

# Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Peter Hakenesch

**peter.hakenesch@hm.edu**

**[www.lrz-muenchen.de/~hakenesch](http://www.lrz-muenchen.de/~hakenesch)**

---

- 1 Einleitung
- 2 Grundbegriffe
- 3 Systembeschreibung
- 4 Zustandsgleichungen
- 5 Kinetische Gastheorie
- 6 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik
- 7 Kalorische Zustandsgleichungen
- 8 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik
- 9 Zustandsänderungen
- 10 Reversible Kreisprozesse
- 11 Kreisprozesse thermischer Maschinen
- 12 Kälteanlagen**

## 12 Kälteanlagen

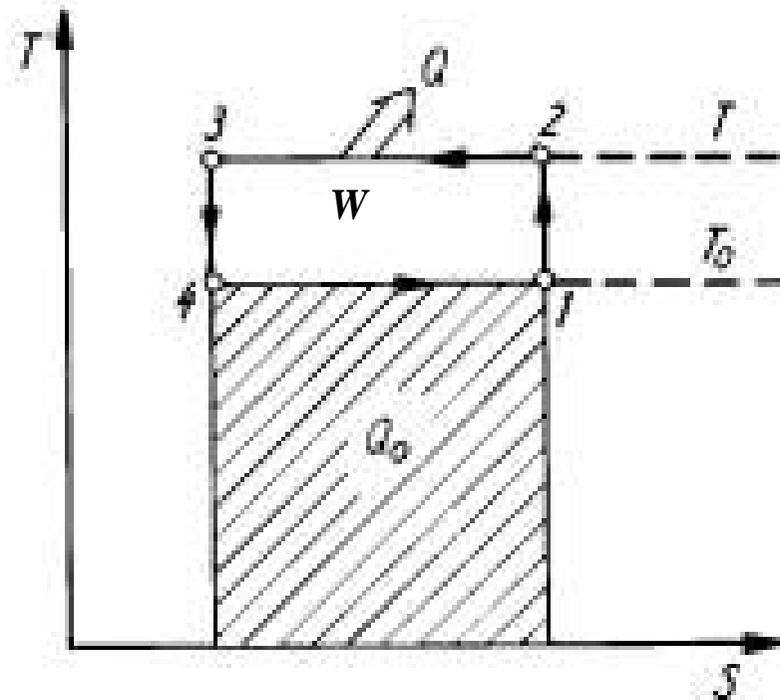
### 12.1 Allgemeiner Kältemaschinenprozeß

#### Aufgaben

- Aufrechterhaltung einer Temperaturdifferenz zwischen einem zu kühlenden Raum und der Umgebung
  - ⇒ Kühlschrank, Gefriertruhe
- Abkühlung eines Stoffes von einem höheren zu einem niedrigeren Temperaturniveau
  - ⇒ Luftverflüssigung

## Kälteprozeß

Entzogene Wärme  $Q$  muß bei einer höheren Temperatur  $T$  an die Umgebung abgegeben werden als mit der sie dem Kühlraum entnommen wurde, d.h.  $T_0$



**Allgemeiner Kältemaschinenprozeß (Linksdrehender Carnot-Prozeß)**

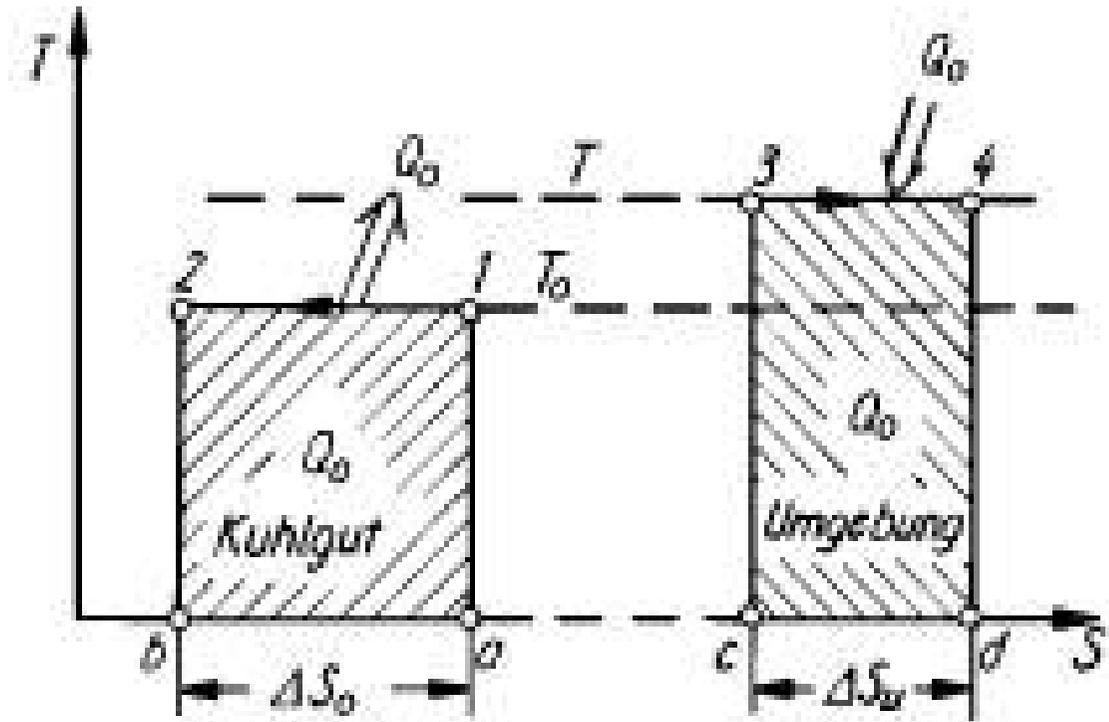
### Entropieänderungen

Entropieverringering im Kühlraum infolge  
Wärmeentzug  $Q_0$  bei  $T_0$

$$\Delta S_0 = \frac{Q_0}{T_0}$$

Entropieerhöhung der Umgebung infolge  
Wärmezufuhr mit der Temperatur  $T$

$$\Delta S_u = \frac{Q_0}{T}$$



Abgabetemperatur  $T$  liegt über Kühlraumtemperatur  $T_0$

$$\Delta S_0 = \frac{Q_0}{T_0} > \Delta S_u = \frac{Q_0}{T} \quad \Rightarrow \quad \Delta S = (\Delta S_u - \Delta S_0) < 0 \quad \text{d.h. Entropieabnahme}$$

## 2. Hauptsatz

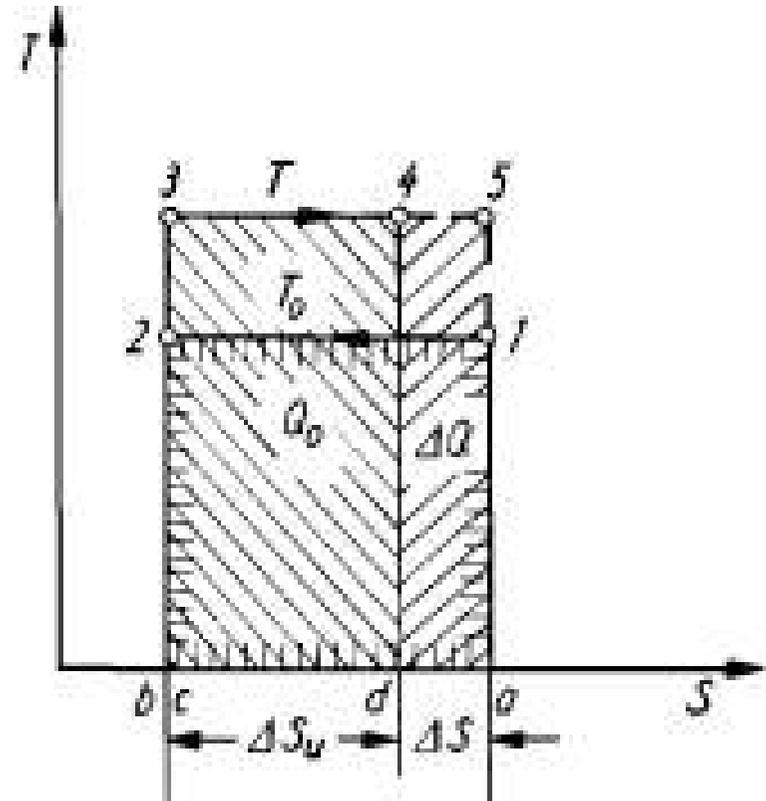
Wärme kann nicht von selbst von einem niedrigeren Niveau auf ein höheres Niveau übergehen

⇒ Technische Realisierung einer Kältemaschine erfordert einen Zwischenprozeß zur Kompensation der Entropieverminderung  $\Delta S$

### Forderung

$$\frac{\Delta Q}{T} + \Delta S \geq 0$$

Kompensationswärme  $\Delta Q$  bei Kälteleistung  $Q_0$



**Erzeugung zusätzlicher Wärme  $\Delta Q$** 

Prinzipiell alle Maßnahmen zur Entropieerhöhung möglich

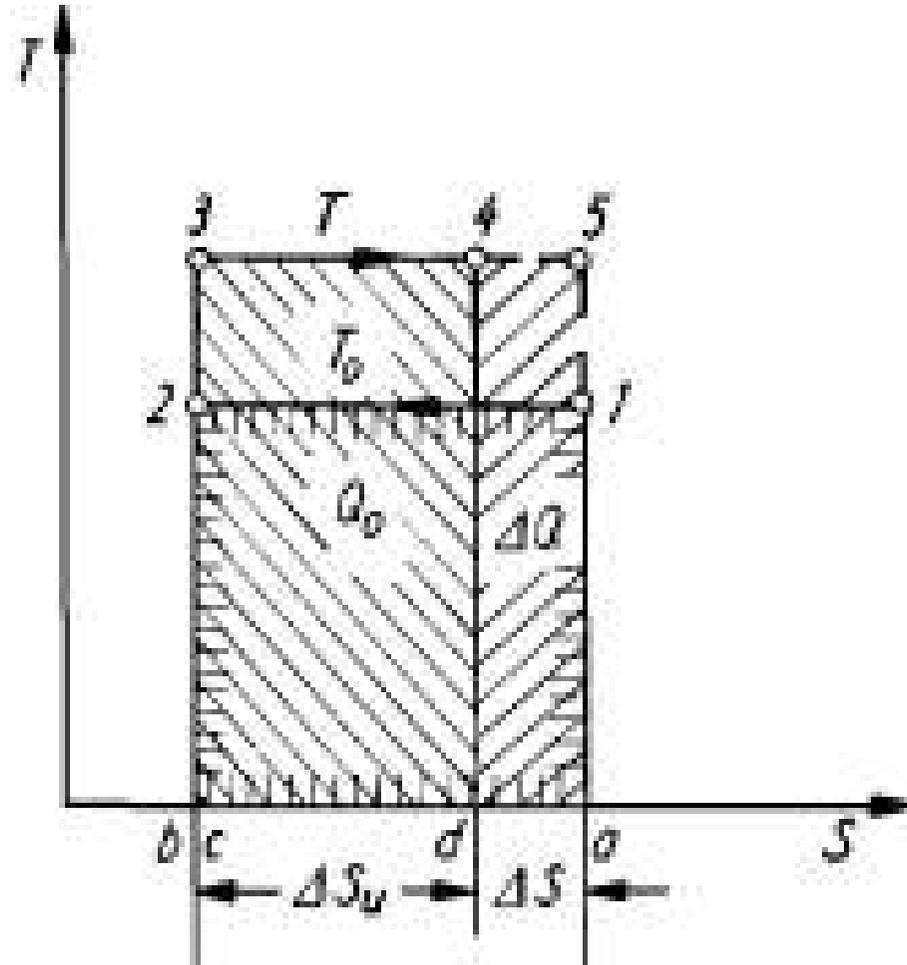
Technisch relevante Kältetechnik-Prozesse:

- Umsetzung mechanischer Arbeit in Wärme (Kompressionskälteanlagen)
- Zufuhr von Heizwärme als Kompensationsprozeß (Absorptionsverfahren)
- Thermoelektrische Prozesse, bei denen durch elektrische Energie Wärme von der kalten Lötstelle zur warmen transportiert wird (Peltier-Effekt)

### Arbeitsaufwand

Erforderliche Arbeit  $W$  zur Erzeugung der Zusatzwärme  $\Delta Q = T \cdot \Delta S$

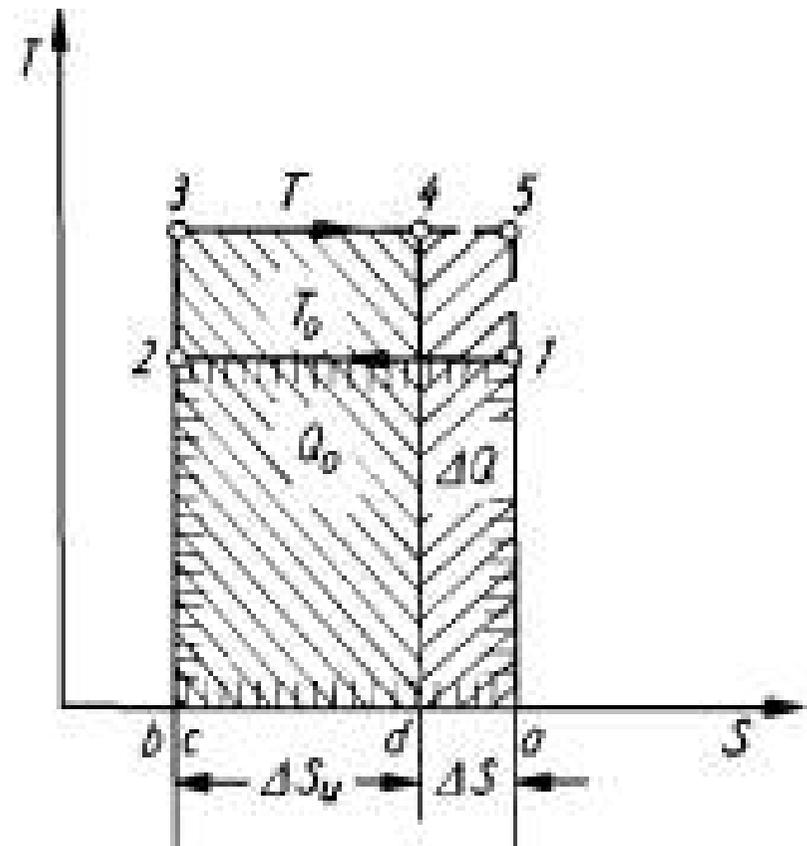
$$W = \Delta Q = T \cdot \Delta S$$



## Grundregel der Kältetechnik

Für die gleiche Kälteleistung  $Q_0$  muß um so mehr Arbeit  $W$  aufgewendet werden, je größer der zu überbrückende Temperaturunterschied  $\Delta T = T - T_0$  ist

- ⇒ Nie tiefer kühlen als unbedingt erforderlich
- ⇒ Umgebungstemperatur nur so wenig wie möglich überschreiten



**Leistungsziffer  $\varepsilon$** 

Maß der für den Kühlprozeß aufgewendeten Arbeit

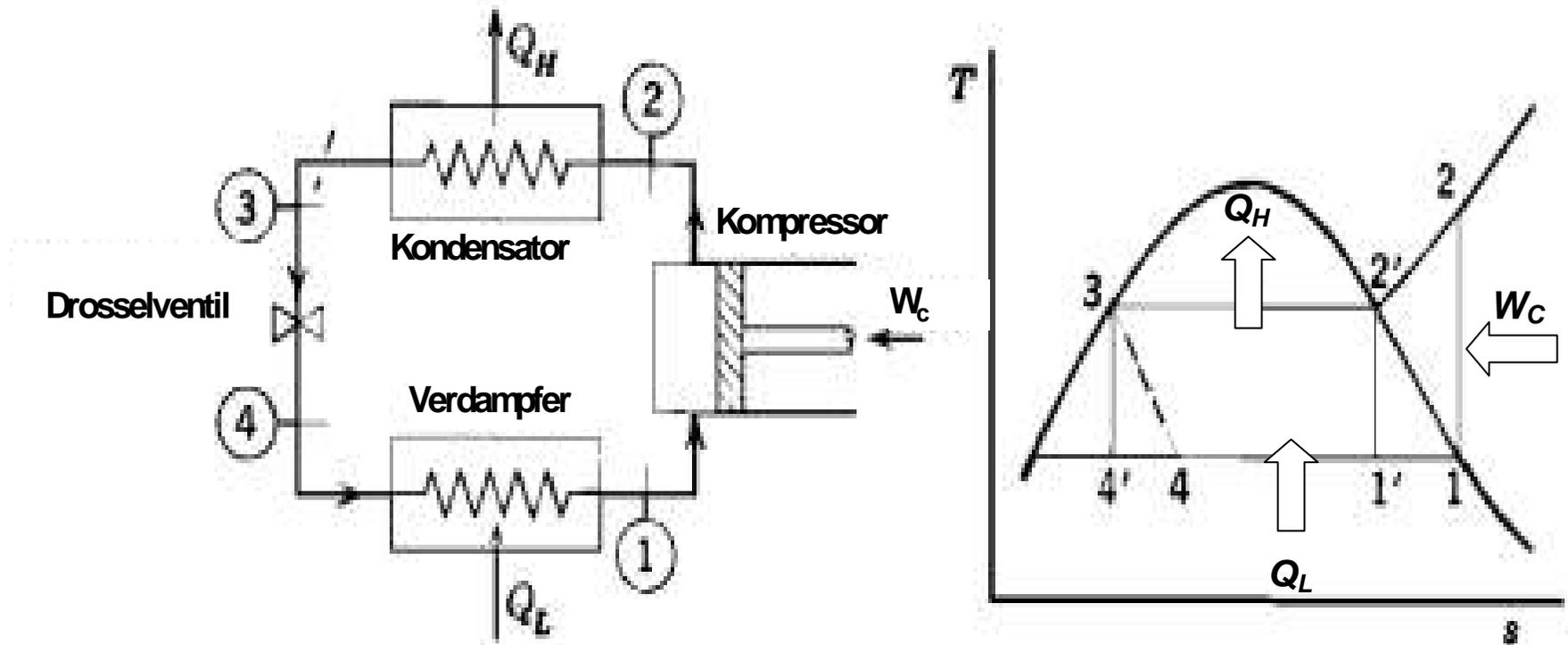
$$\varepsilon = \frac{\text{abgeführte Wärme } Q_0}{\text{zugeführte Arbeit } W}$$

Leistungsziffer des *Carnot-Prozesses*

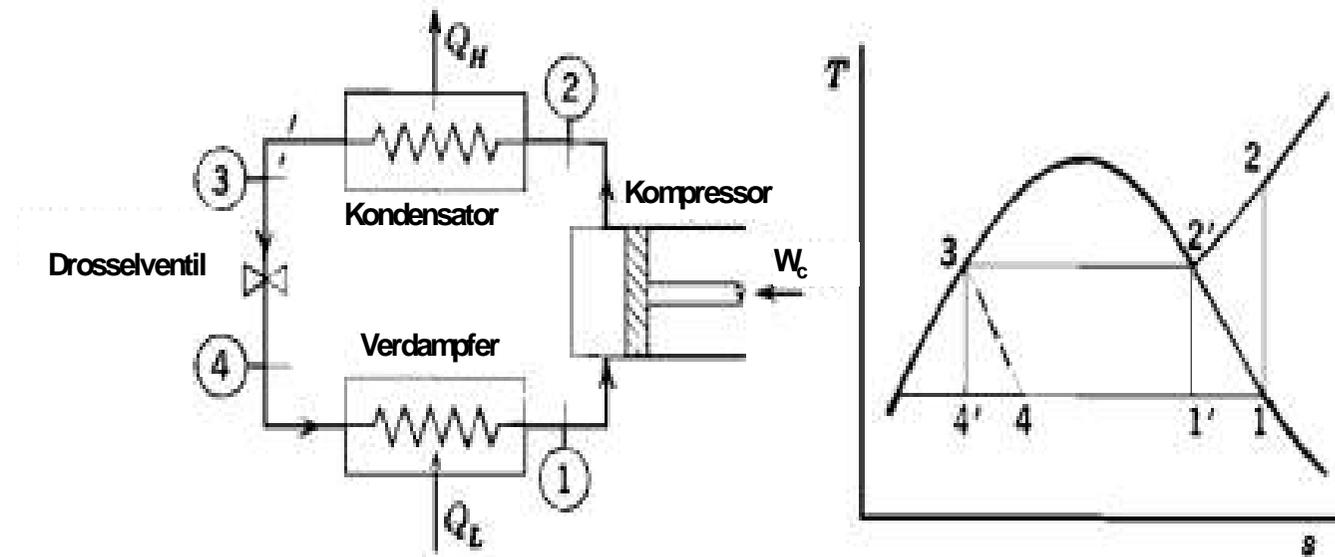
$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{T_0}{T - T_0}$$

## 12.2 Dampf-Kompressions-Kälteanlage

Idealisierter *Dampf-Kompressions-Kühlkreislauf* (1-2-3-4-1) entspricht *Clausius-Rankine-Kreisprozeß* (Dampfturbinenprozeß), mit umgedrehter Durchlaufrichtung



## Ü 12.1 Dampf-Kompressions-Kühlkreislauf



**geg.:**

Kühlmittel Dichlordifluormethan (Freon-12)

Temperatur des Kühlmittels im Verdampfer:  $T_1 = -20^\circ\text{C}$

Temperatur des Kühlmittels im Kondensator:  $T_3 = +40^\circ\text{C}$

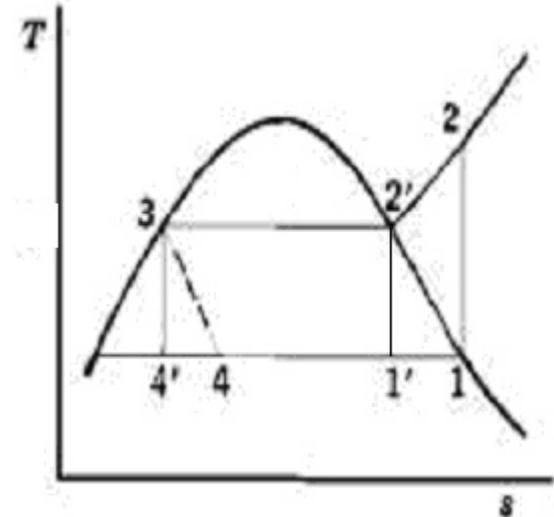
Massenstrom:  $\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s}$

**Stoffwerte für Freon-12 im Naßdampfgebiet**

$T_S$ [°C]	$p_S$ [MPa]	$v'$ [m³/kg]	$v''$ [m³/kg]	$h'$ [kJ/kg]	$h''$ [kJ/kg]	$s'$ [kJ/kg·K]	$s''$ [kJ/kg·K]
-20	0.1509	0.000685	0.108847	17.8	178.61	0.073	0.7082
+40	0.9607	0.000798	0.018171	74.527	203.051	0.2716	0.682

**Stoffwerte für Freon-12 im überhitzten Zustand**

$T$ [°C]	$p$ [MPa]	$v$ [m³/kg]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kg·K]
+50	0.9 MPa	0.020912	211.765	0.7131
+60	0.9 MPa	0.022012	219.212	0.7358
+50	1.0 MPa	0.018366	210.162	0.7021
+60	1.0 MPa	0.019410	217.810	0.7254



Verdampfer:  $T_1 = -20^\circ\text{C}$

Kondensator:  $T_3 = +40^\circ\text{C}$

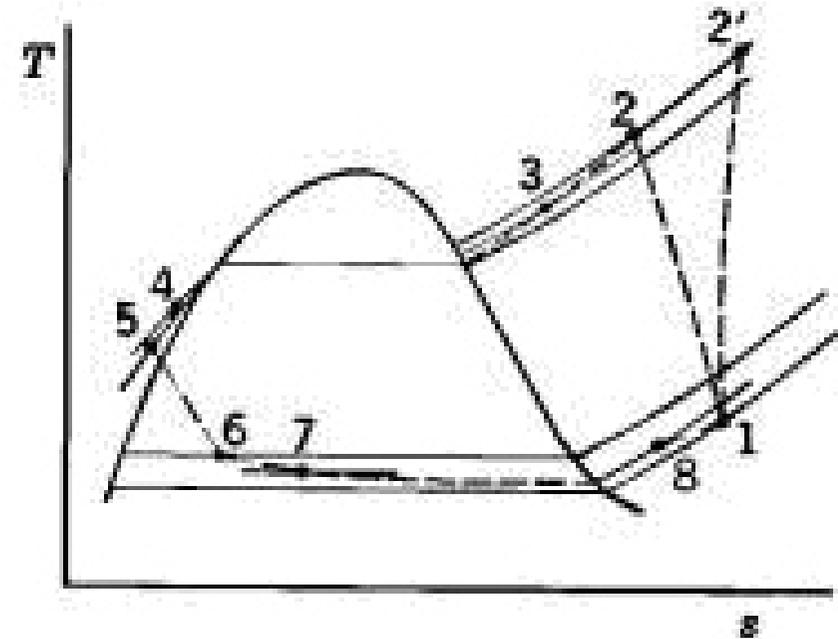
Massenstrom:  $\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s}$

**ges:**

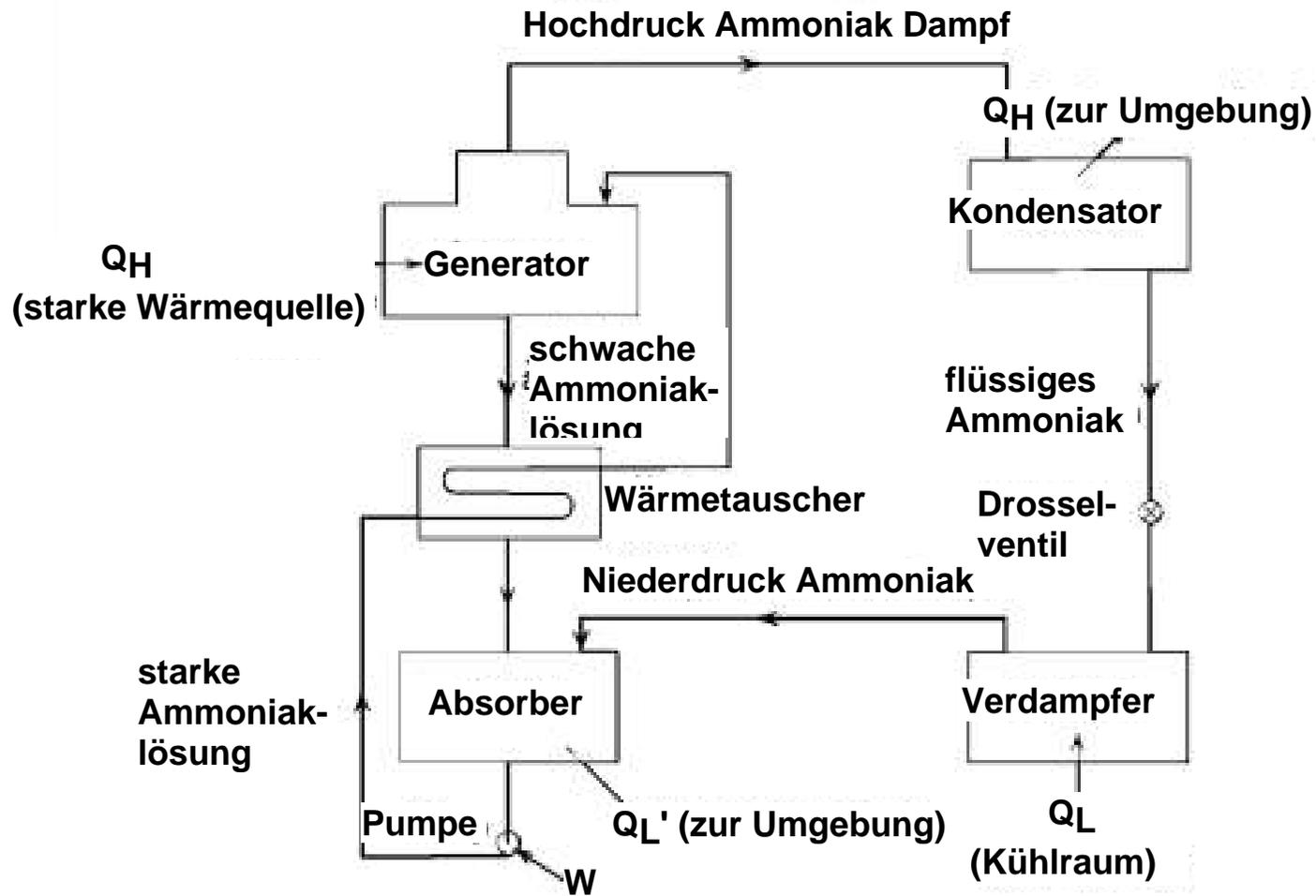
Kühlleistung  $Q_L$  und Leistungsziffer  $\varepsilon$

## Abweichung des realen Prozesses vom idealisierten Prozeß

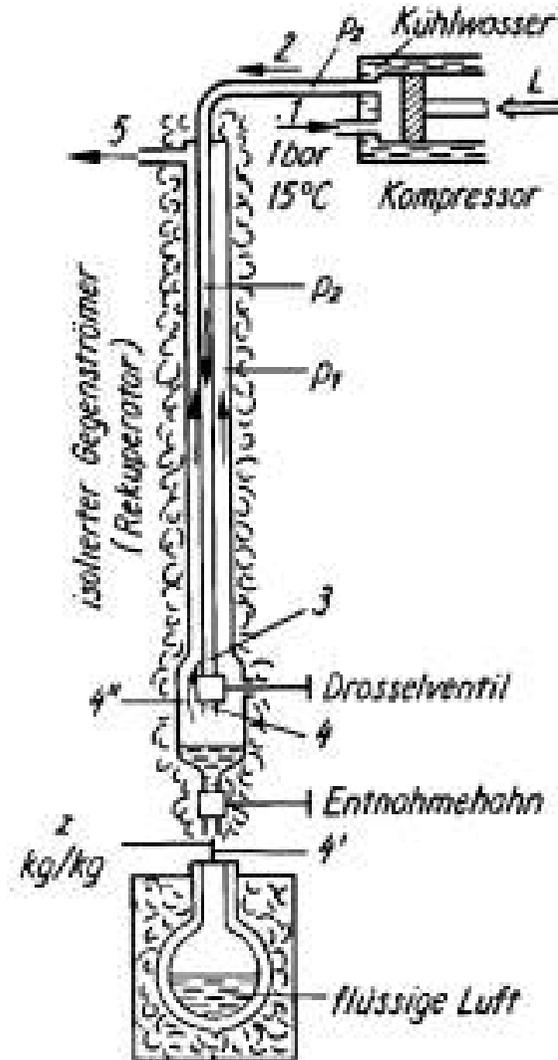
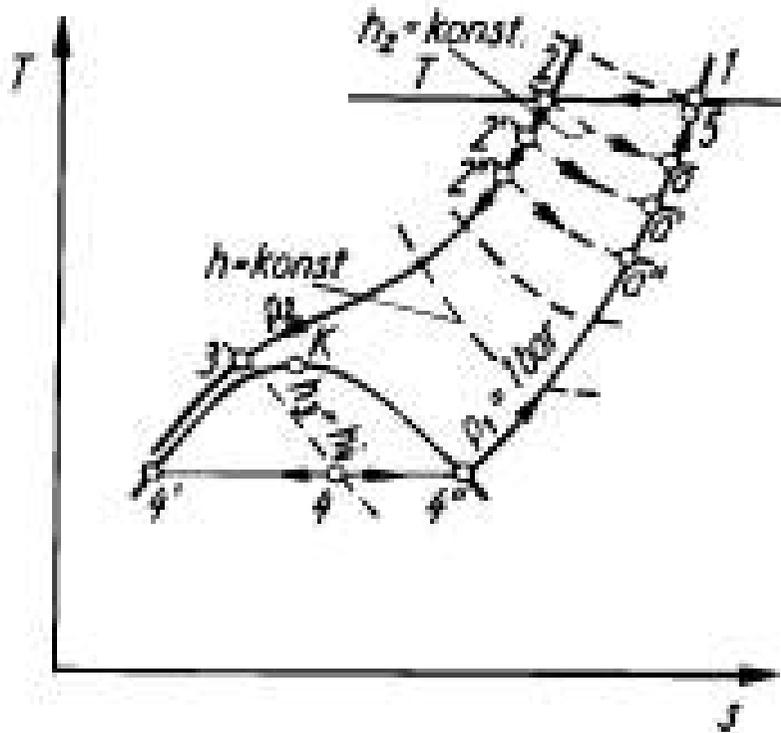
- Druckverluste und interne Wärmeübertragung
- Dampf befindet sich beim Eintritt in den Kompressor (1) bereits im überhitzten Zustand
- Isentrope Verdichtung ist nicht zu realisieren
  - ⇒ Entropie steigt oder sinkt in Abhängigkeit  $Q_0$
  - ⇒ Punkt 2' (Wärmezufuhr) oder Punkt 2 (Wärmeabfuhr)
- Isobare Kondensation ist nur sehr schwer zu realisieren
  - ⇒ Druck ist nach der Kondensation geringer als im überhitzten Zustand
  - ⇒ Temperatur liegt unter der Sättigungstemperatur (4), sinkt in der Leitung zum Drosselventil noch weiter ab (5)
- Druckverlust im Verdampfer, Temperaturanstieg in der Leitung zum Kompressor



### 12.3 Absorptionsverfahren

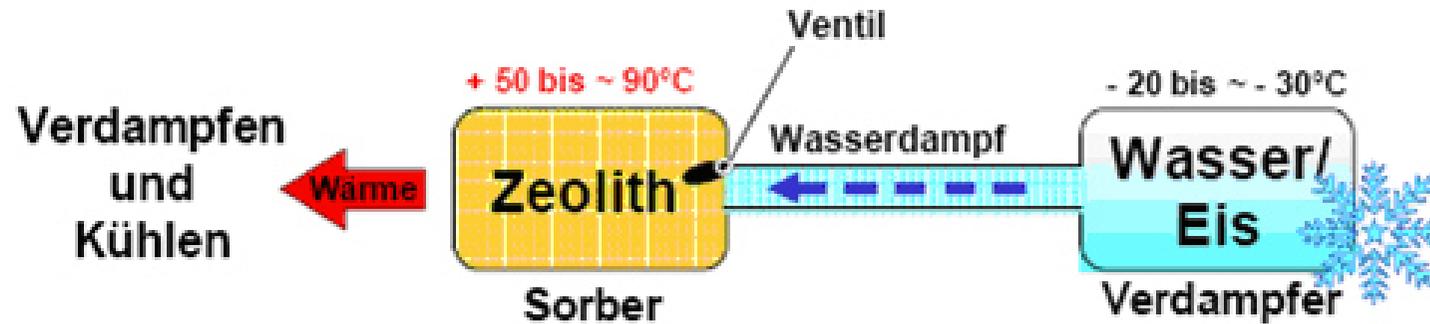


### 12.4 Luftverflüssigung (Lindeverfahren)



## 12.5 Zeolith/Wasser-Vakuumadsorption (Fa. Cool-System, Fürth)

**Adsorption:** Anlagerung von Gasen oder Dämpfen an der Oberfläche fester Körper



**Anwendungsbeispiel für Zeolith/Wasser-Vakuumadsorption (Fa. Cool-System, Fürth)**

