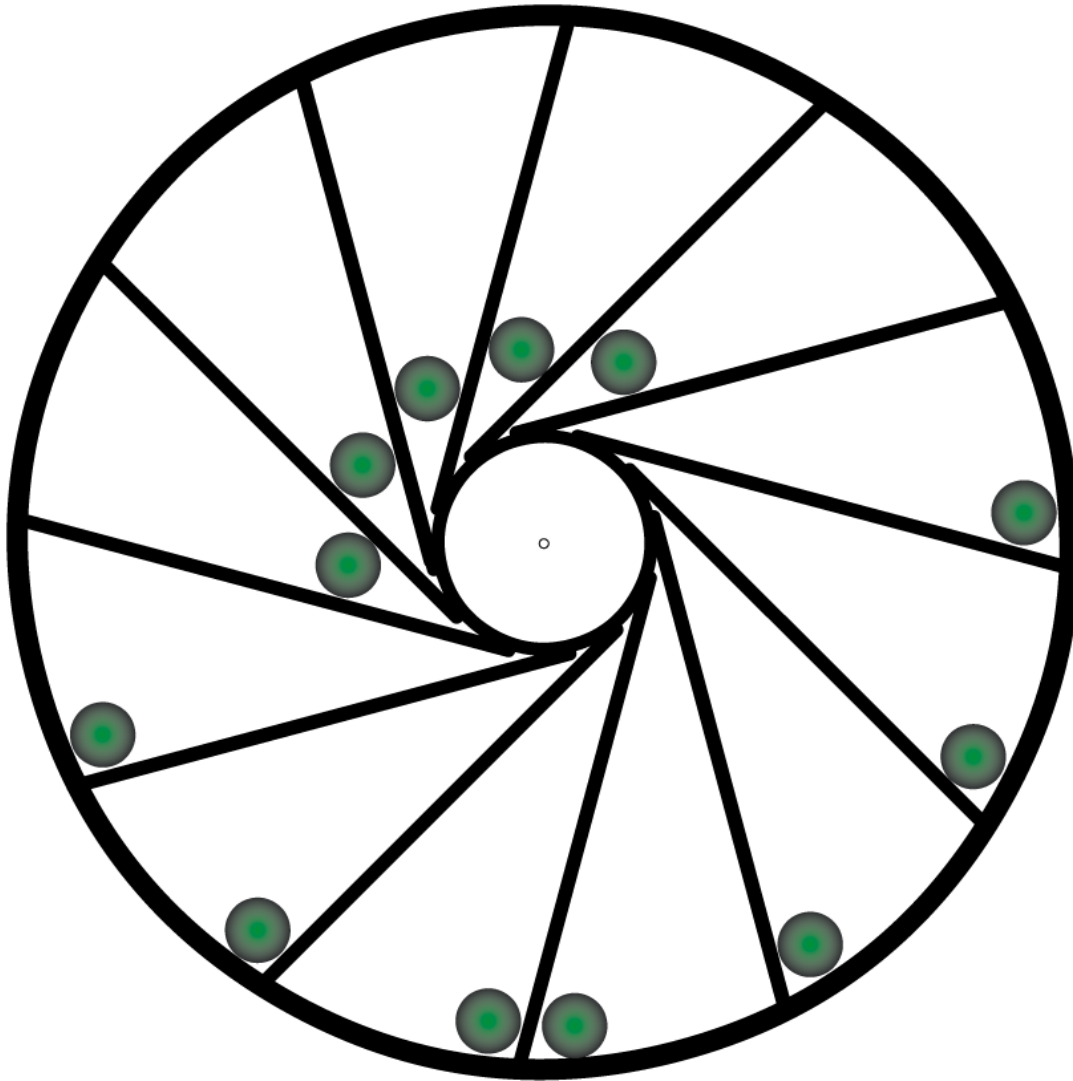


Perpetuum Mobile

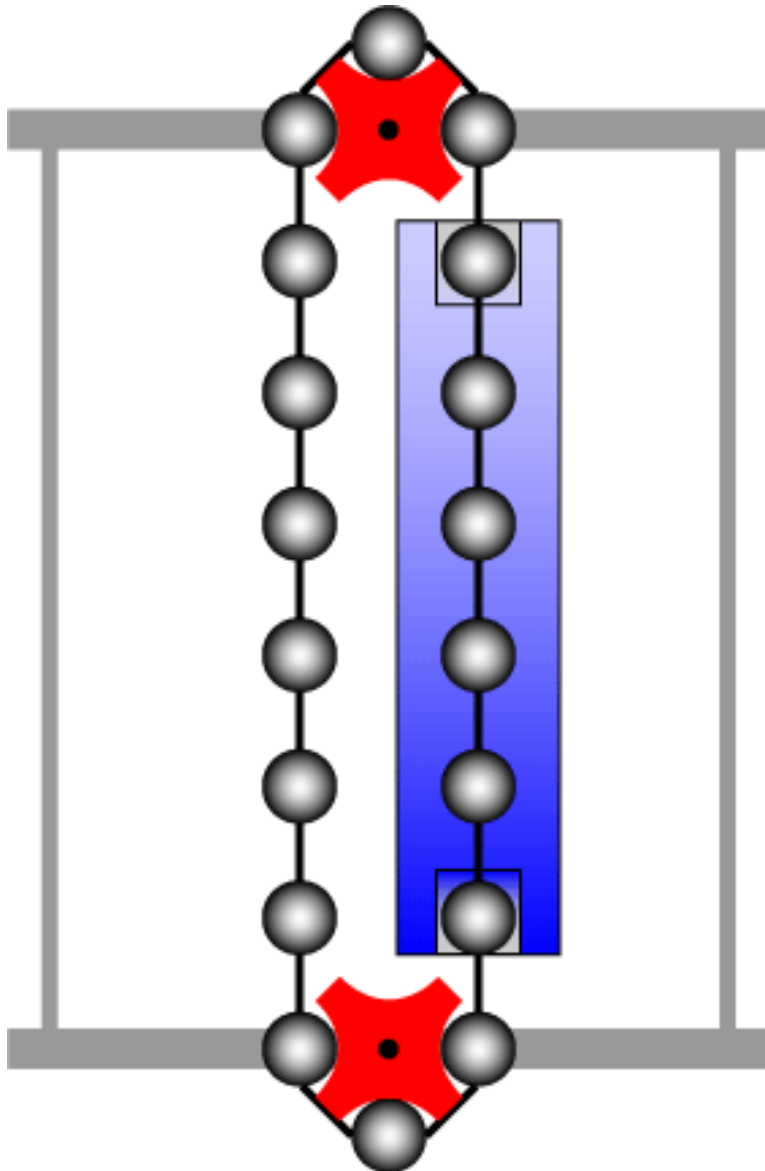
M. C. Escher



**Perpetuum
Mobile**



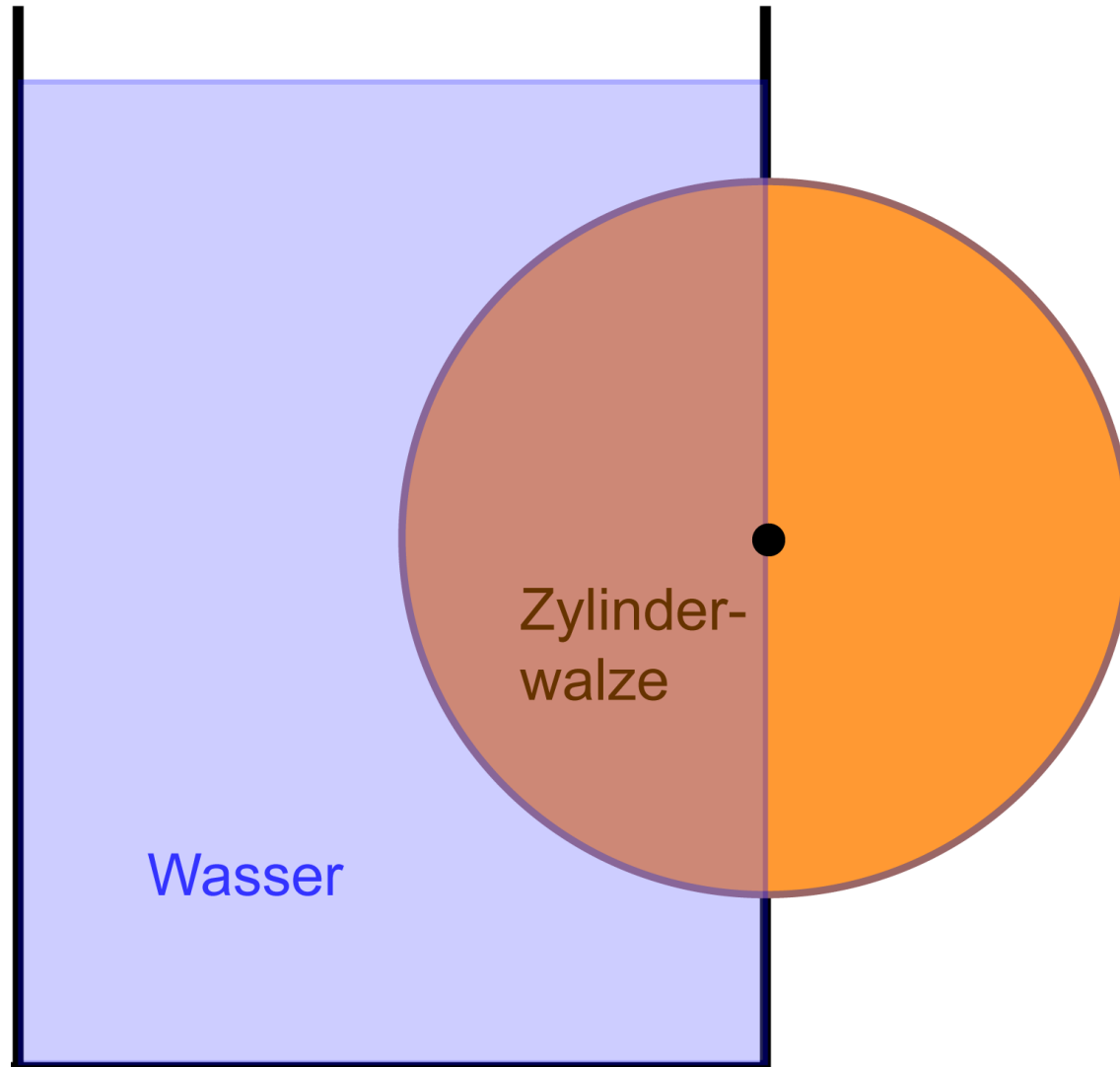
Perpetuum Mobile



**Perpetuum
Mobile**



Perpetuum Mobile





Experimentell erkannt:

ZWEITER HAUPTSATZ: THOMSON'SCHE FORMULIERUNG (nach Tipler, 2015)

Kein System kann Energie in Form von Wärme einem einzelnen Reservoir entnehmen und sie vollständig in Arbeit umsetzen, ohne dass gleichzeitig zusätzliche Veränderungen im System oder in dessen Umgebung eintreten.

ZWEITER HAUPTSATZ: FORMULIERUNG von CLAUSIUS (nach Tipler, 2015)

Ein Prozess, bei dem nur Wärmeenergie einem kälteren Reservoir entnommen und dieselbe Menge an Wärmeenergie einem wärmeren Reservoir zugeführt wird, ist unmöglich.



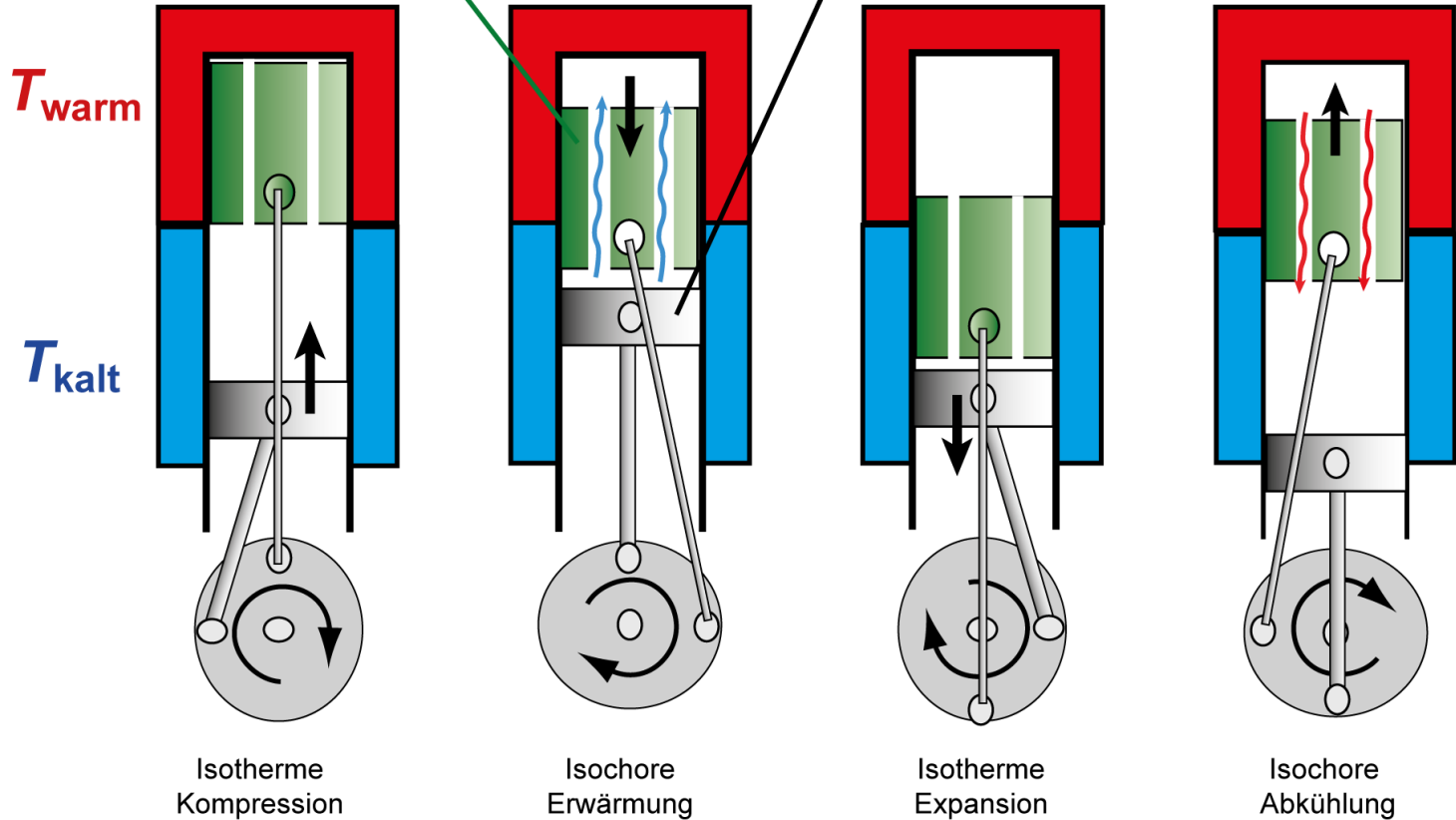
Wärmekraftmaschinen

sind zyklisch arbeitende Konstruktionen,
die Wärme in mechanische Arbeit umsetzen.

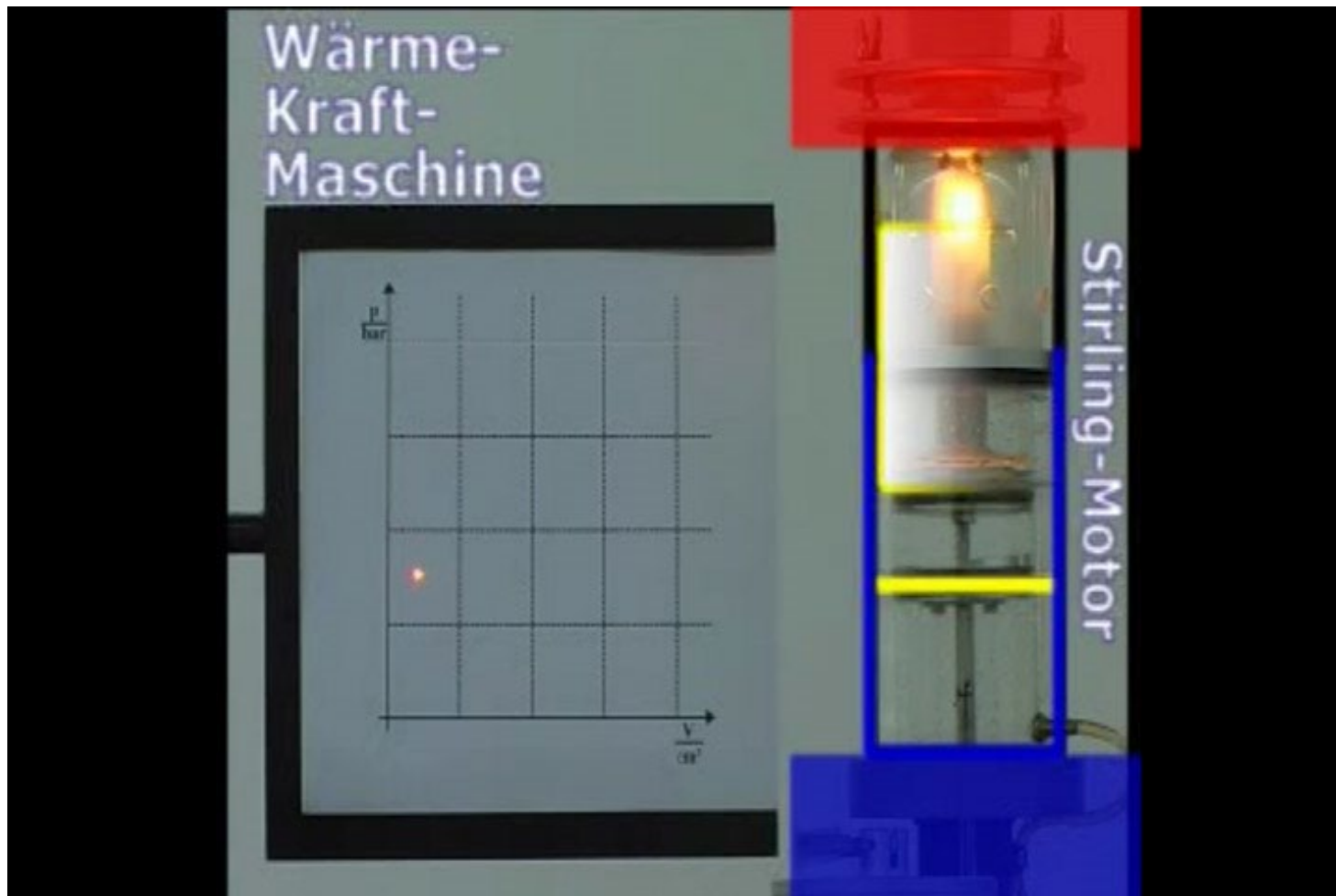
Für die Arbeitssubstanz gilt pro Zyklus: $\Delta U = 0$

Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

Verdrängerkolben Arbeitskolben



Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

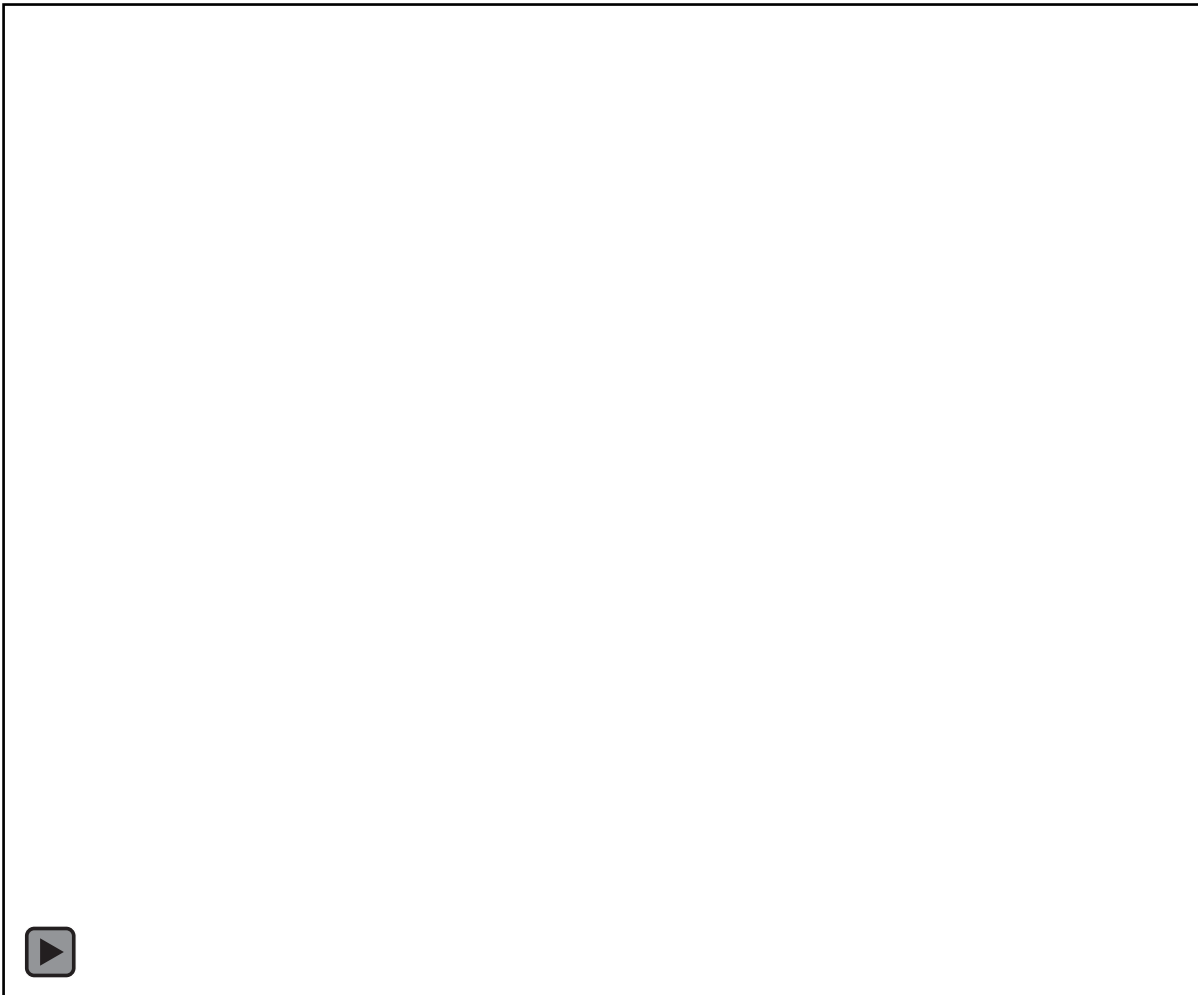


[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-2-H03_Stirling-Waerme-Kraft-1.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-2-H03 Stirling-Waerme-Kraft-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-2-H03_Stirling-Waerme-Kraft-1.m4v)

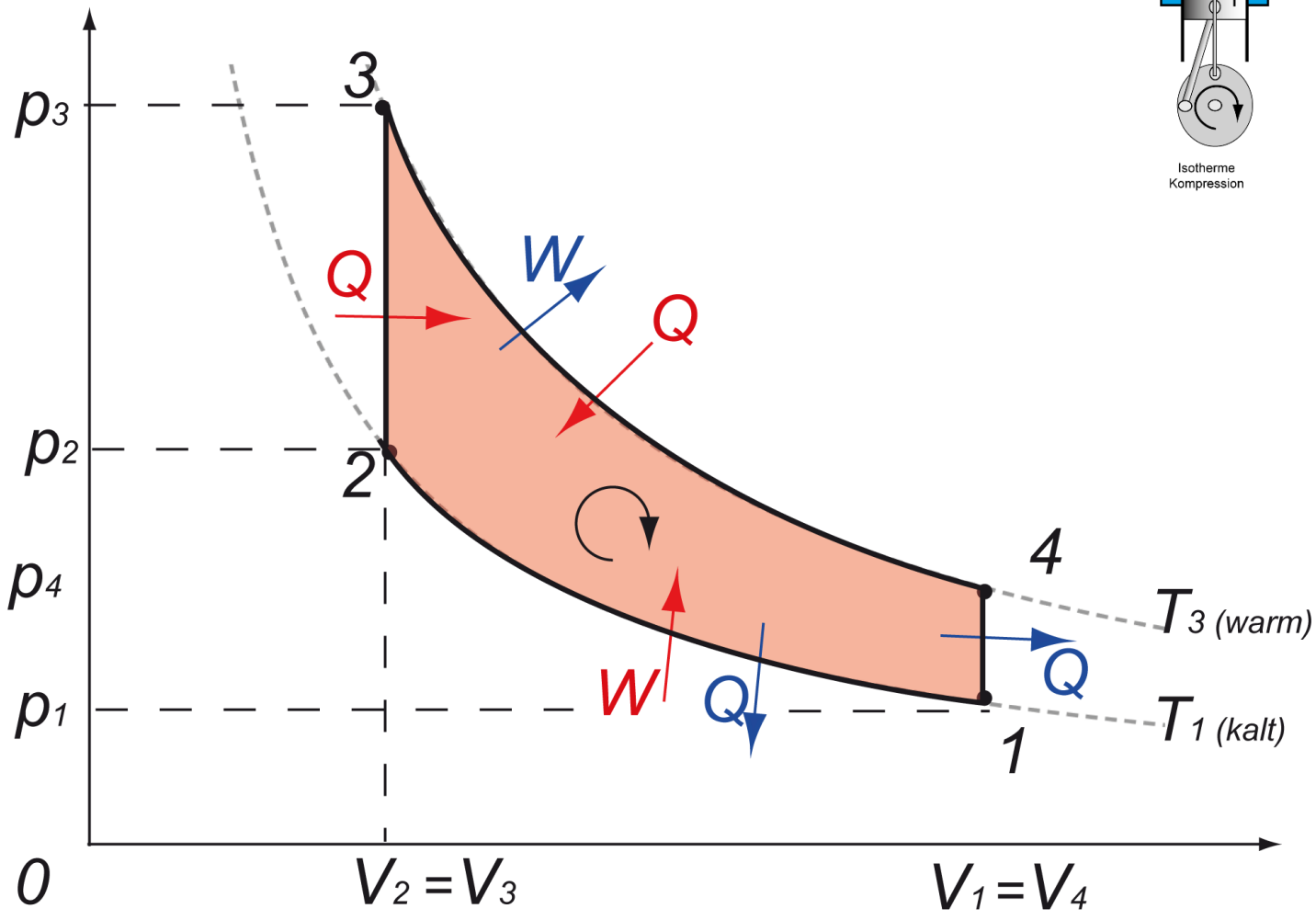
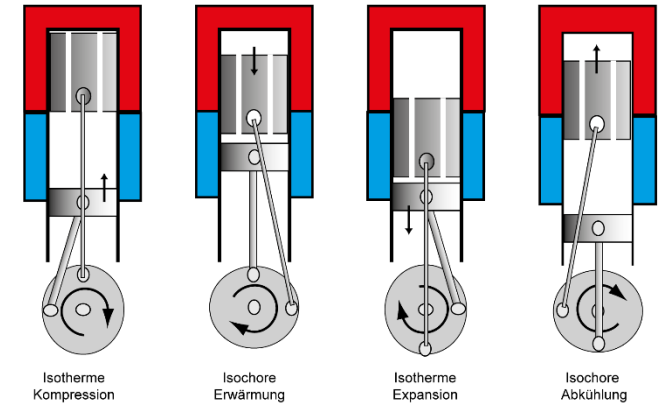


Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

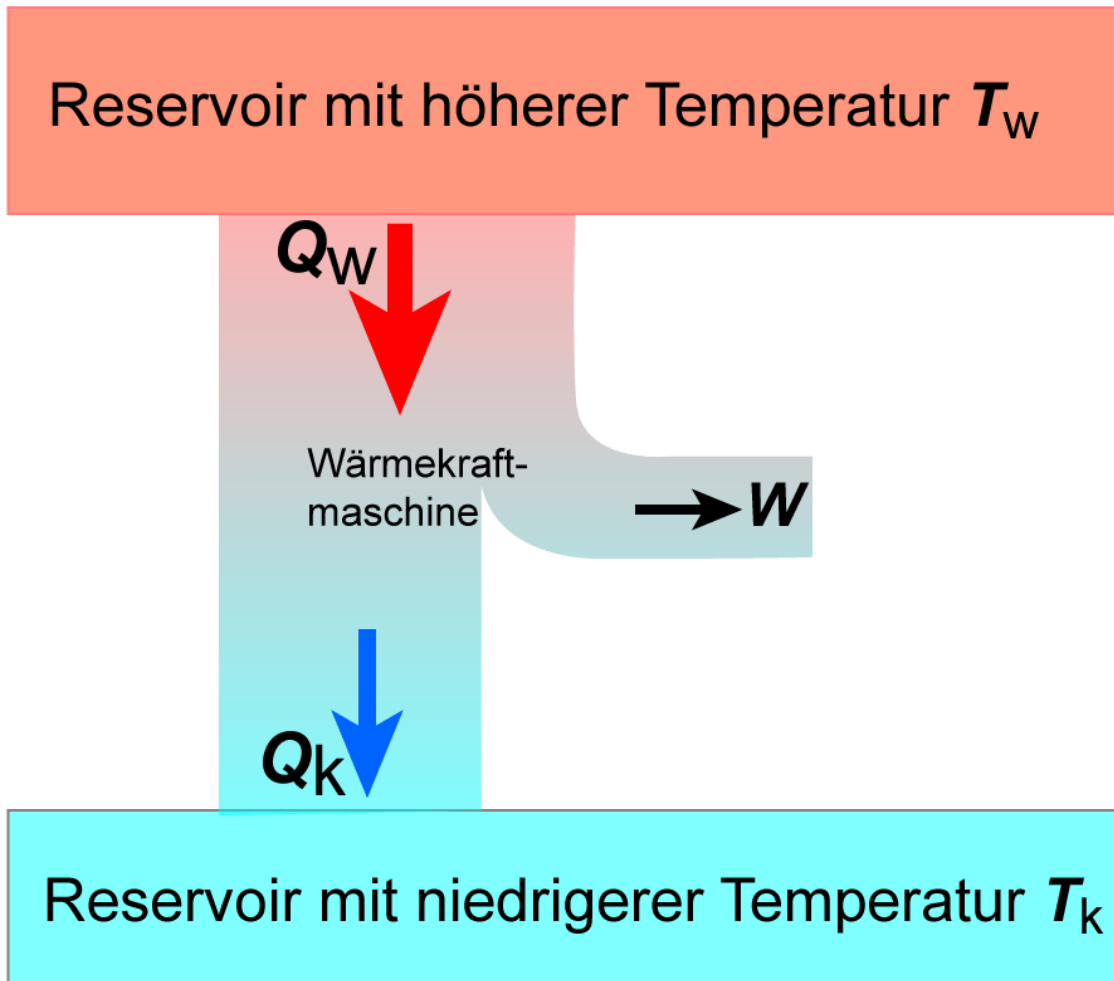




Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

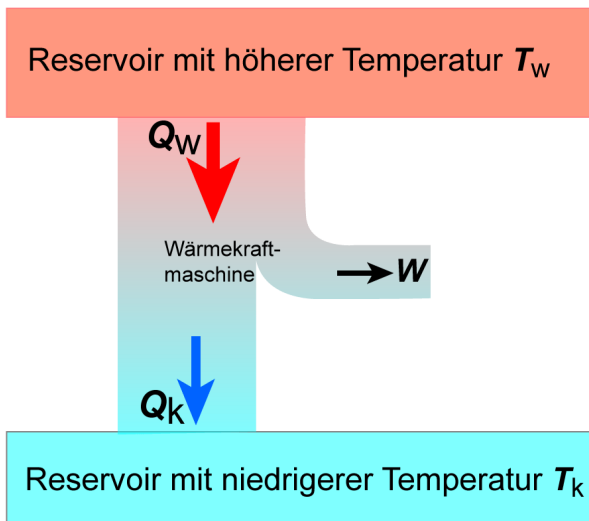


Wärmekraftmaschine





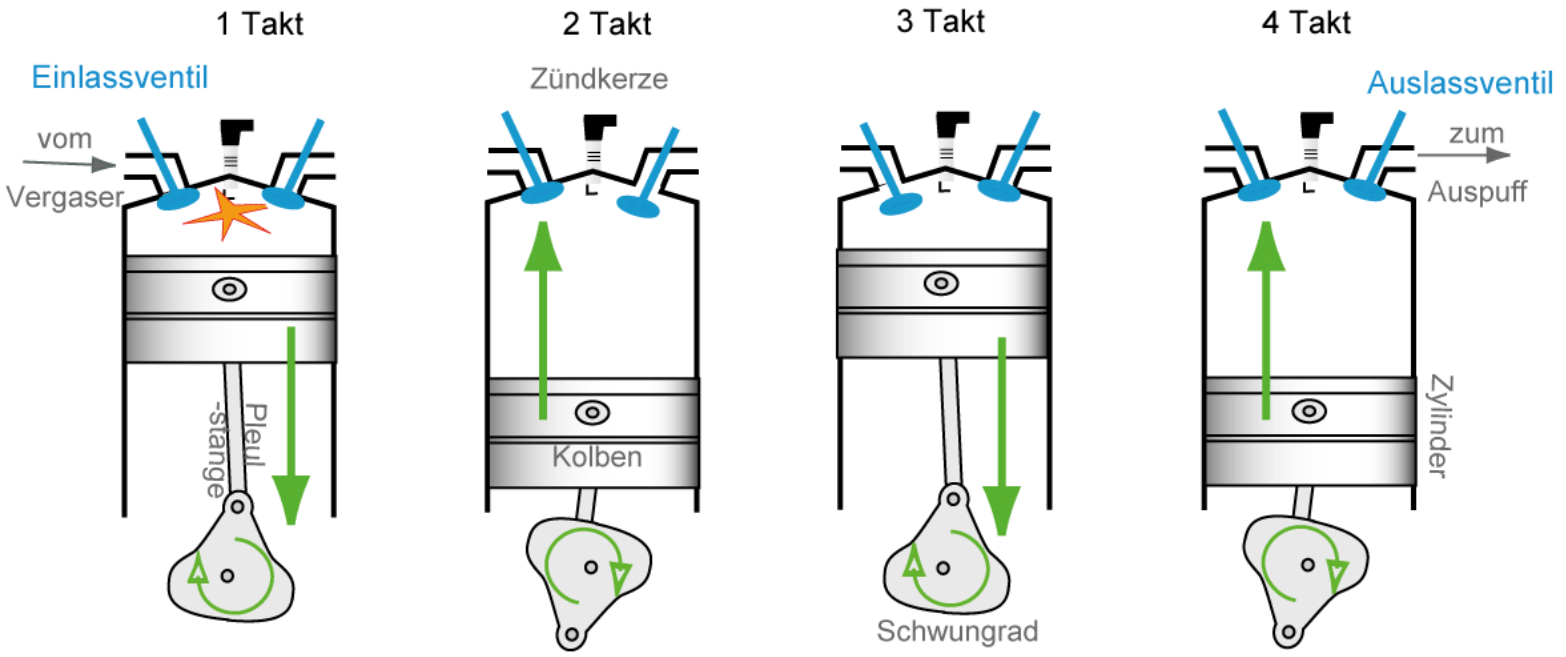
Wirkungsgrad



4 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

4.2 Wärmekraftmaschinen

Ottomotor

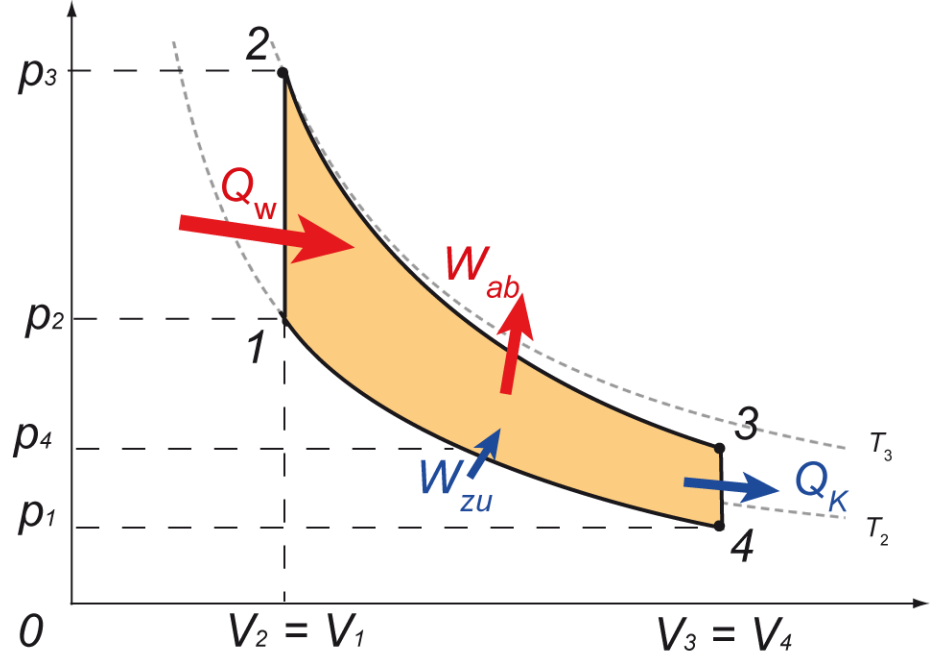
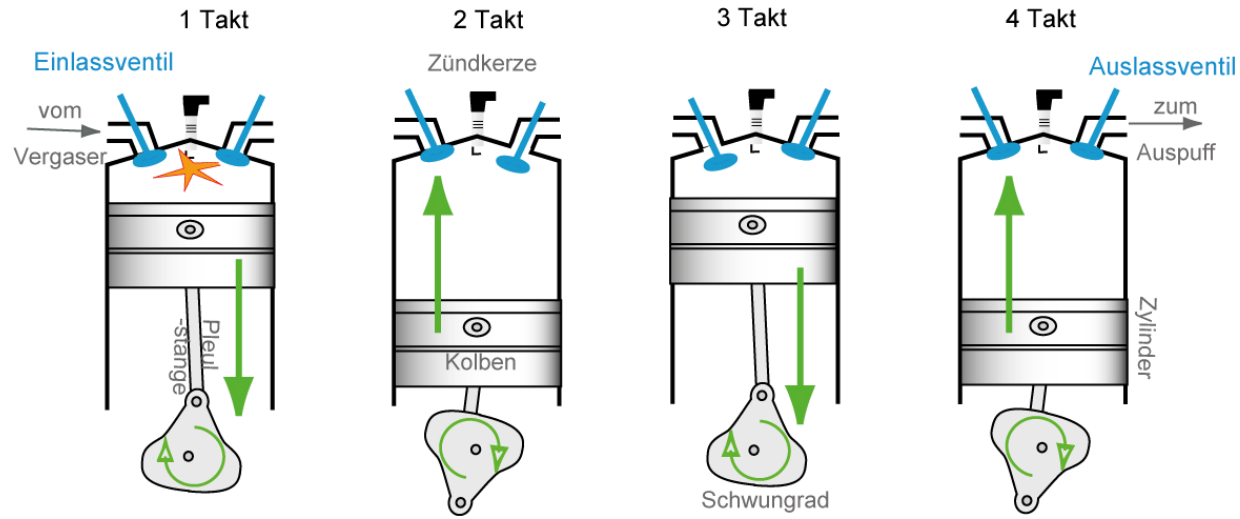


4 Takte:

1. Zündung des Gemisches;
2. Ausstoß der Verbrennungsgase;
3. Ansaugen des frischen Gemisches;
4. Verdichten

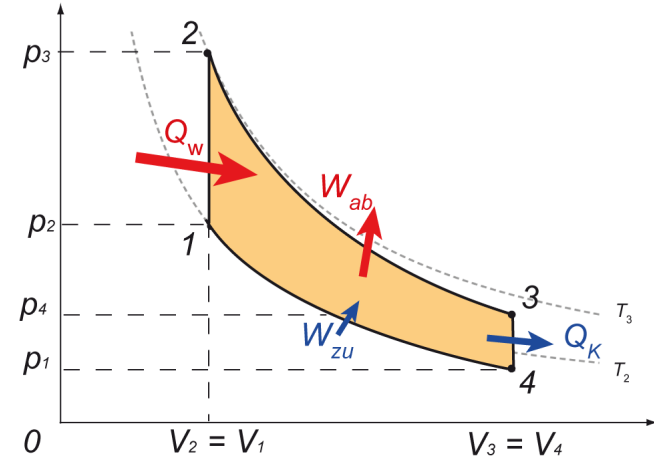


Ottomotor



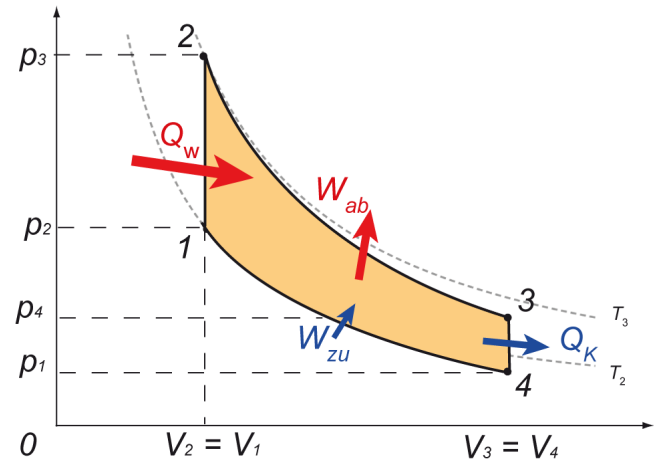


Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess



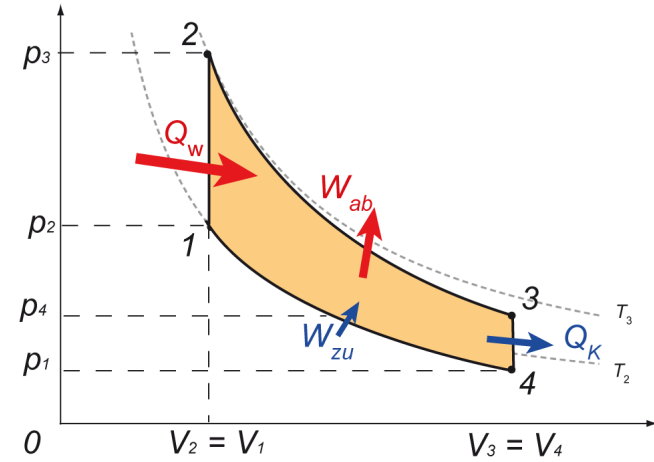


Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess



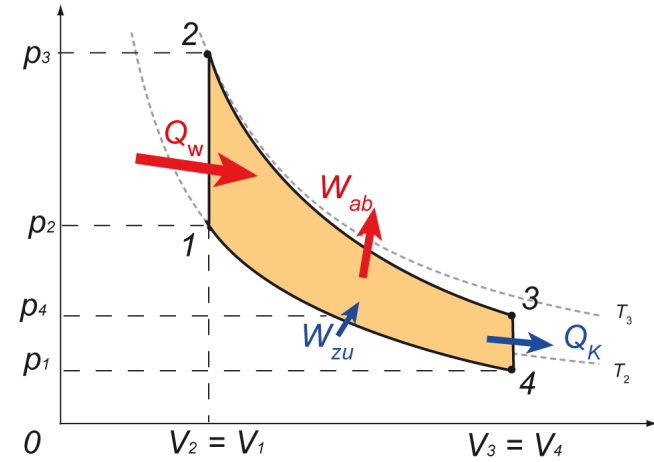


Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess





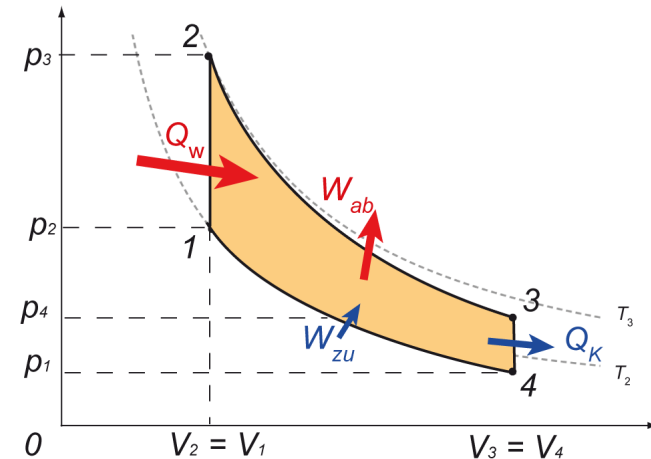
Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess





Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_k|}{Q_w}$$

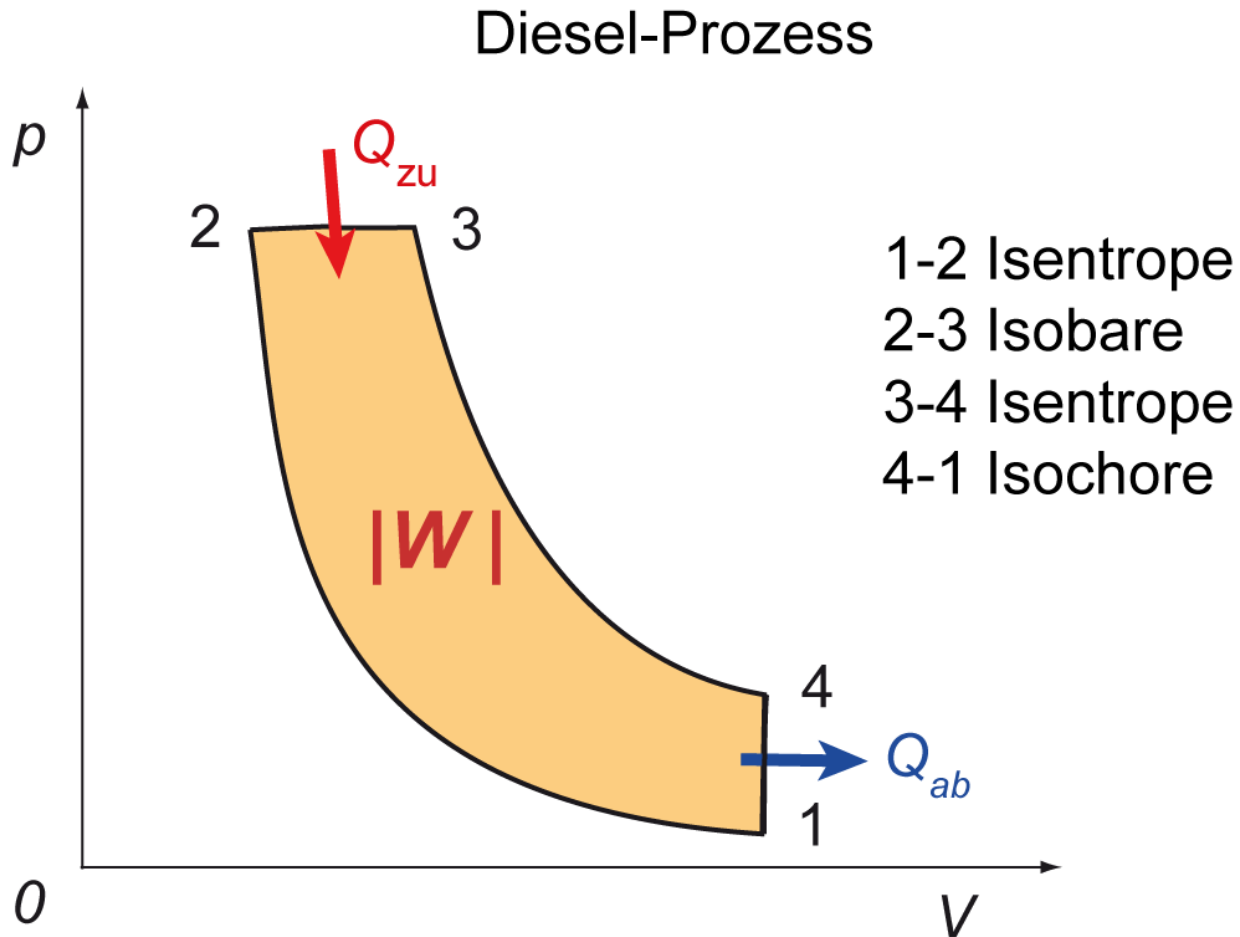


$$|Q_k| = |Q_{4 \rightarrow 1}| = n \cdot c_V \cdot |T_1 - T_4| = n \cdot c_V \cdot (T_4 - T_1)$$

$$Q_w = Q_{2 \rightarrow 3} = n \cdot c_V \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Diesel-Prozess





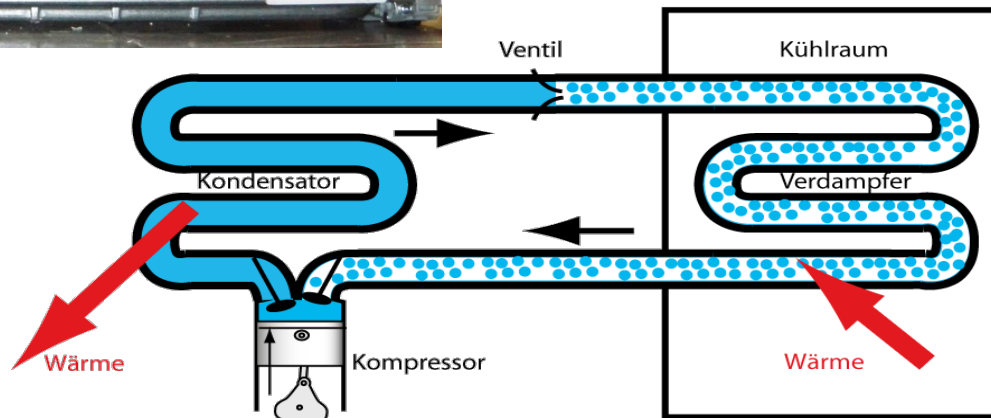
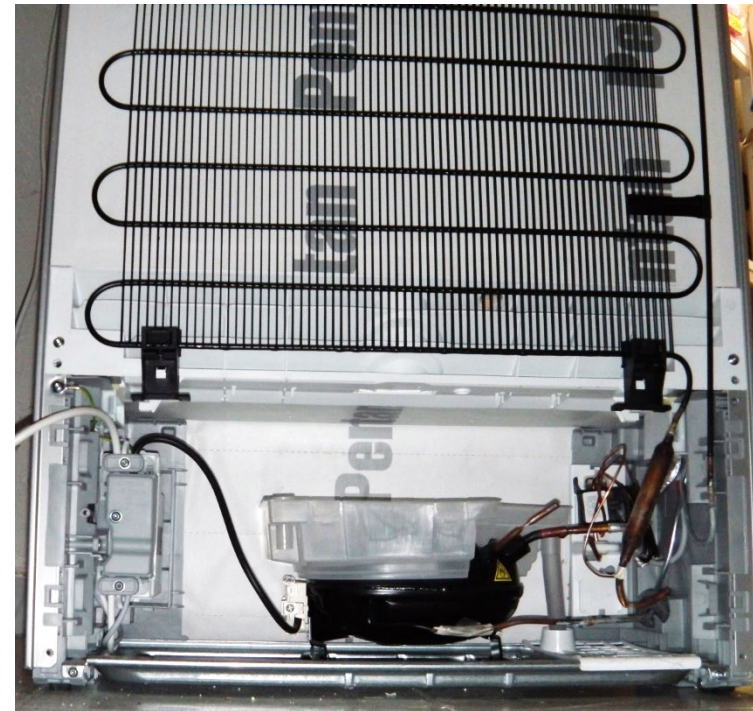
4.1 Grenzen, (experimentelle) Erkenntnis

4.2 Wärmekraftmaschinen

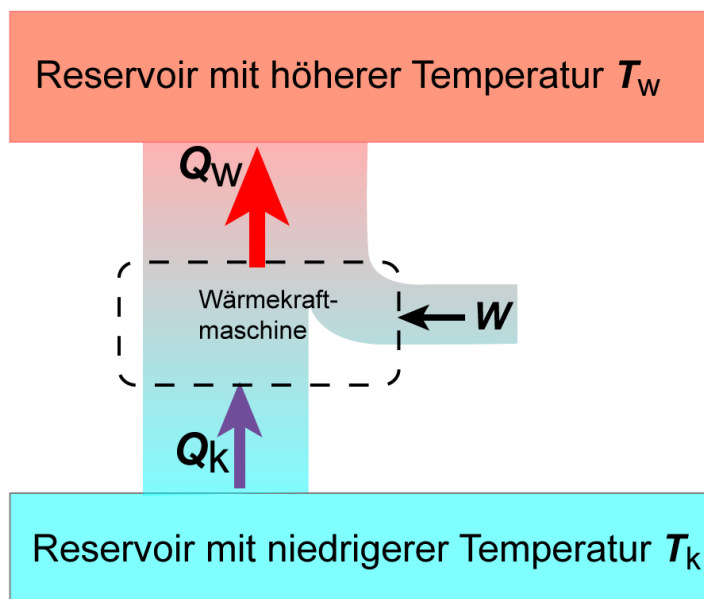
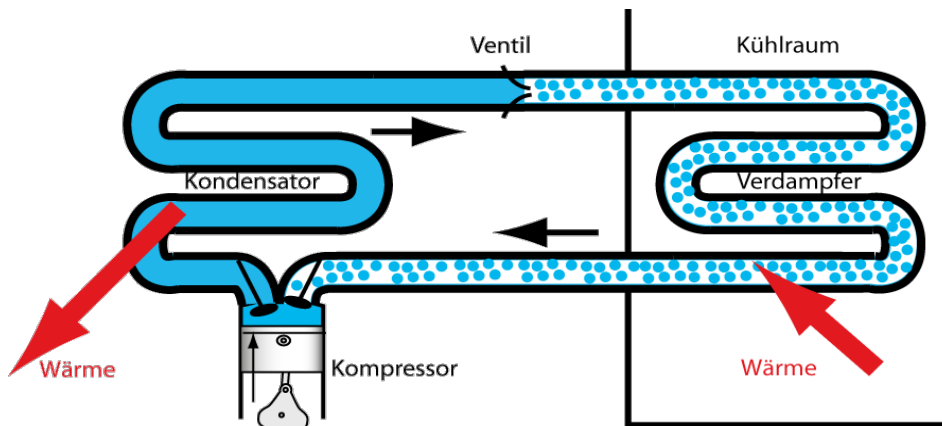
4.3 Kältemaschinen

4.4 Carnot-Prozess

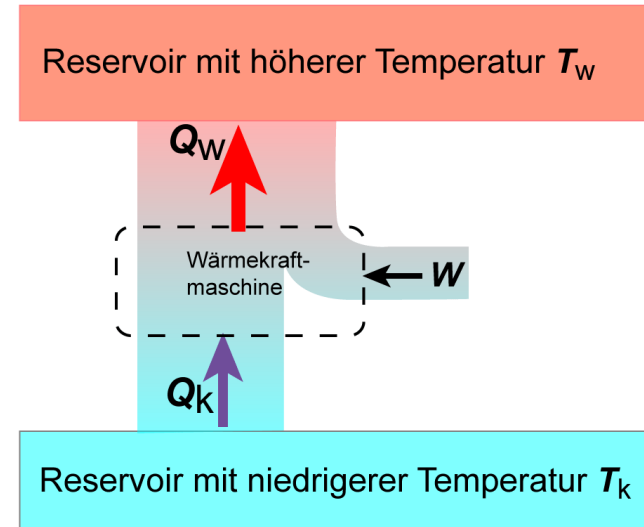
Kühlschrank



Kühlschrank

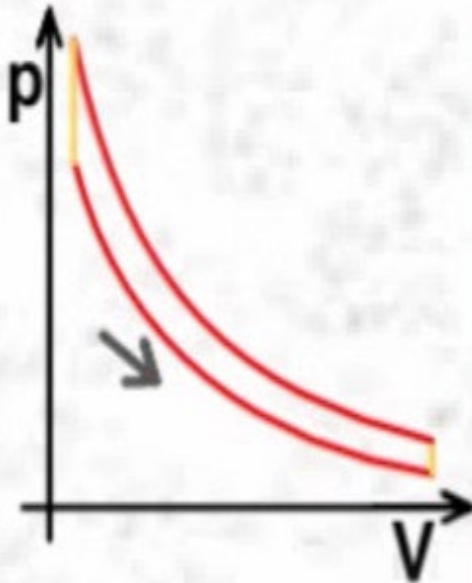


Leistungszahl einer Kältemaschine





idealisiertes
 pV -Diagramm



[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-3-H15_Waermepumpe-Exp-1.m4v)

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-3-H15_Waermepumpe-Exp-1.m4v





[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-3-H14_Waermepumpe-Schema-1.m4v)

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-3-H14_Waermepumpe-Schema-1.m4v



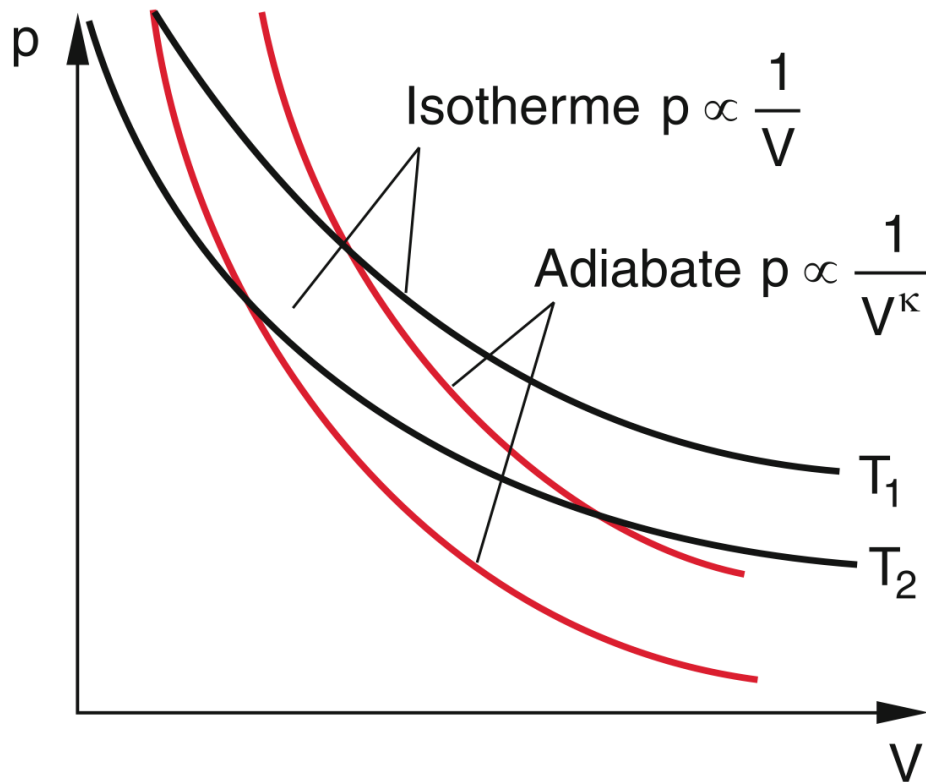
Der Carnotprozess

Idealisierungen – reversible Teilprozesse

- keine Reibung
- Durchlaufen von Gleichgewichtszuständen
- infinitesimale Temperaturschritte dT



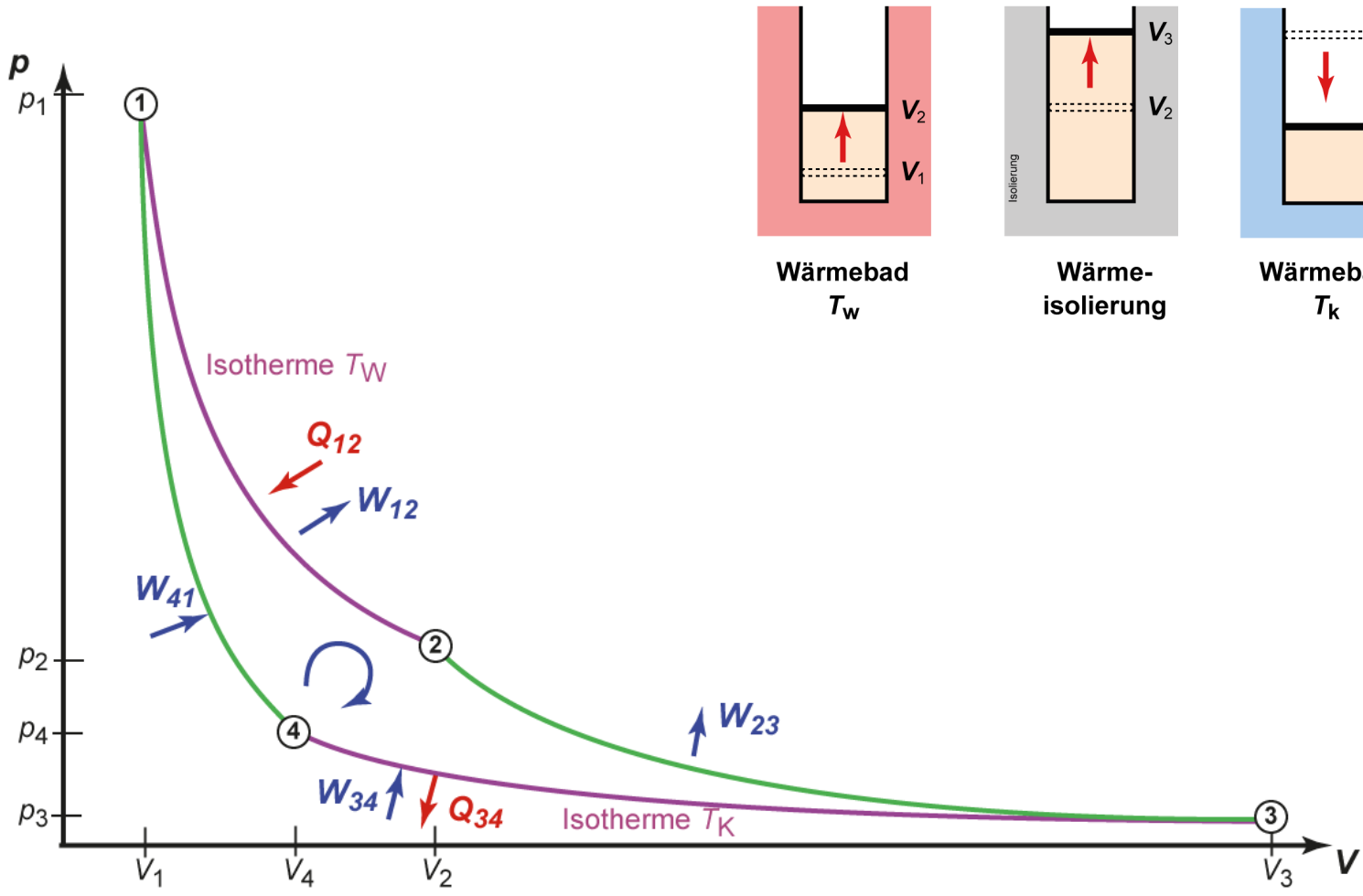
2 Isotherme, 2 Adiabaten



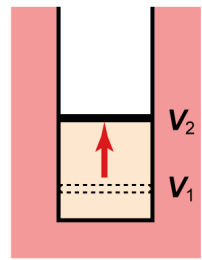
Isothermen und Adiabaten in einem p - V -Diagramm



2 Isotherme, 2 Adiabaten

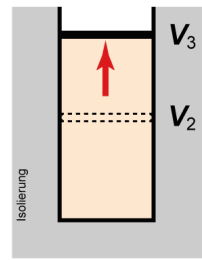


1 ->2
isotherme
Expansion



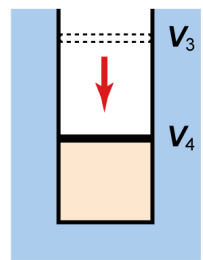
Wärmebad
 T_W

2 ->3
isentrop
Expansion



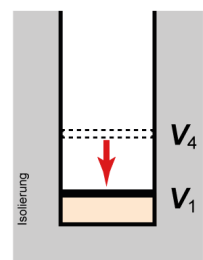
Wärme-
isolierung

3 ->4
isotherme
Kompression



Wärmebad
 T_K

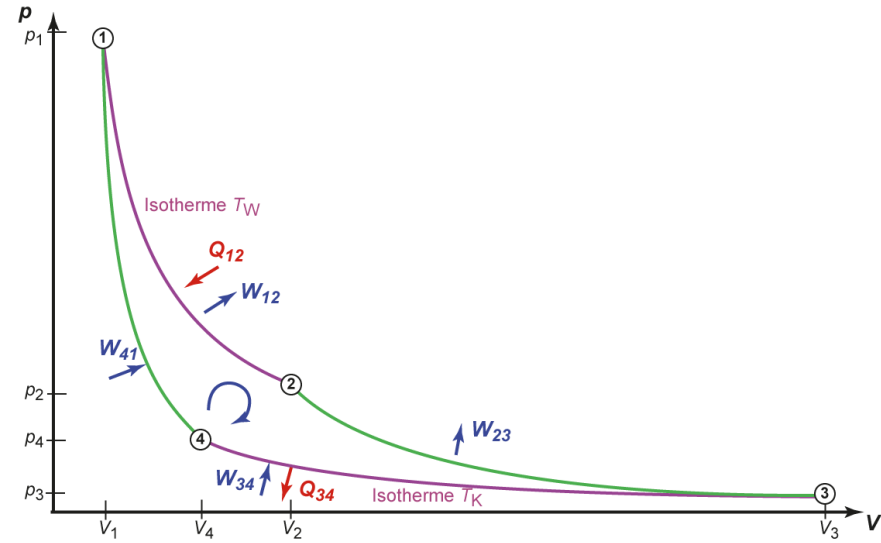
4 ->1
isentrop
Kompression



Wärme-
isolierung

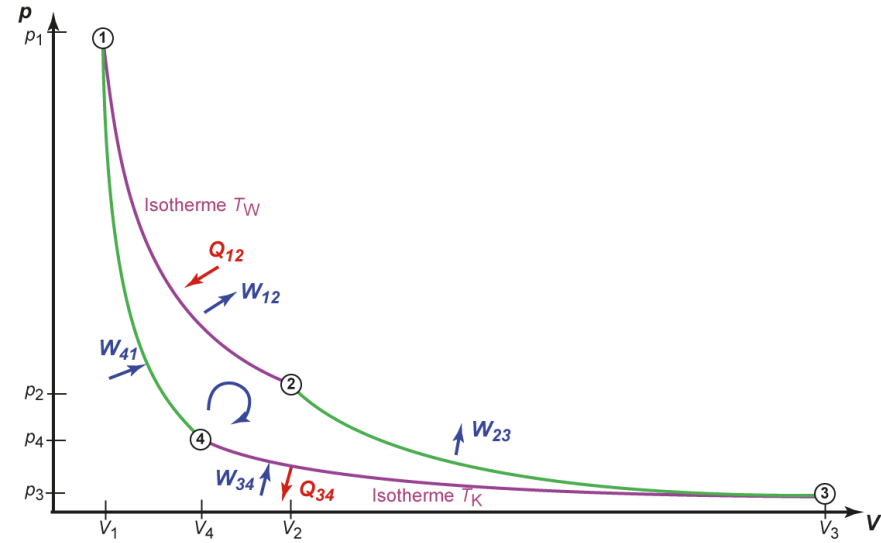


2 Isotherme, 2 Adiabaten



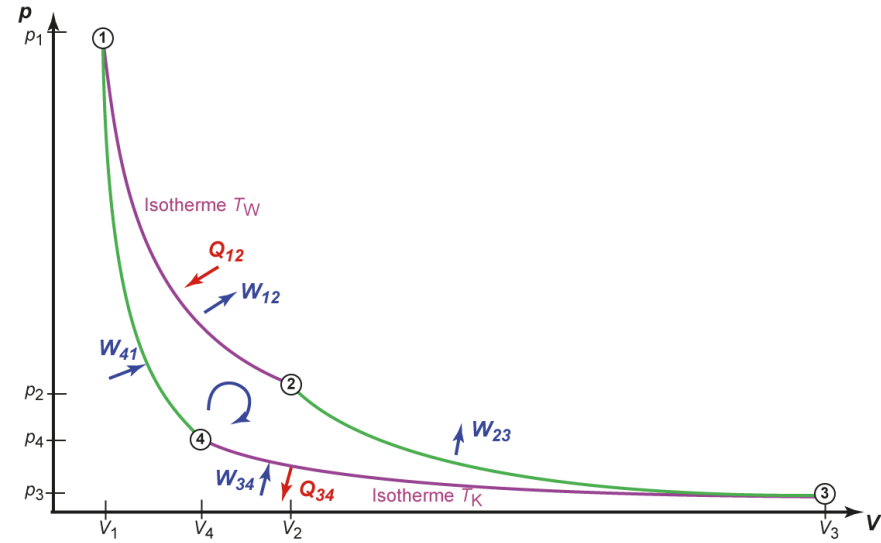


2 Isotherme, 2 Adiabaten



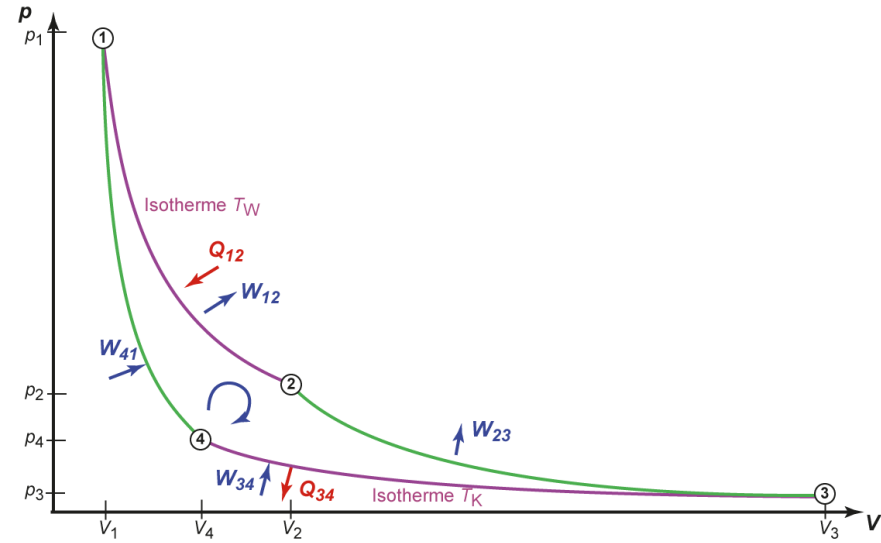


2 Isotherme, 2 Adiabaten





2 Isotherme, 2 Adiabaten



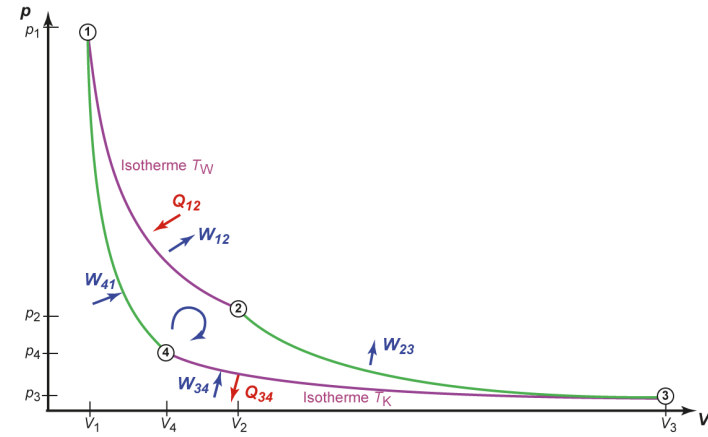
4 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

4.4 Der Carnotprozess





$$\varepsilon = 1 - \frac{T_K \cdot \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_W \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} ;$$





$$\varepsilon_{CP} = 1 - \frac{T_k}{T_w} = 1 - \frac{|Q_k|}{Q_w}$$

**Maximal möglicher Wirkungsgrad
von Wärmemaschinen**