



## 4 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik



## 4.1 Grenzen, (experimentelle) Erkenntnis

## 4.2 Wärmekraftmaschinen

## 4.3 Kältemaschinen

## 4.4 Carnot-Prozess



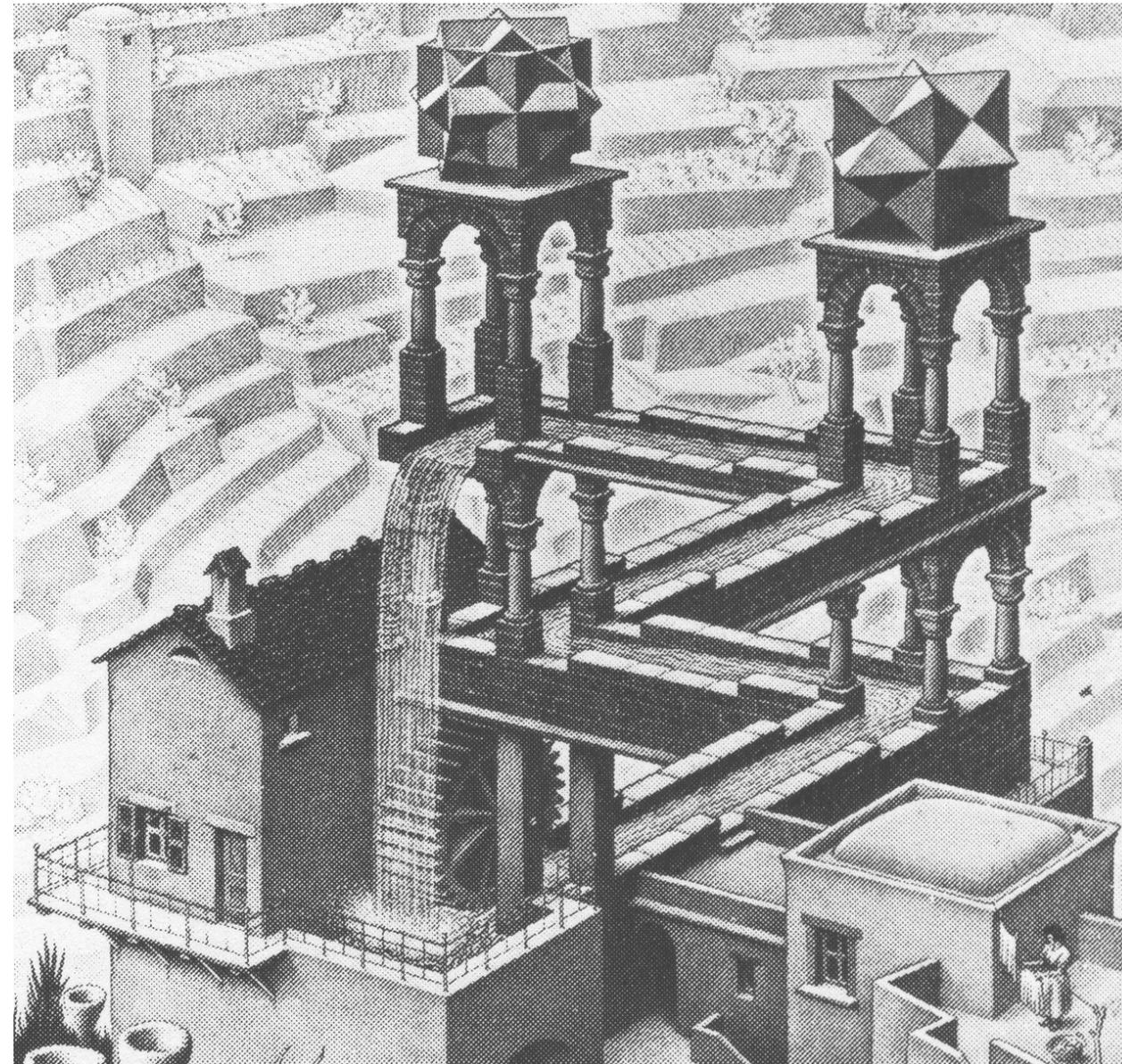
**Erkenntnisse, die über den 1. Hauptsatz hinausgehen:**

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



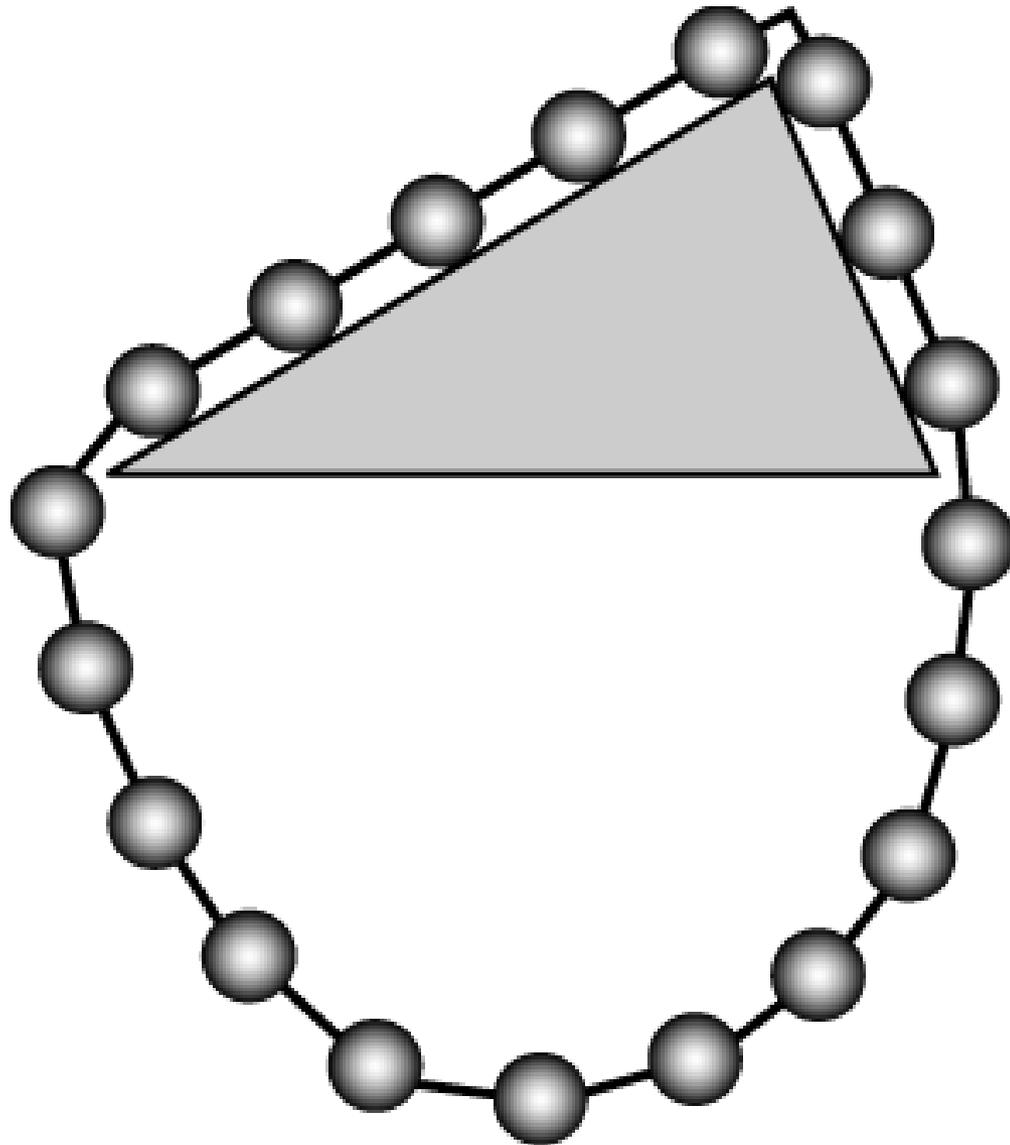
**Es folgt eine Serie von genialen Maschinen,  
die unaufhörlich und "ohne Energieverbrauch" laufen  
sollten.**

**- perpetuum mobile -**

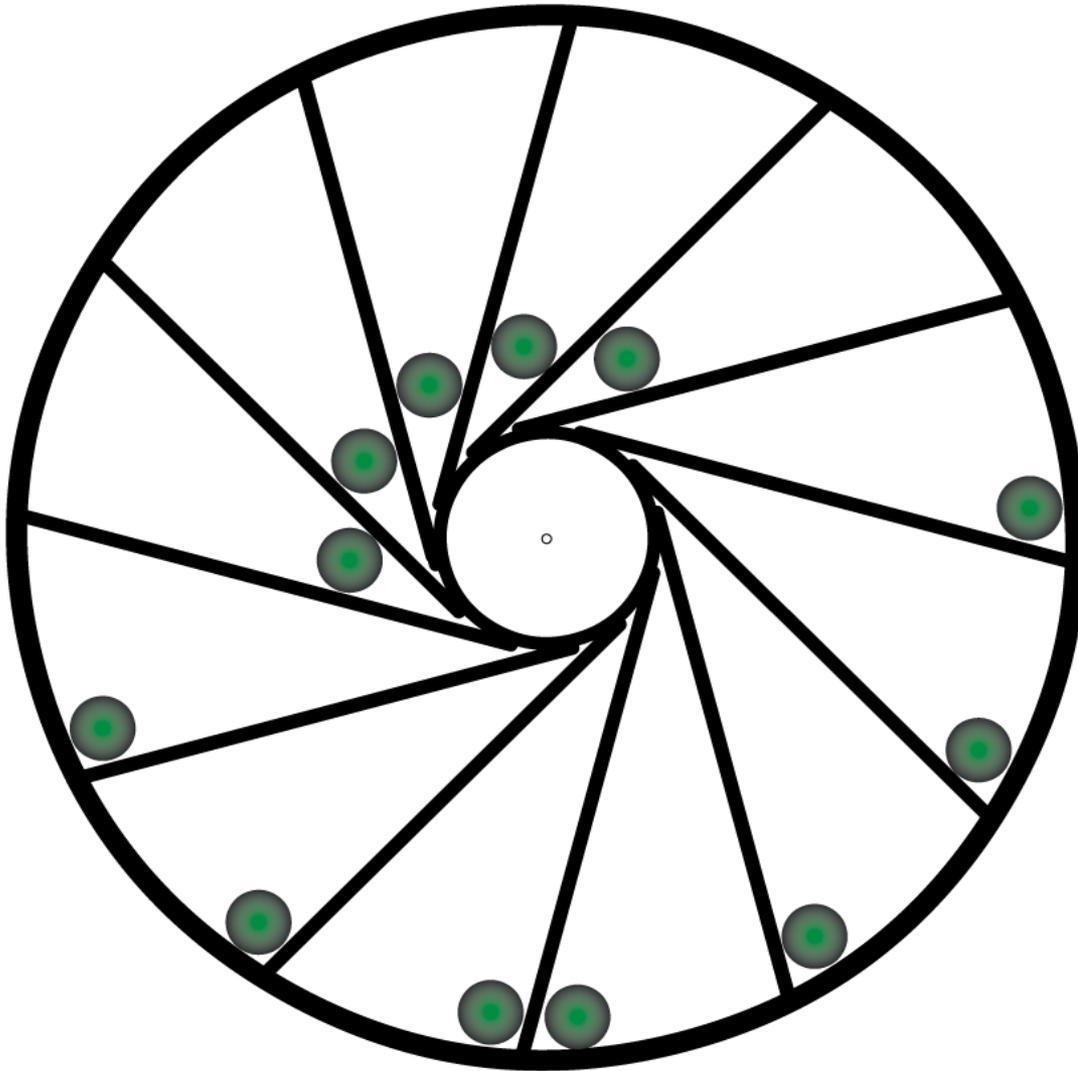


## Perpetuum Mobile

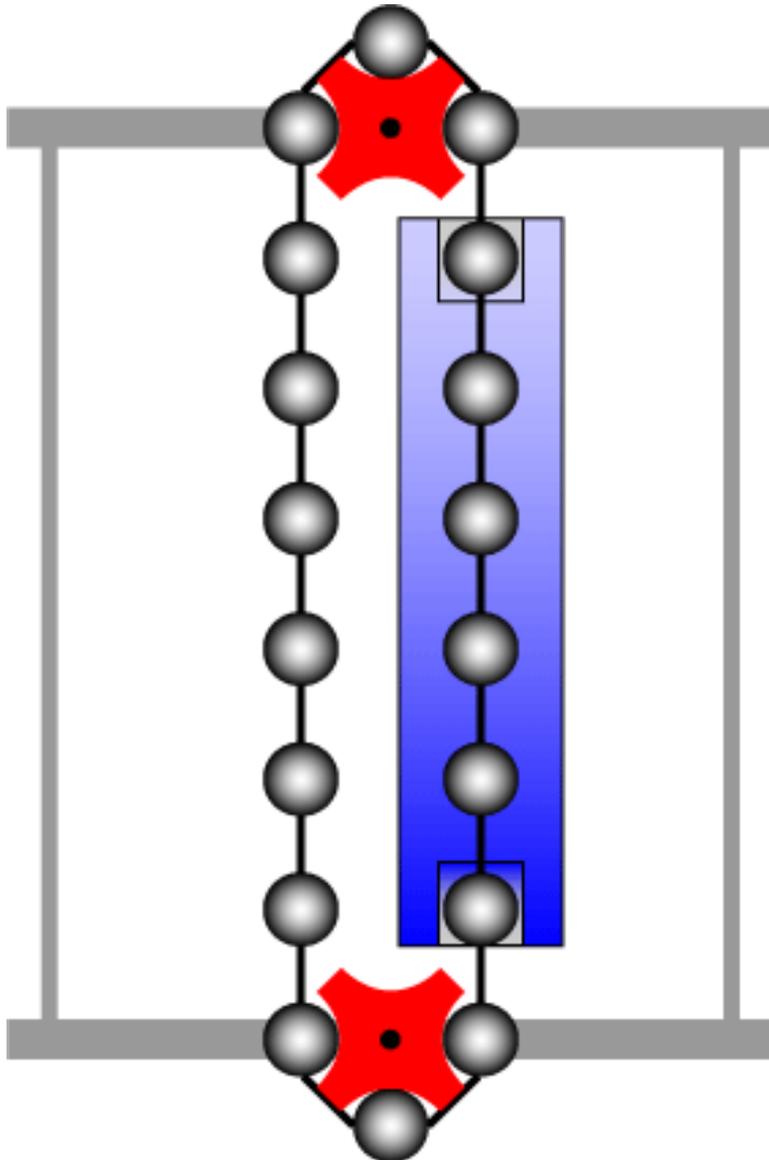
M. C. Escher



**Perpetuum  
Mobile**



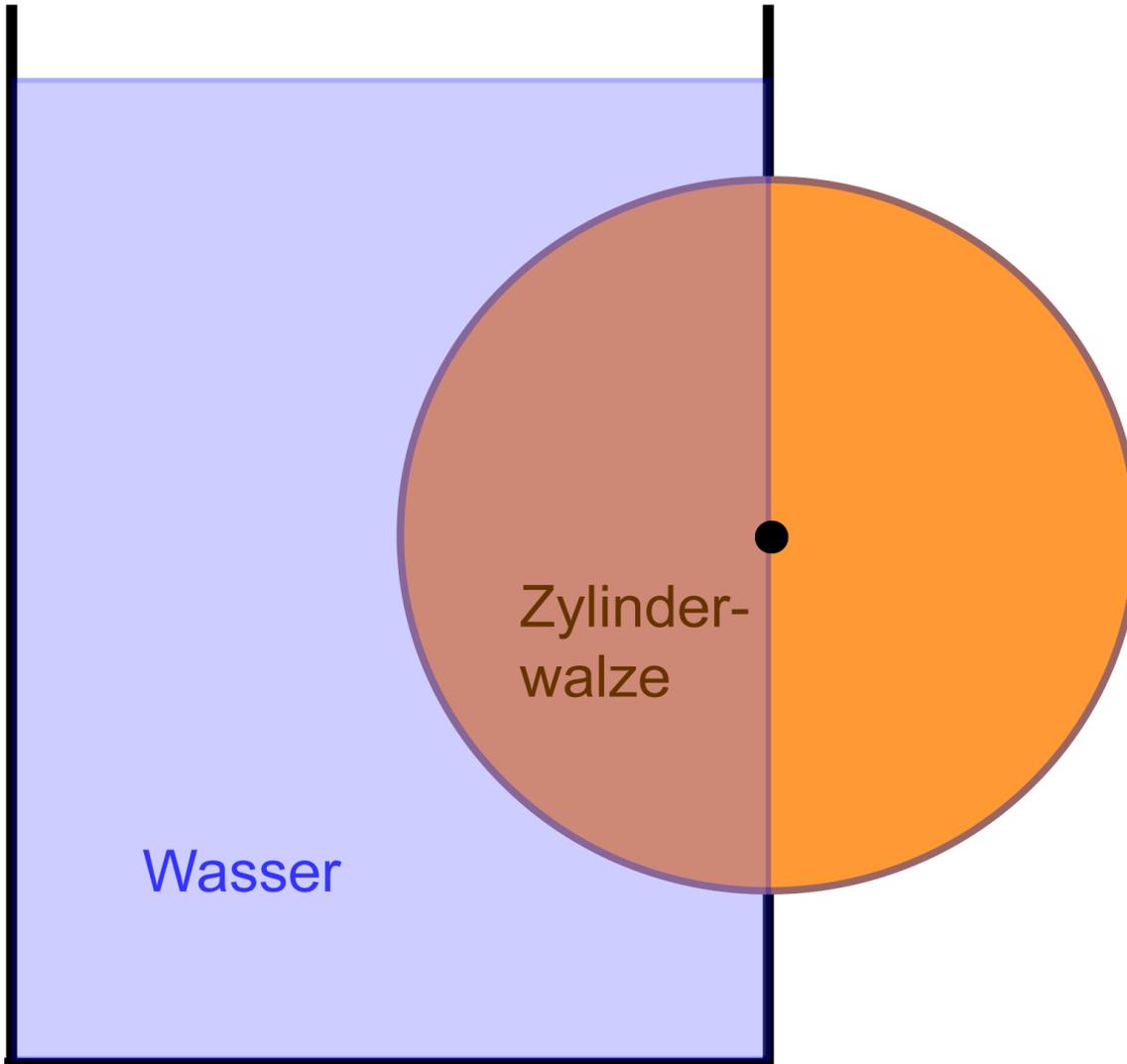
## Perpetuum Mobile



**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.**

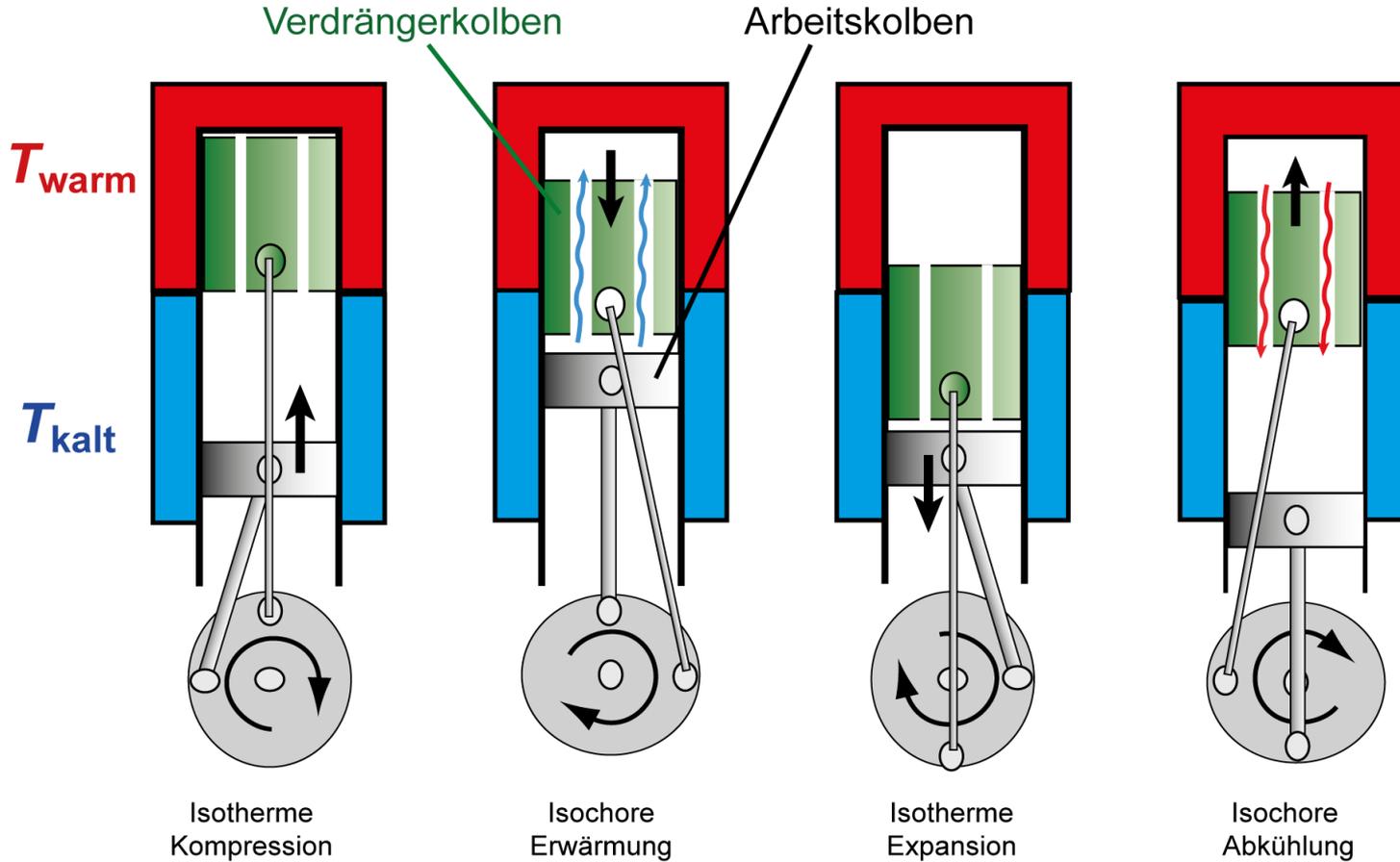


## Wärmekraftmaschinen

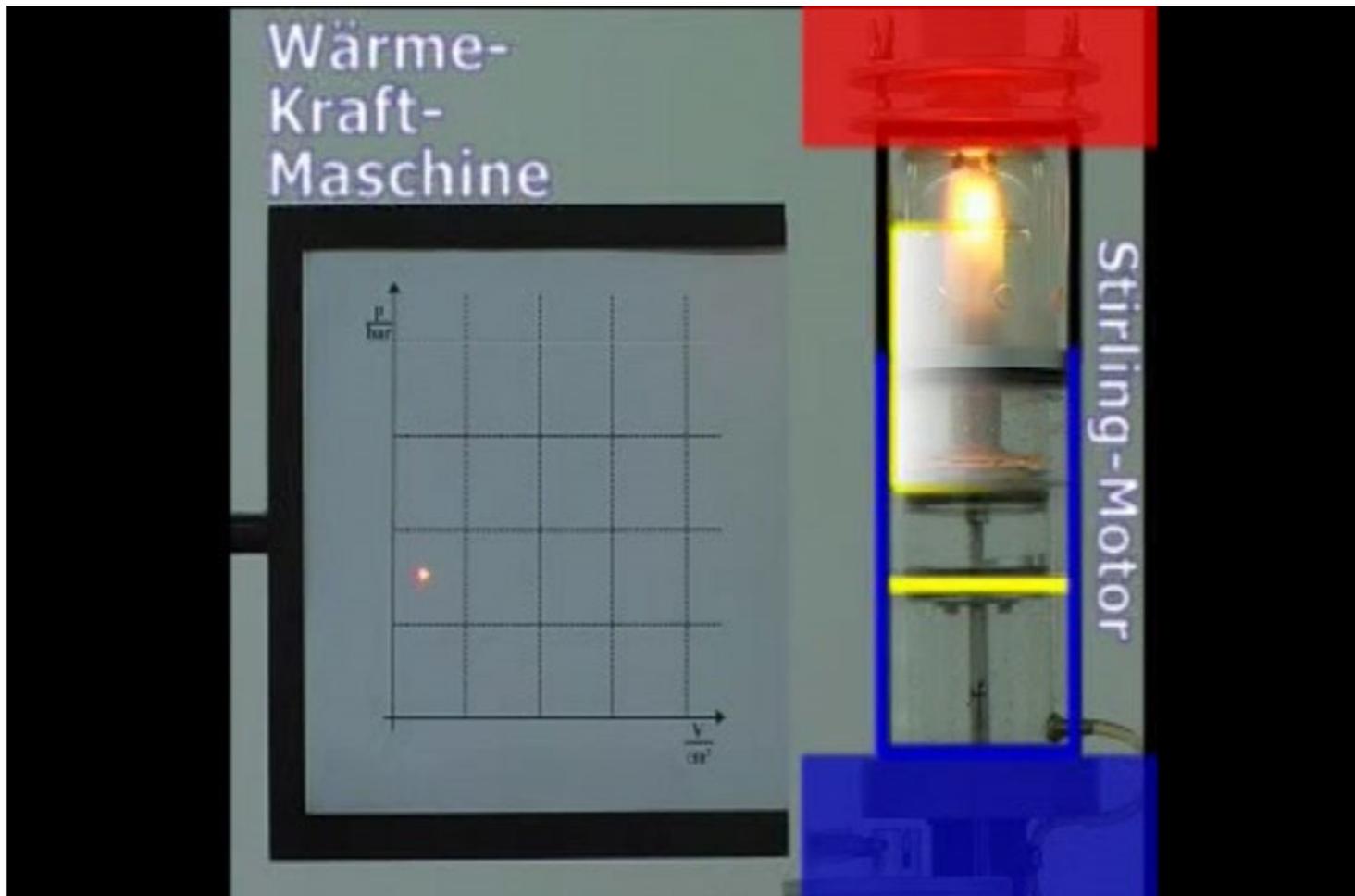
sind zyklisch arbeitende Konstruktionen,  
die Wärme in mechanische Arbeit umsetzen.

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

### Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)



## Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

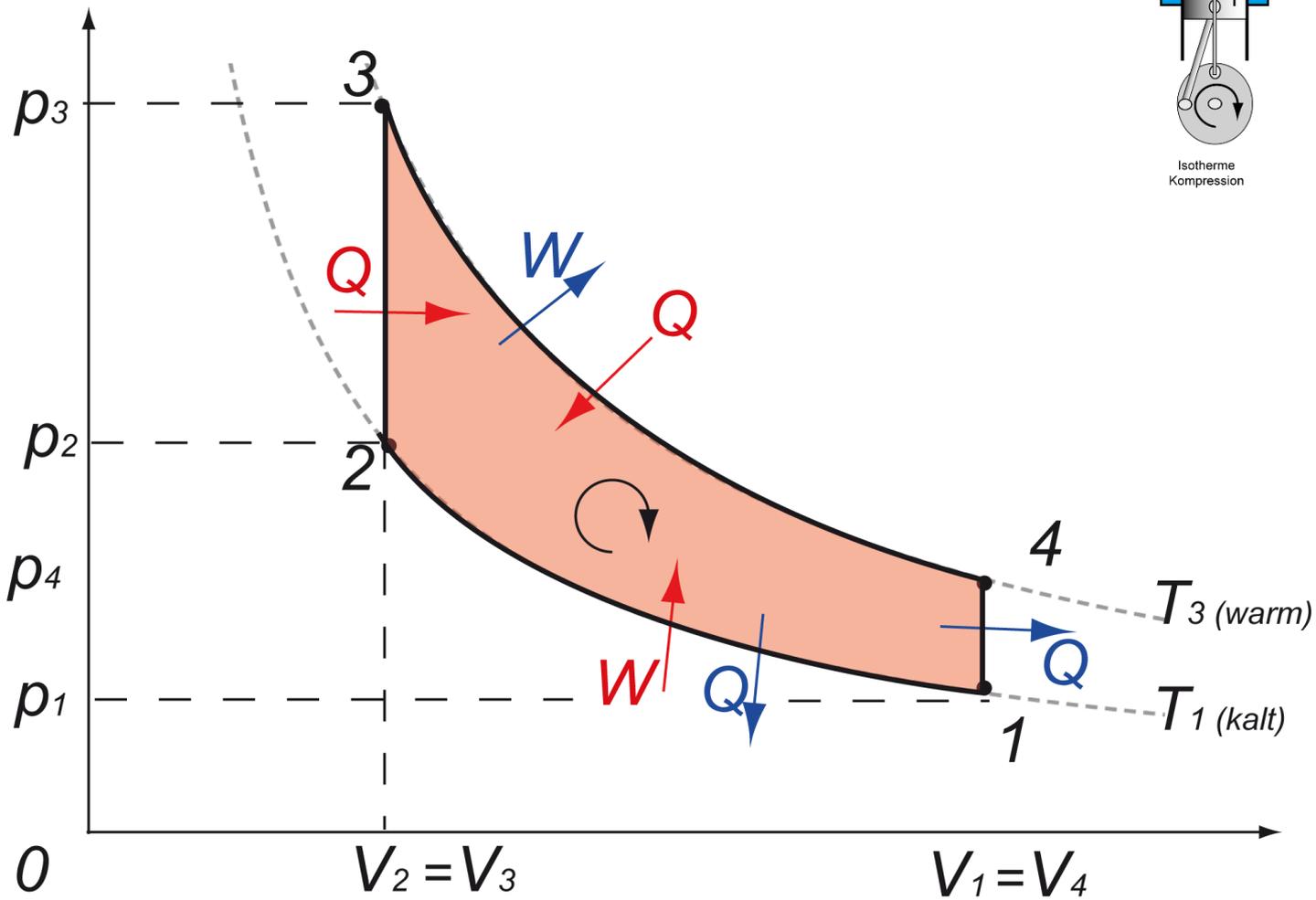
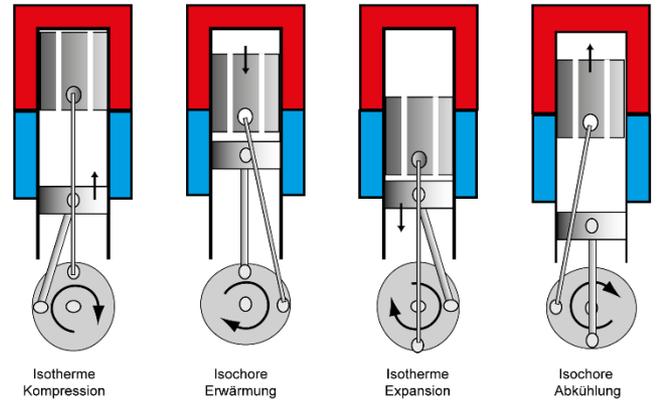


[Link zum Experiment:](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-2-H03_Stirling-Waerme-Kraft-1.m4v)

[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)

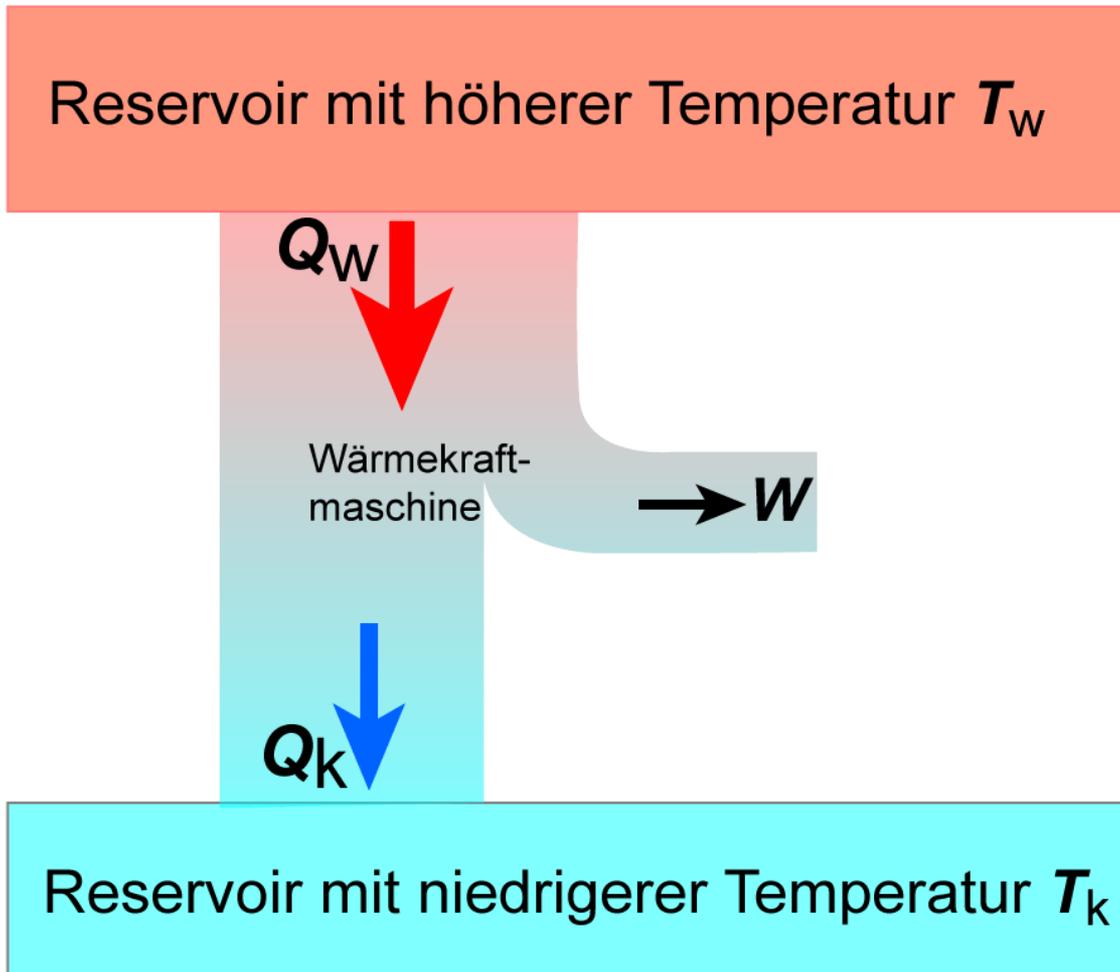


### Beispiel: Stirlingmotor / Heißluftmotor (4 Phasen)

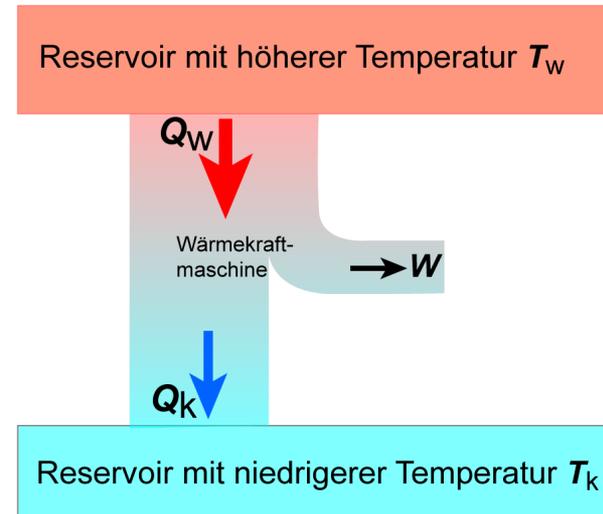




## Wärmekraftmaschine



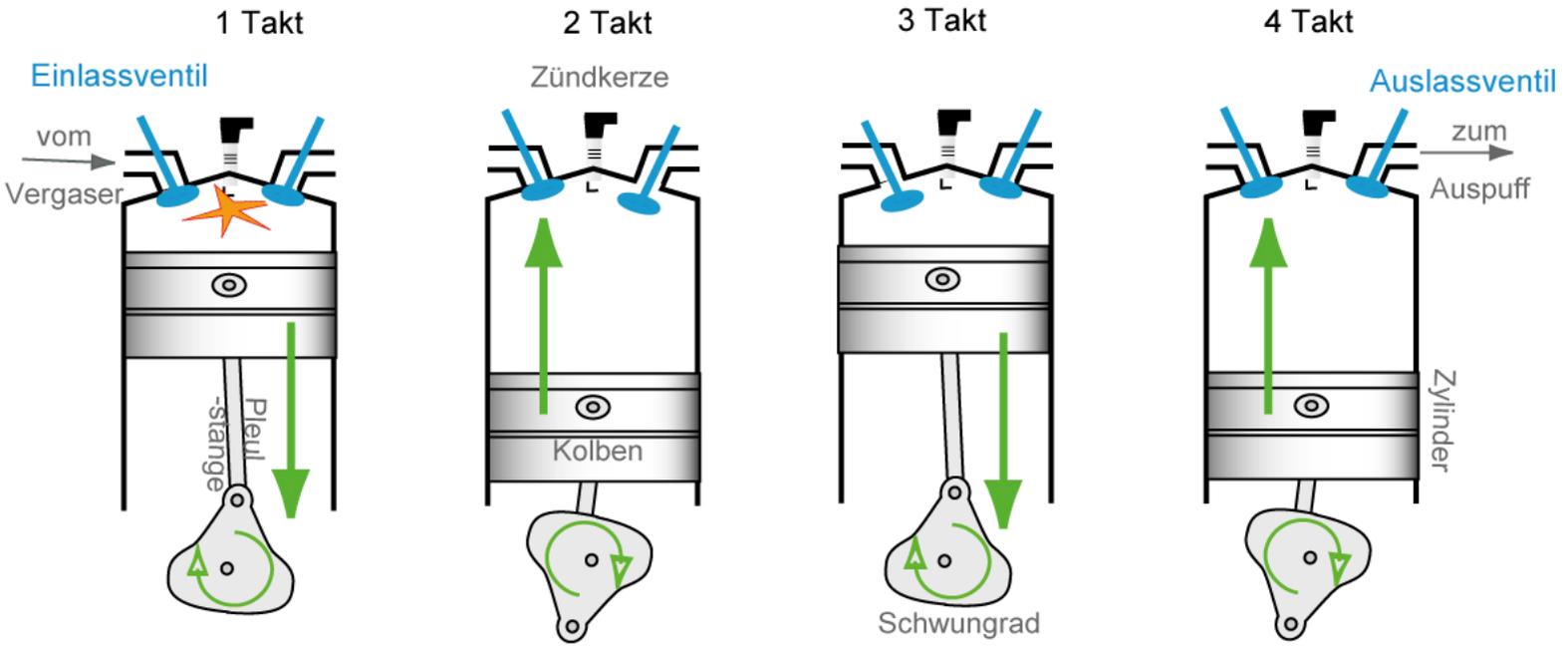
## Wirkungsgrad



# 4 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

## 4.2 Wärmekraftmaschinen

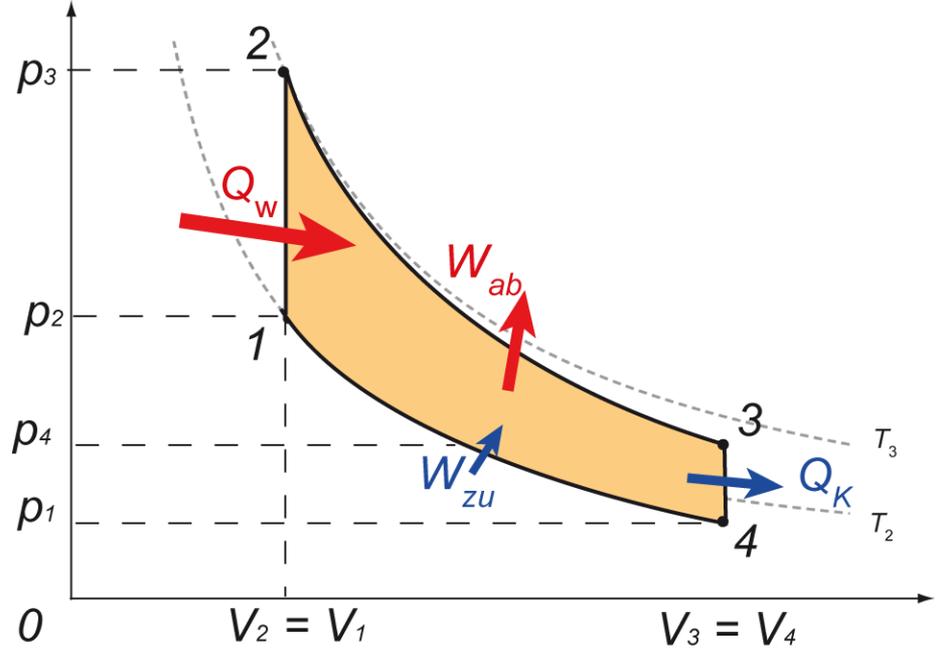
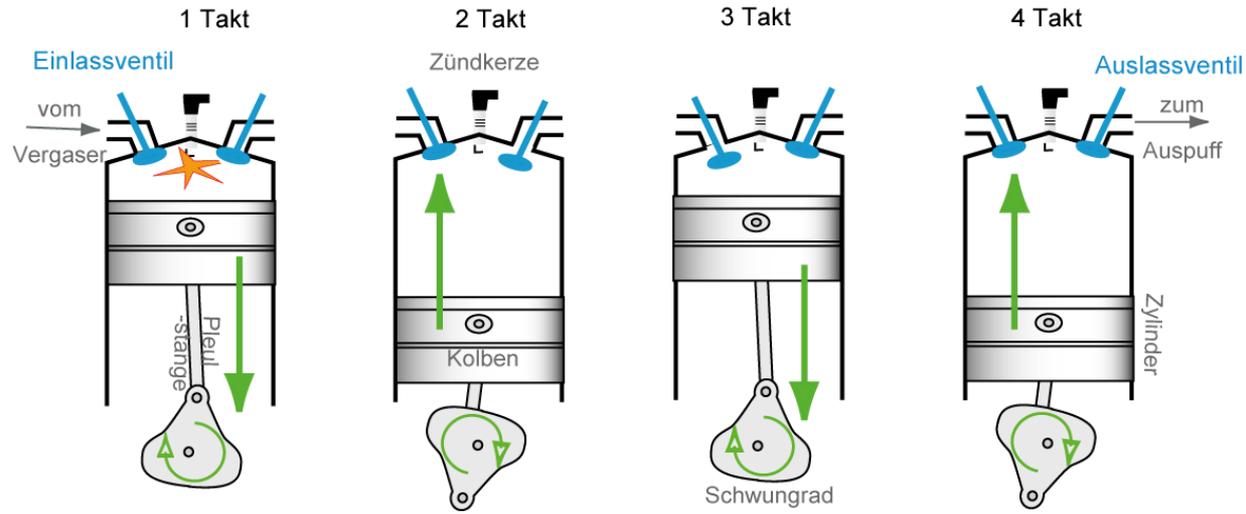
### Ottomotor



**4 Takte:**

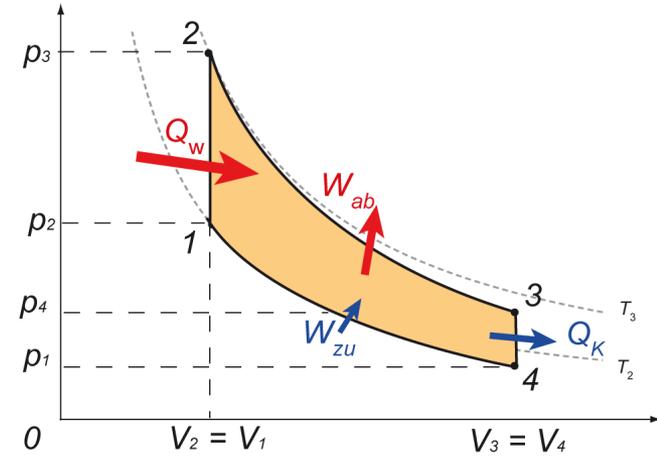
1. Zündung des Gemisches;
2. Ausstoß der Verbrennungsgase;
3. Ansaugen des frischen Gemisches;
4. Verdichten

### Ottomotor



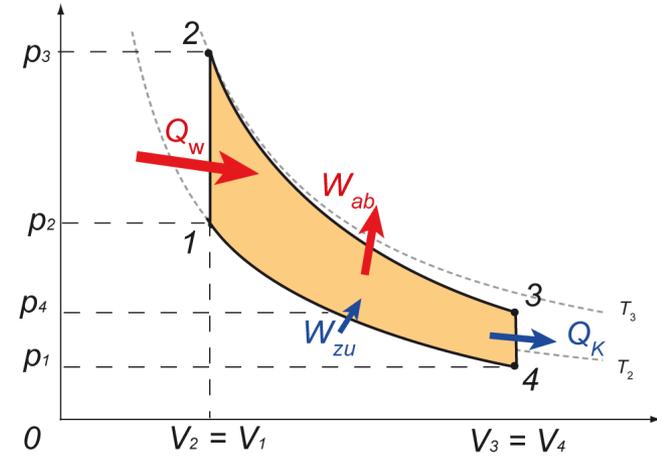


### Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess



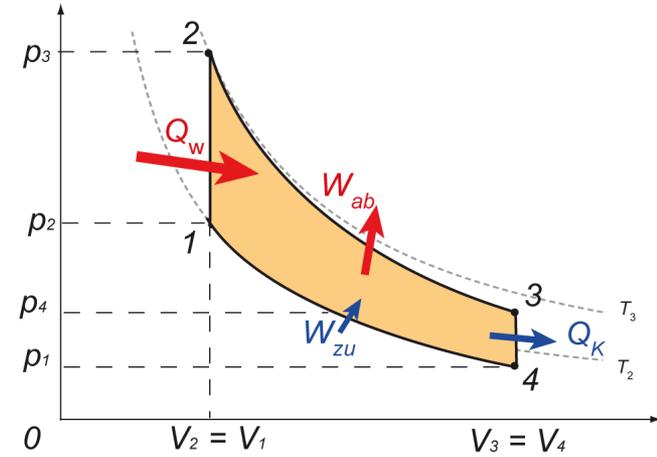


### Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess



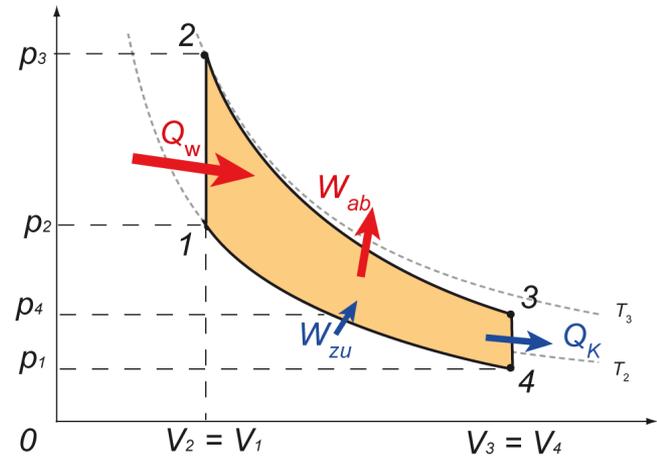


### Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess





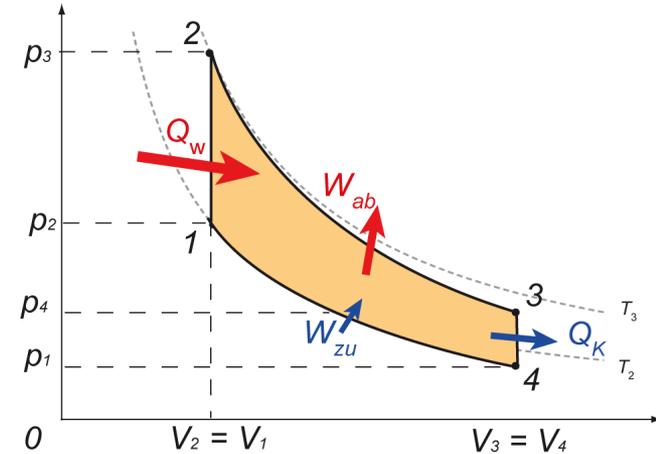
### Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess





## Wirkungsgrad beim Otto-Kreisprozess

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



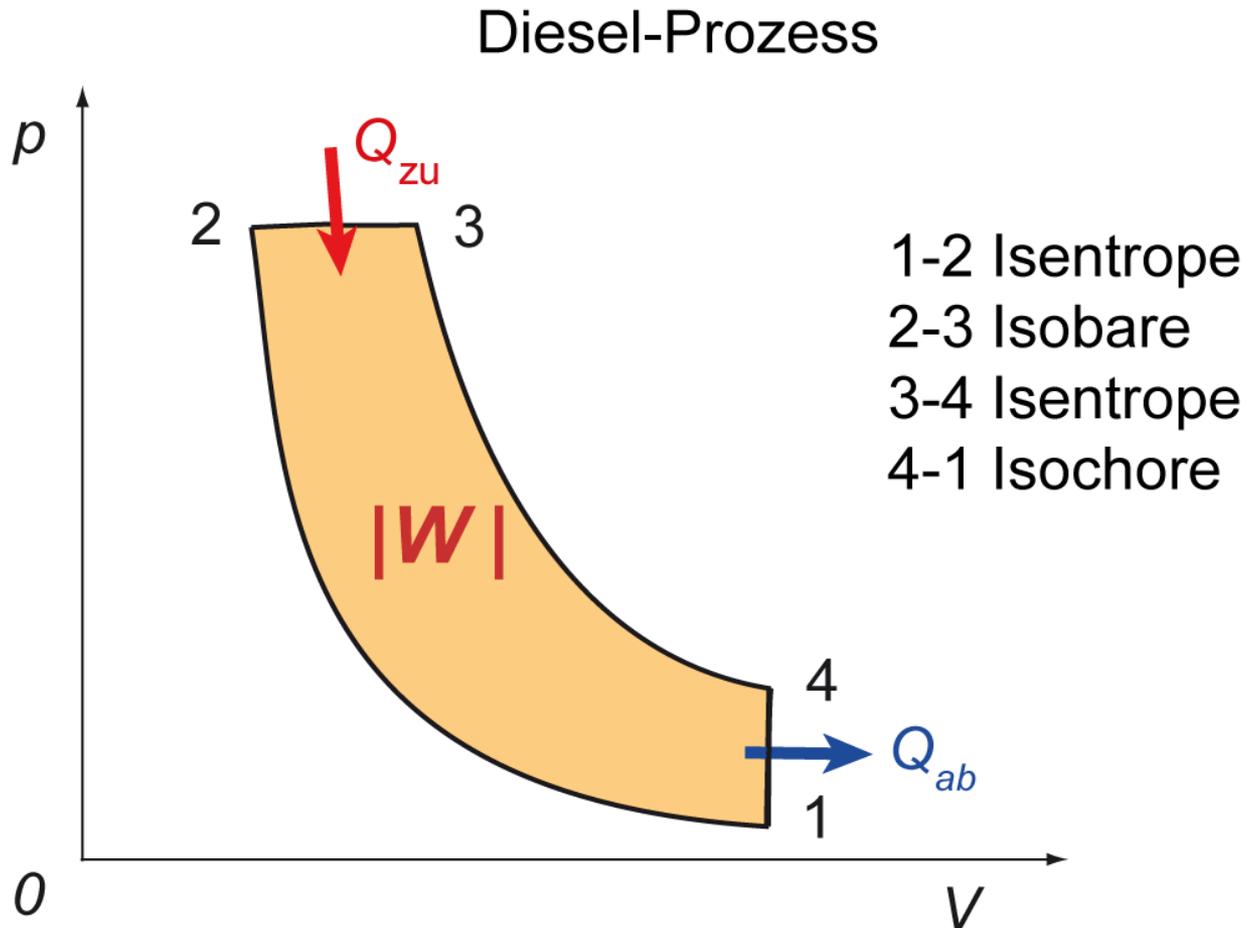
$$|Q_k| = |Q_{4 \rightarrow 1}| = n \cdot c_V \cdot |T_1 - T_4| = n \cdot c_V \cdot (T_4 - T_1)$$

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

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



## Diesel-Prozess





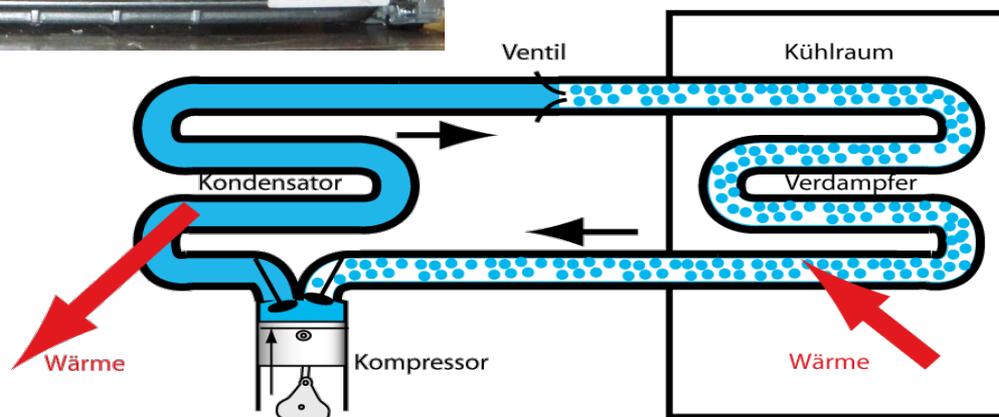
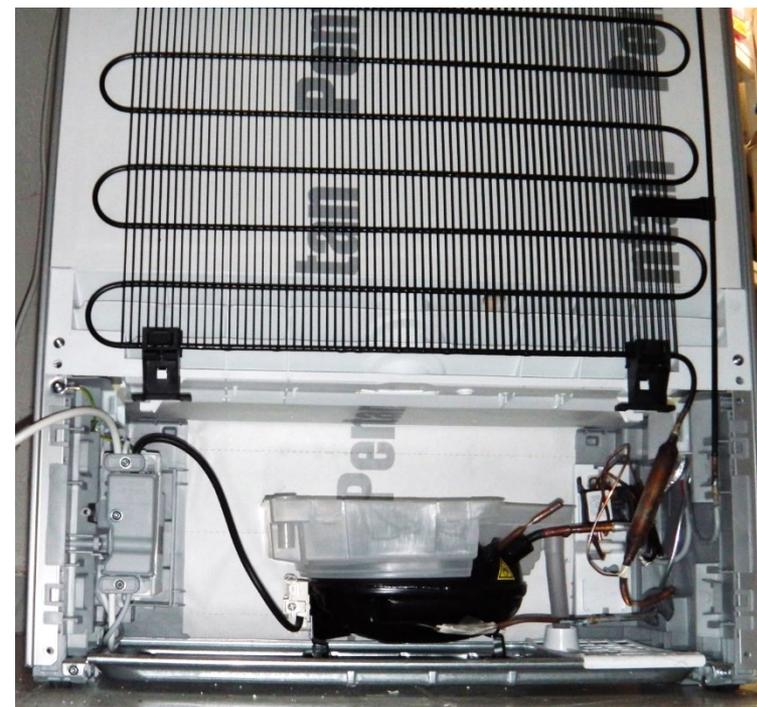
4.1 Grenzen, (experimentelle) Erkenntnis

4.2 Wärmekraftmaschinen

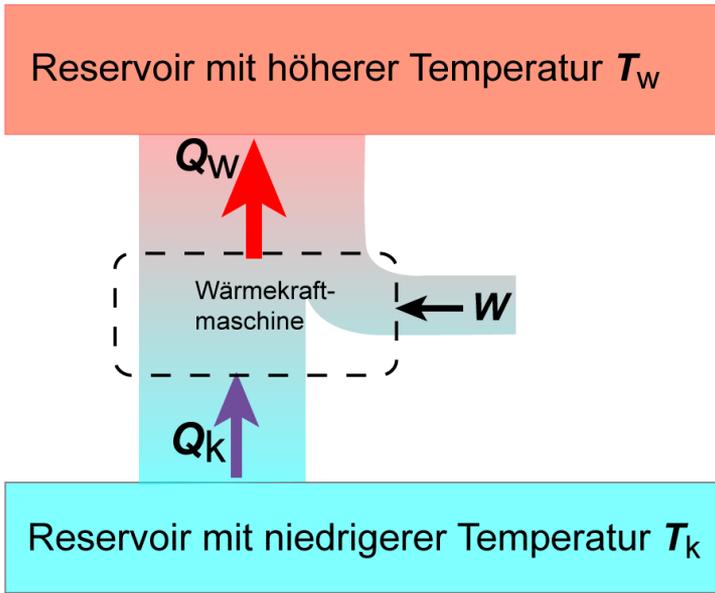
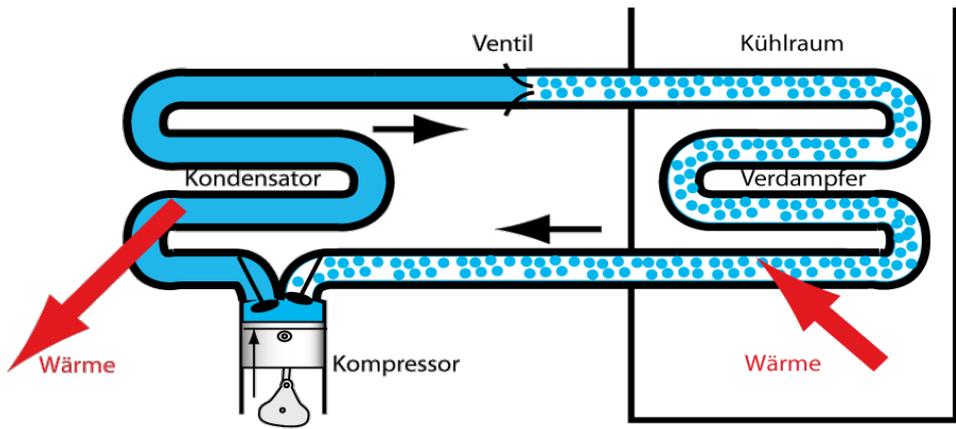
**4.3 Kältemaschinen**

**4.4 Carnot-Prozess**

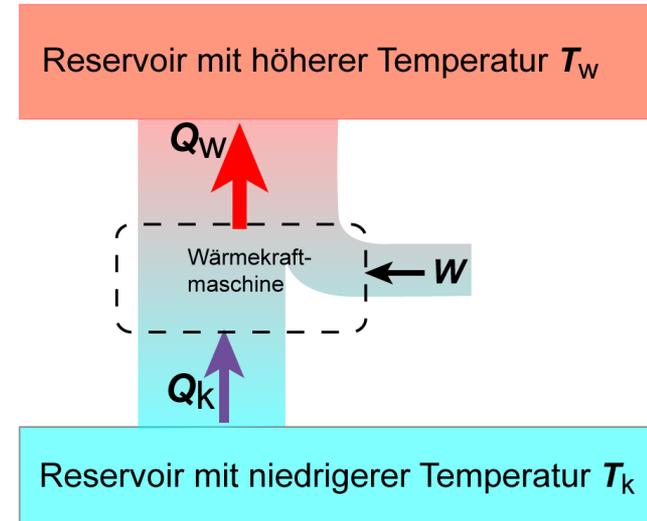
## Kühlschrank



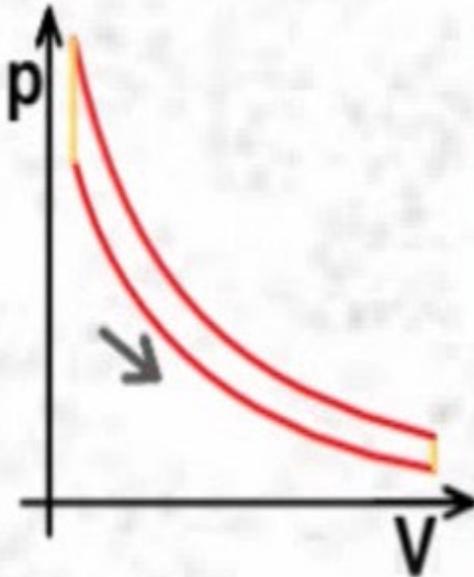
# Kühlschrank



## Leistungszahl einer Kältemaschine



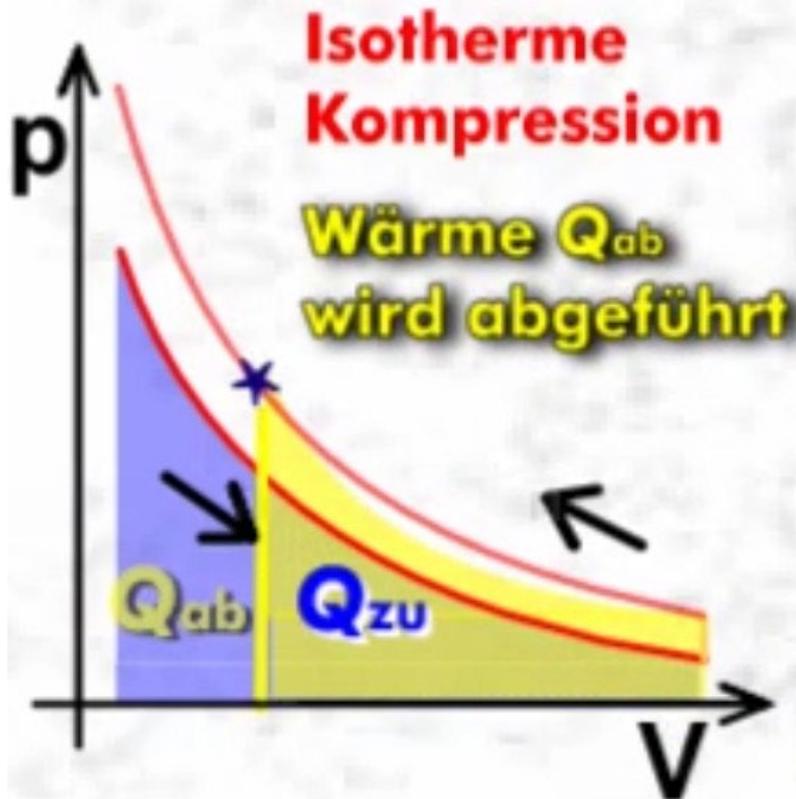
idealisiertes  
 $pV$ -Diagramm



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

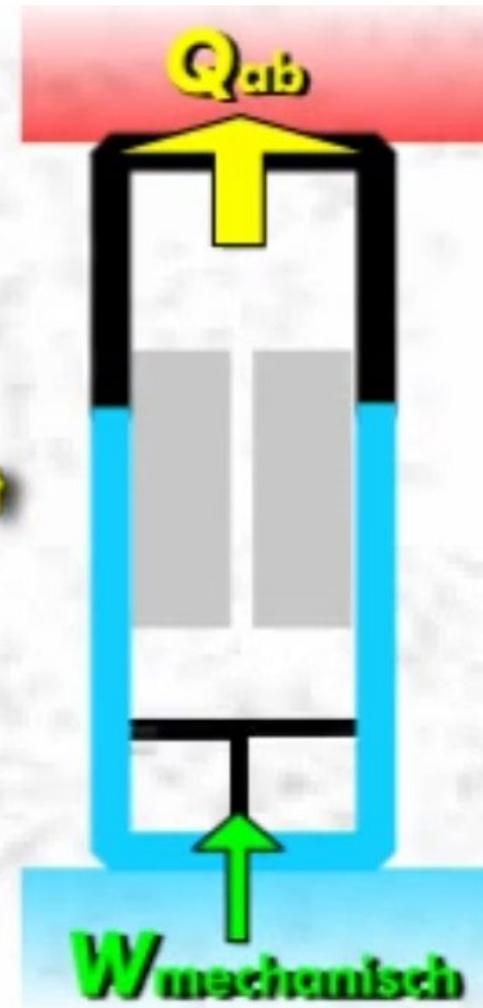
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_W\\_Video/4-3-H15\\_Waermepumpe-Exp-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_W_Video/4-3-H15_Waermepumpe-Exp-1.m4v)

# Wärmepumpe



**Isotherme  
Kompression**

**Wärme  $Q_{ab}$   
wird abgeführt**



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



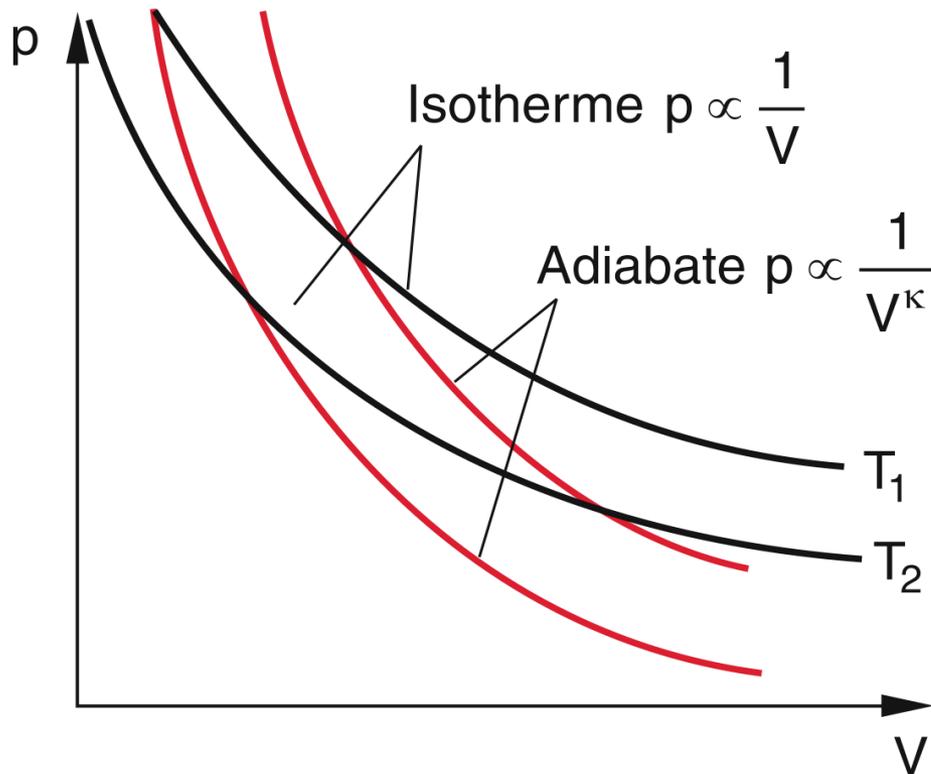
## Der Carnotprozess

### Idealisierungen – reversible Teilprozesse

- keine Reibung
- Durchlaufen von Gleichgewichtszuständen
- infinitesimale Temperaturschritte  $dT$



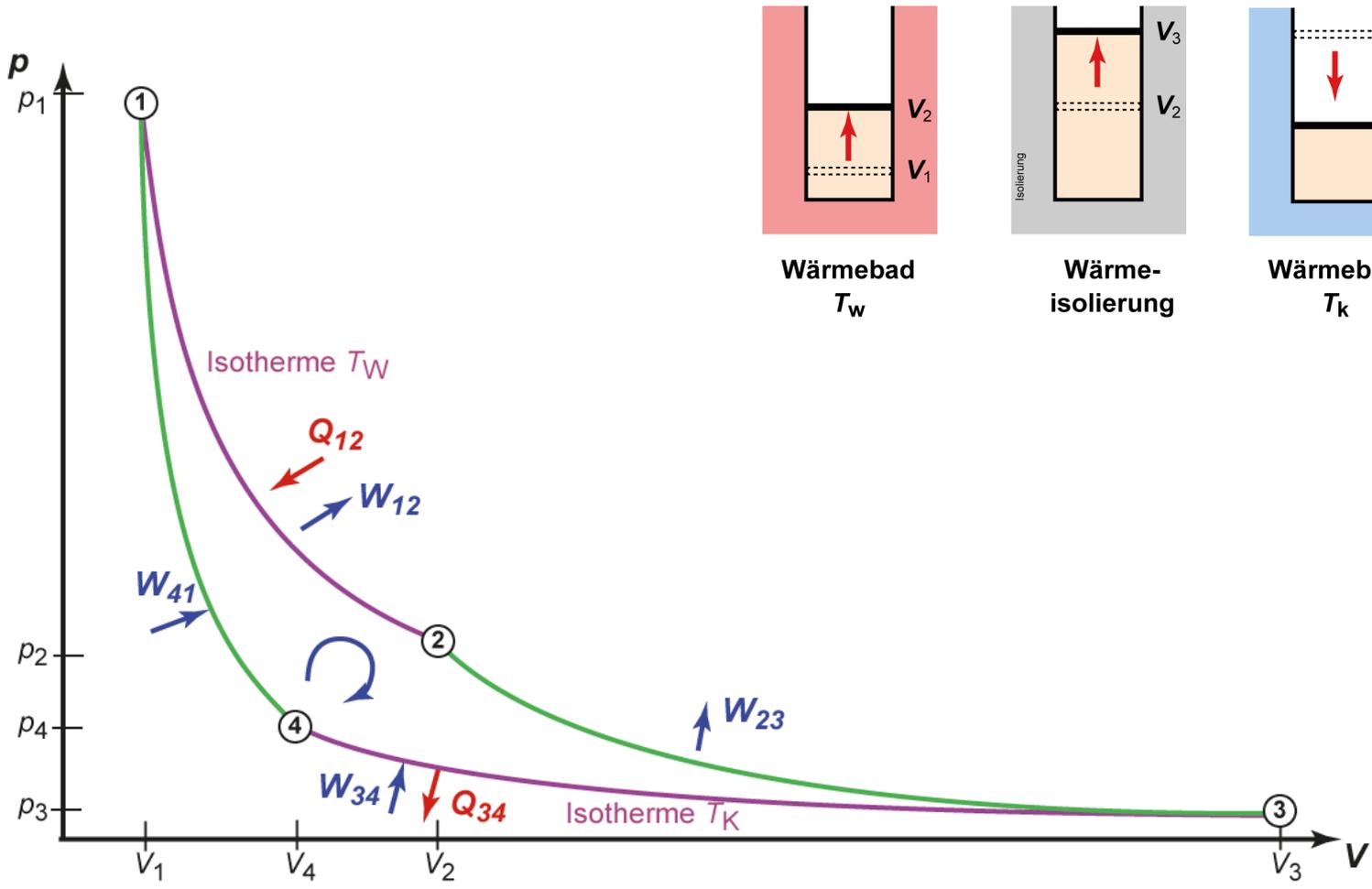
## 2 Isotherme, 2 Adiabaten



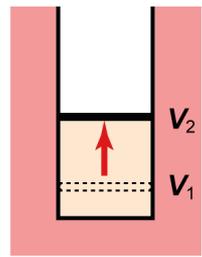
Isothermen und Adiabaten in einem  $p$ - $V$ -Diagramm



### 2 Isotherme, 2 Adiabaten

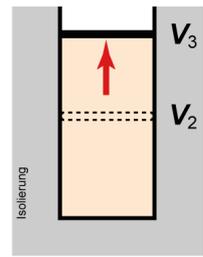


1 ->2  
isotherme  
Expansion



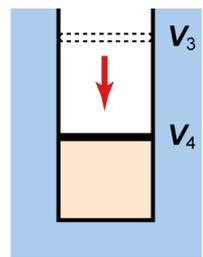
Wärmebad  
 $T_W$

2 ->3  
isentropische  
Expansion



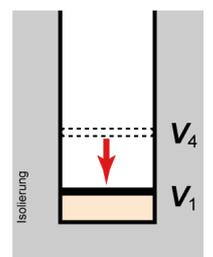
Wärme-  
isolierung

3 ->4  
isotherme  
Kompression



Wärmebad  
 $T_K$

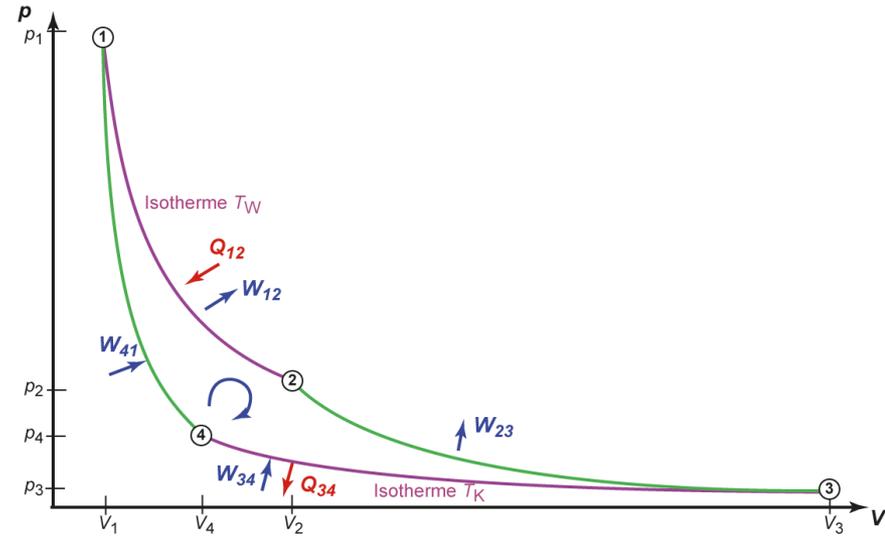
4 ->1  
isentropische  
Kompression



Wärme-  
isolierung

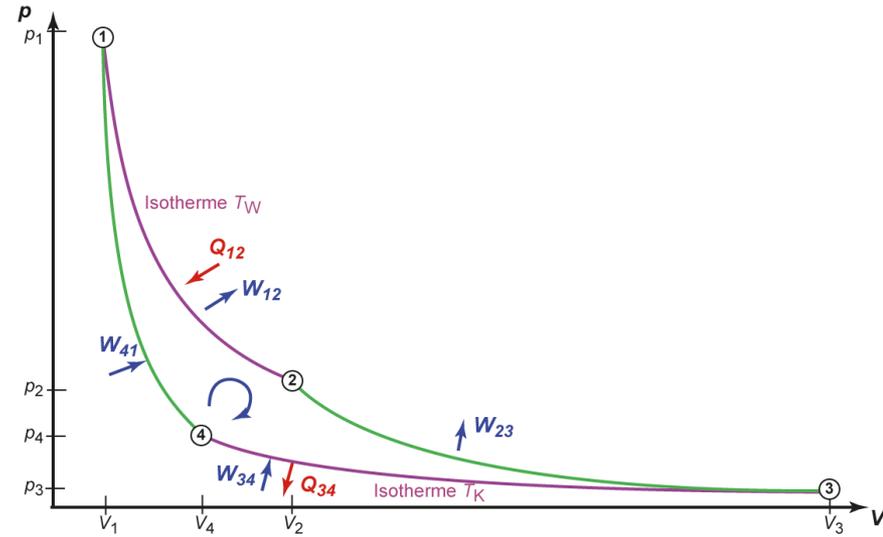


### 2 Isotherme, 2 Adiabaten



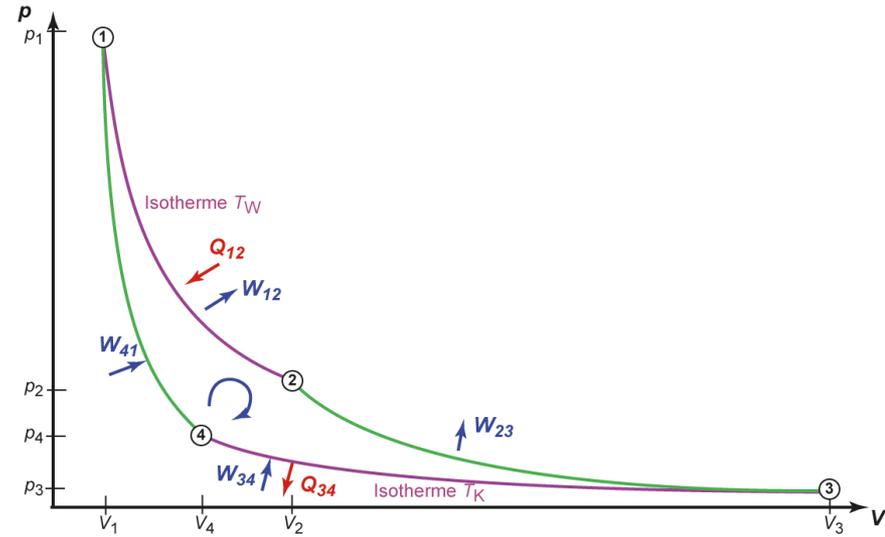


### 2 Isotherme, 2 Adiabaten



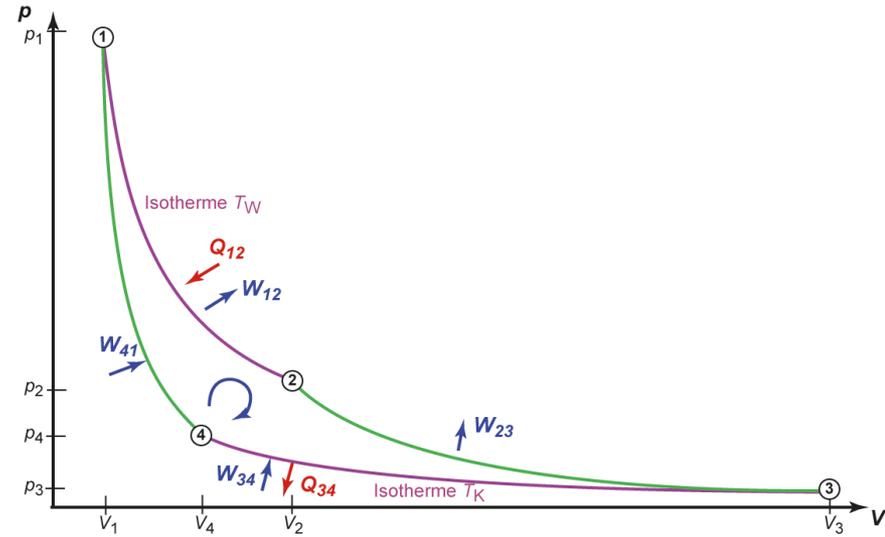


### 2 Isotherme, 2 Adiabaten





### 2 Isotherme, 2 Adiabaten



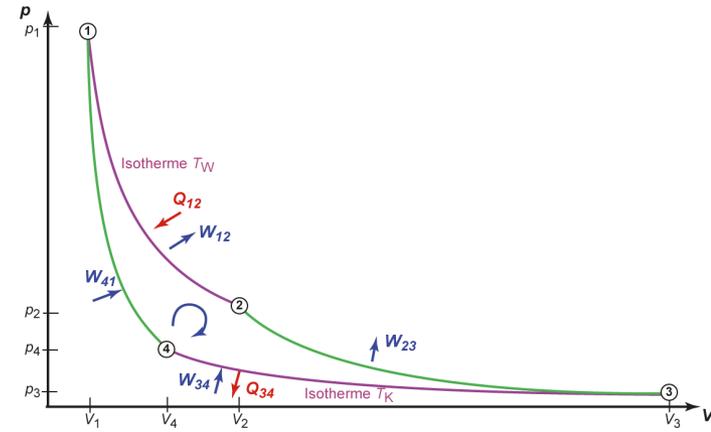
# 4 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

## 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**