

Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Peter Hakenesch

peter.hakenesch@hm.edu

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

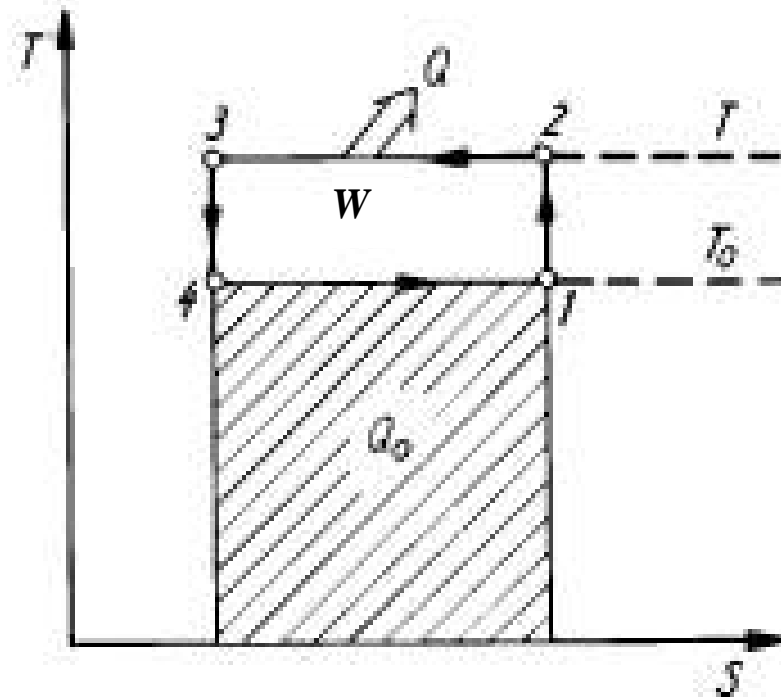
12.1 Allgemeiner Kältemaschinenprozeß

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)

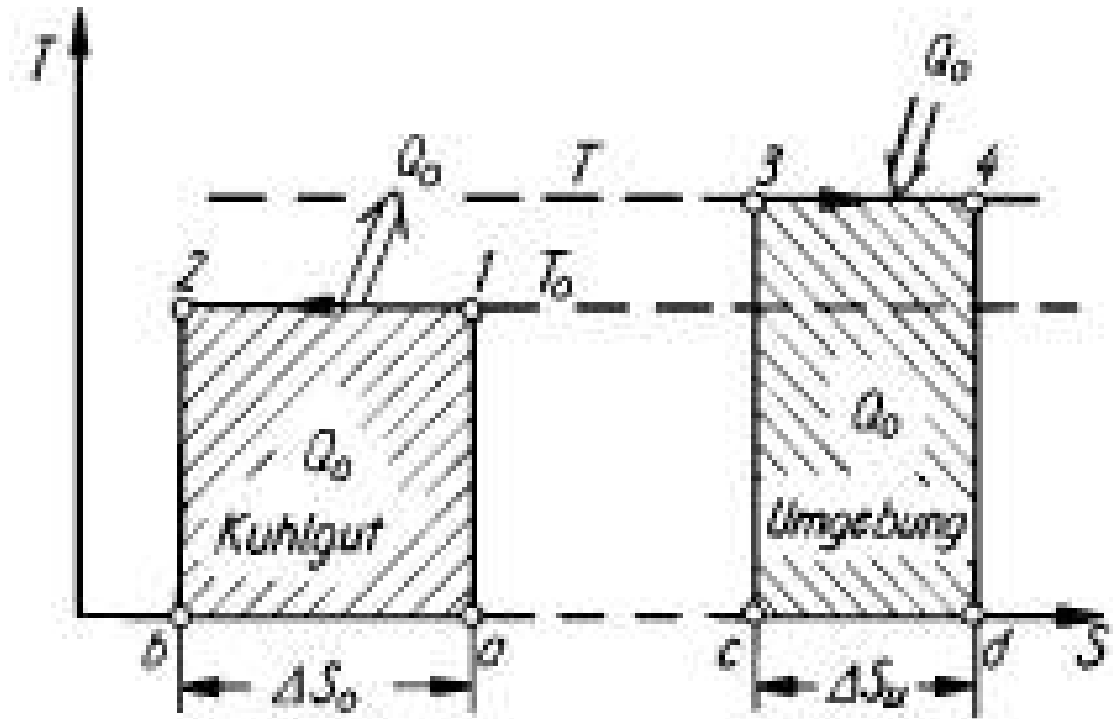
Entropieänderungen

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

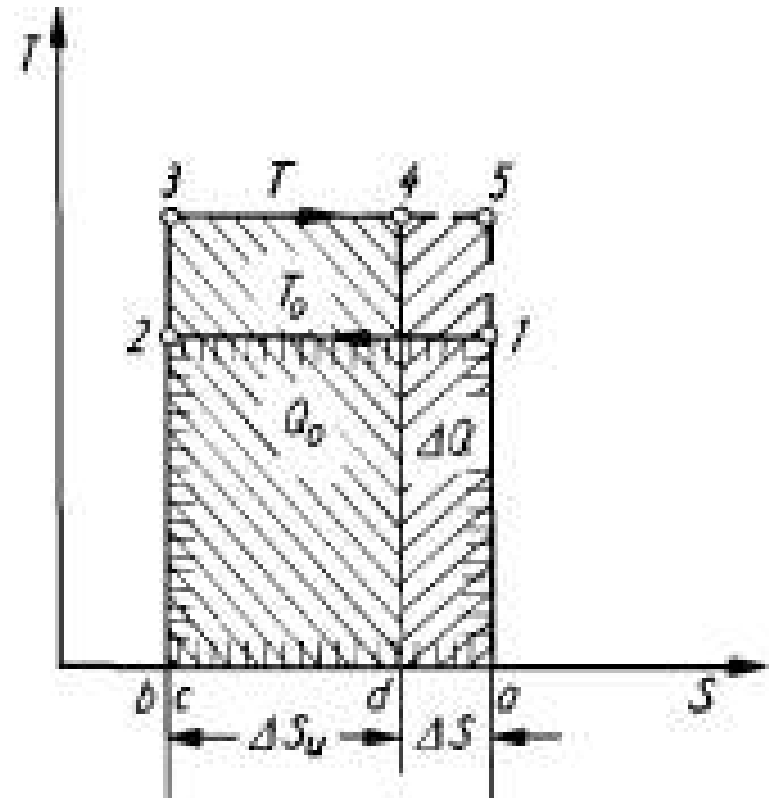
Wärme kann nicht von selbst von einem niedrigeren Niveau auf ein höheres Niveau übergehen

⇒ Technische Realisierung einer Kältemaschine erfordert einen Zwischenprozeß zur Kompensation der Entropieverminderung ΔS

Forderung

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

Kompensationswärme ΔQ bei Kälteleistung Q_0



Erzeugung zusätzlicher Wärme ΔQ

Prinzipiell alle Maßnahmen zur Entropieerhöhung möglich

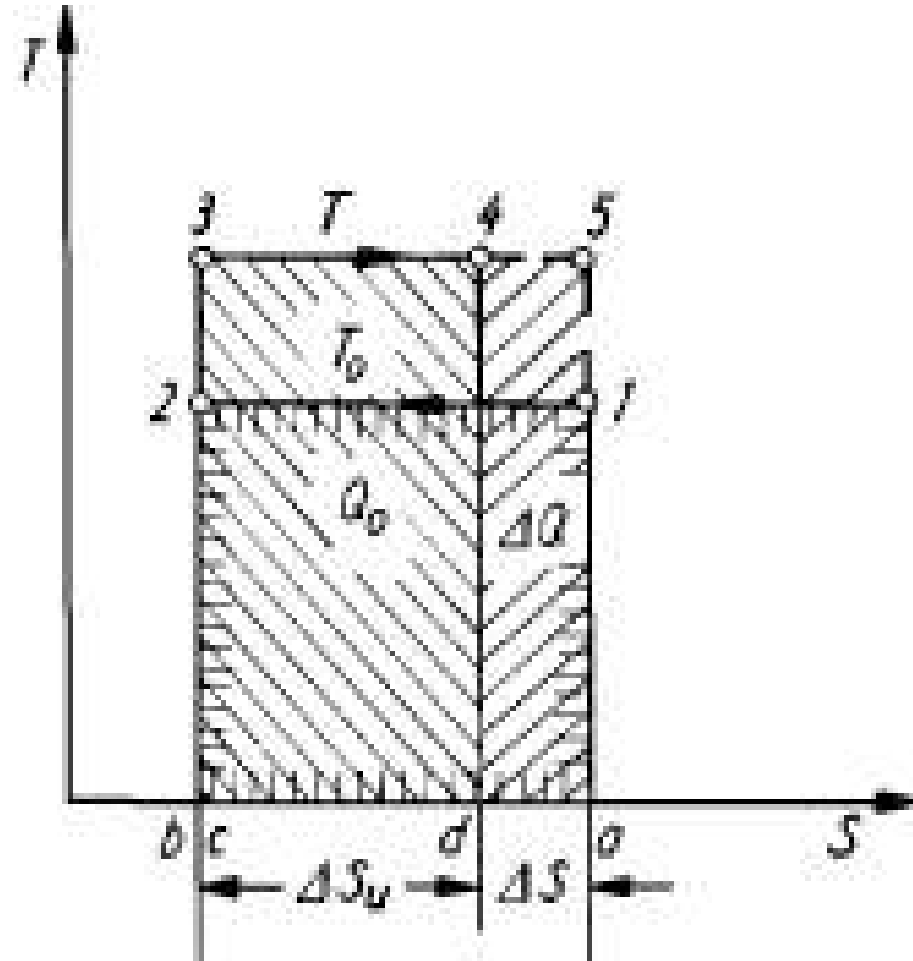
Technisch relevante Kältetechnik-Prozesse:

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

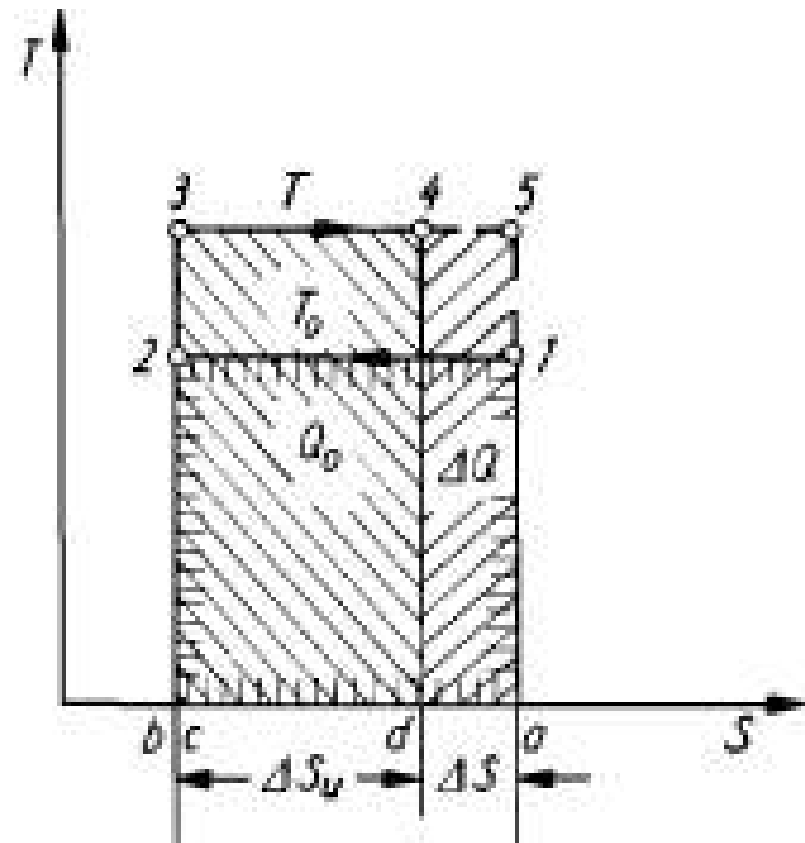
$$W = \Delta Q = T \cdot \Delta S$$



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 ε

Maß der für den Kühlprozeß aufgewendeten Arbeit

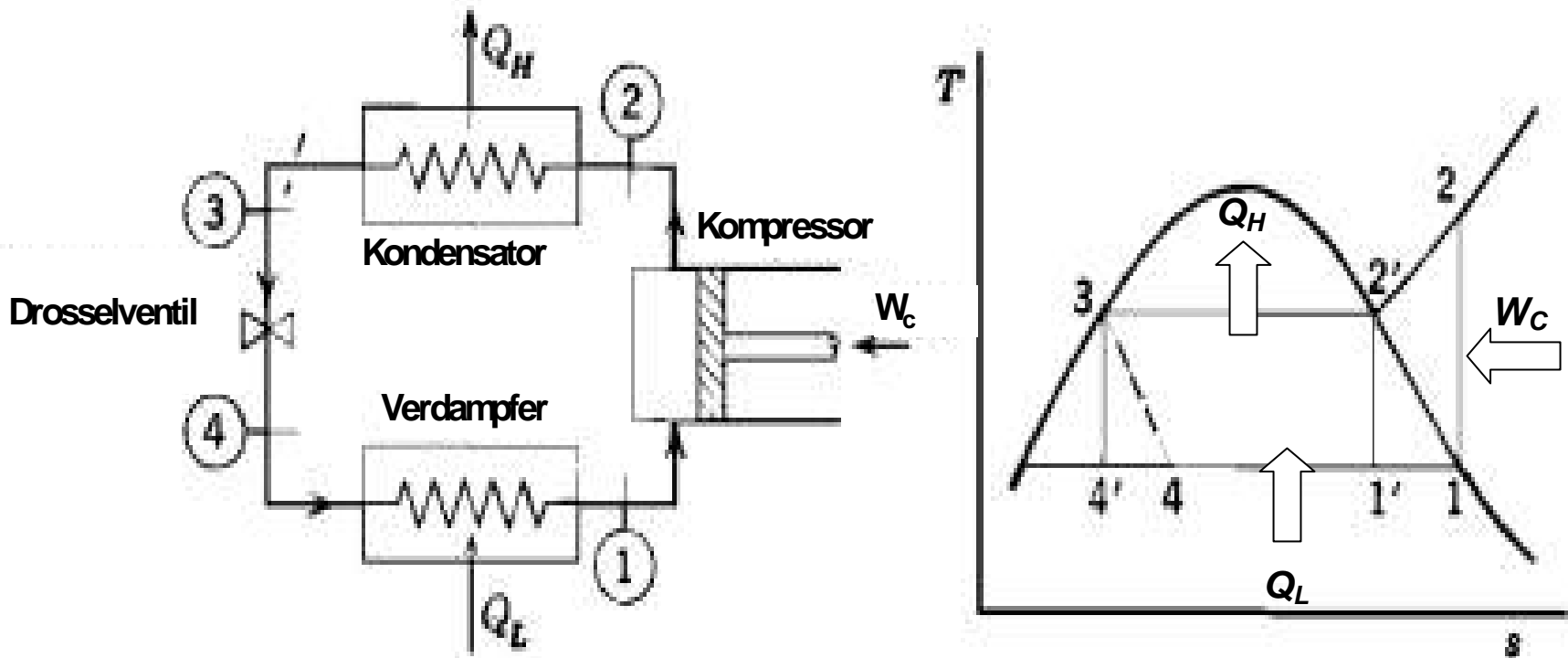
$$\varepsilon = \frac{\text{abgeführte Wärme } Q_0}{\text{zugeführte Arbeit } W}$$

Leistungsziffer des *Carnot-Prozesses*

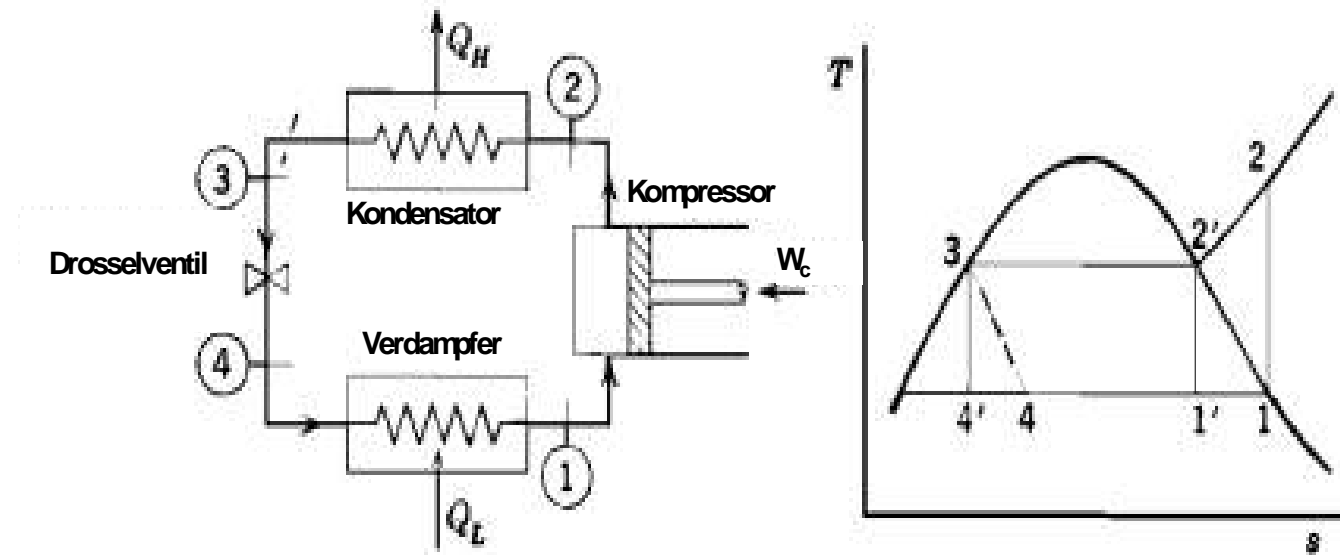
$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{T_0}{T - T_0}$$

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

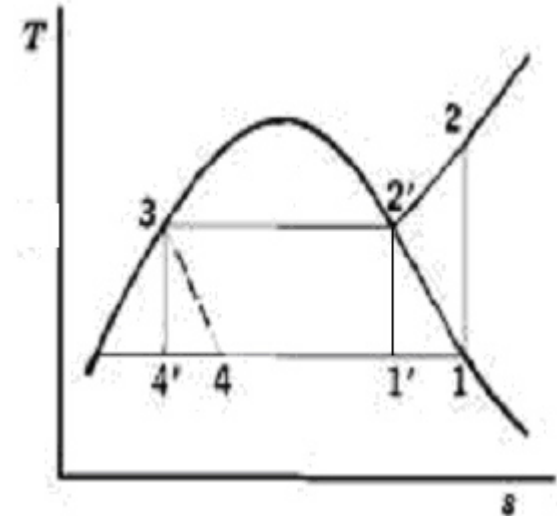
Massenstrom: $\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s}$

Stoffwerte für Freon-12 im Naßdampfgebiet

T_S [°C]	p_S [MPa]	ν' [m³/kg]	ν'' [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]	ν [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: $T_3 = +40^\circ\text{C}$

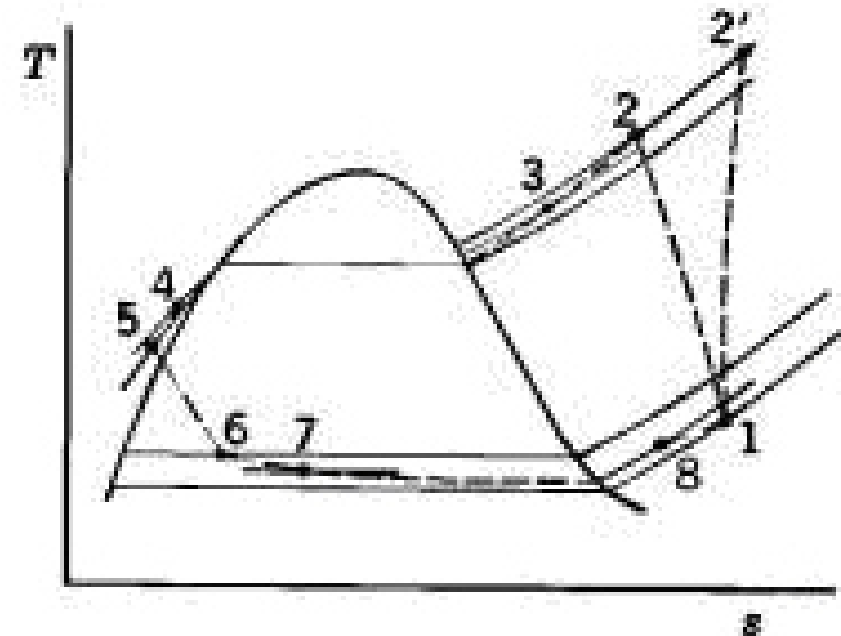
Massenstrom: $\dot{m} = 0.03 \text{ kg/s}$

ges:

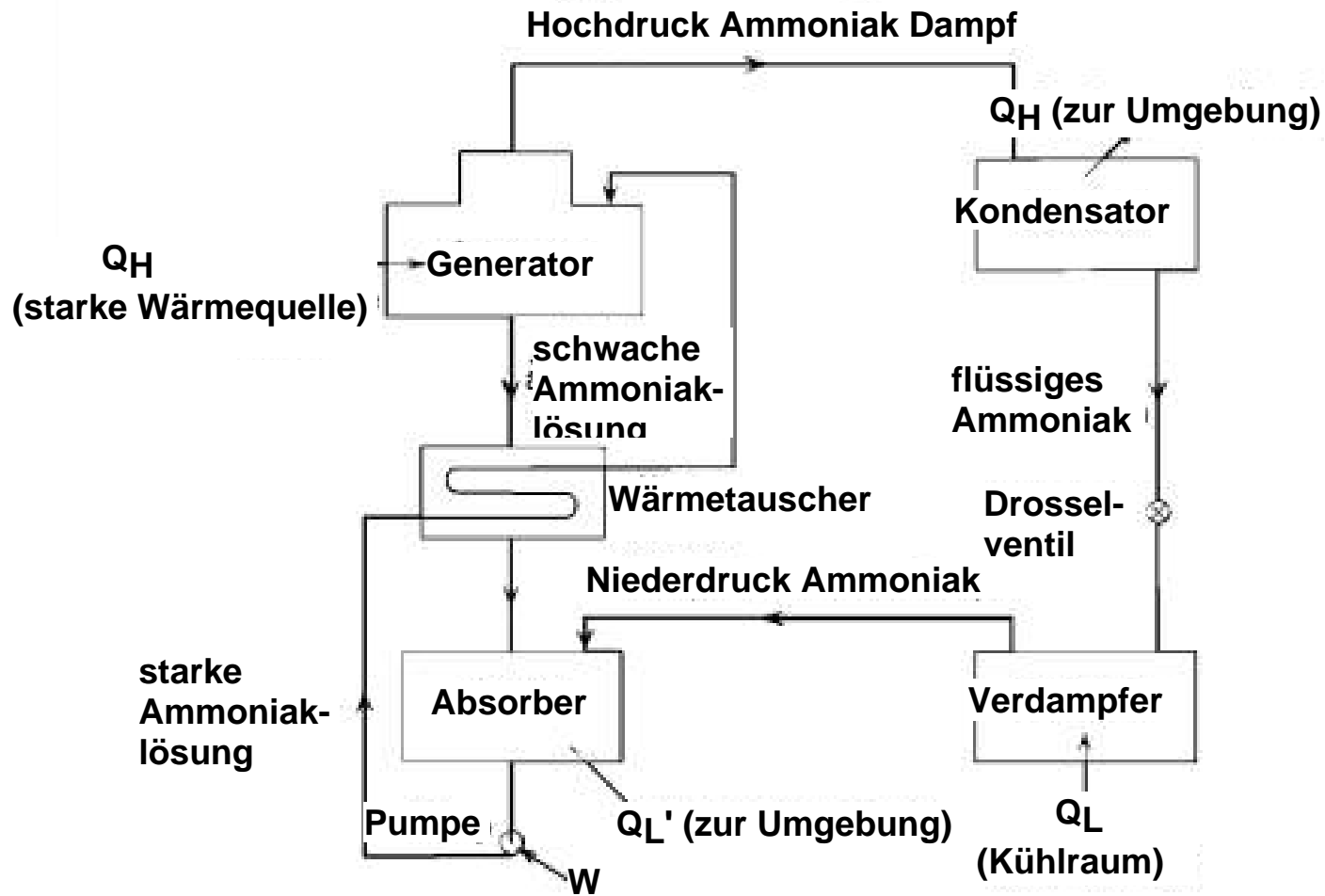
Kühlleistung Q_L und Leistungsziffer ε

Abweichung des realen Prozesses vom idealisierten Prozeß

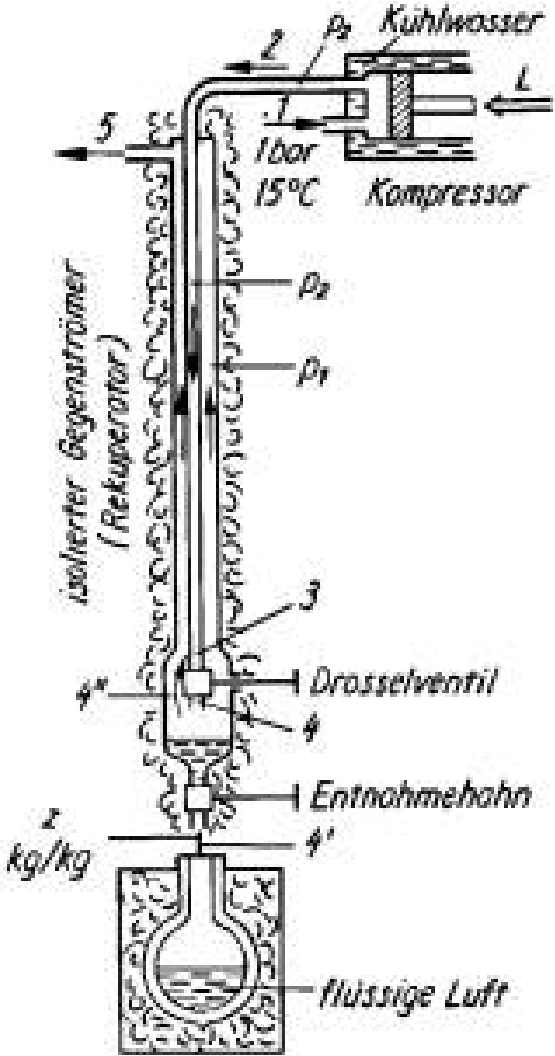
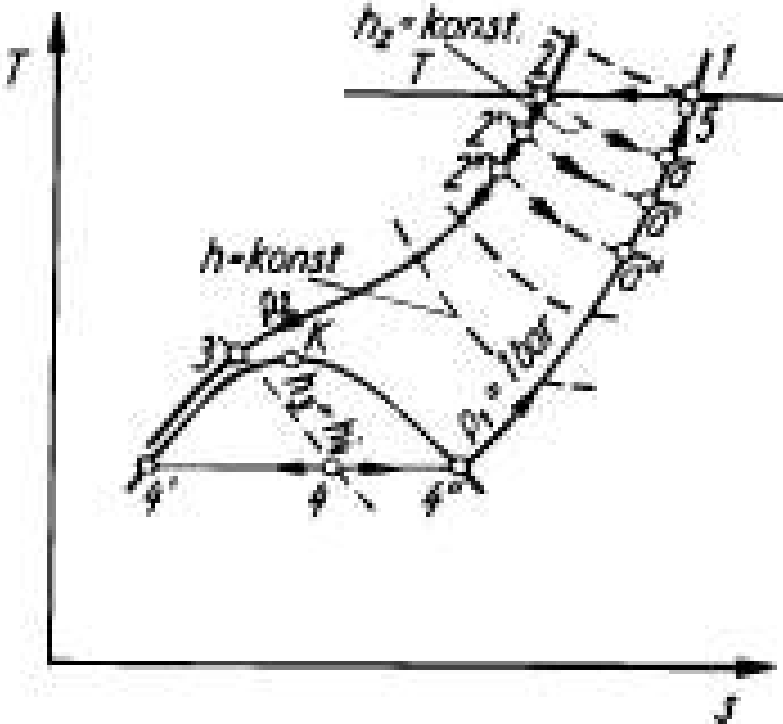
- Druckverluste und interne Wärmeübertragung
- Dampf befindet sich beim Eintritt in den Kompressor (1) bereits im überhitzten Zustand
- Isentrope Verdichtung ist nicht zu realisieren
 - ⇒ Entropie steigt oder sinkt in Abhängigkeit Q_0
 - Punkt 2' (Wärmezufuhr) oder Punkt 2 (Wärmeabfuhr)
- Isobare Kondensation 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

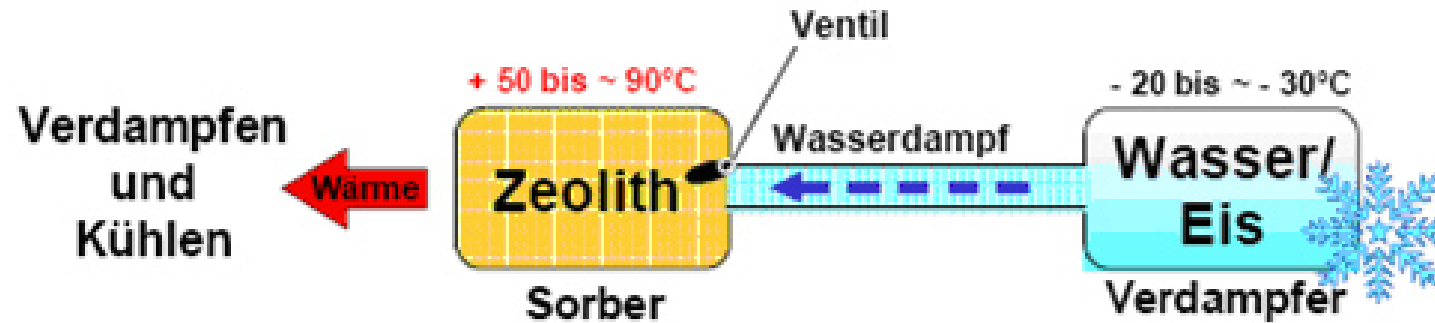


12.4 Luftverflüssigung (Lindeverfahren)



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)

