



# Thermodynamik III

## Kältemaschinen und Wärmepumpen

HS 2021

Prof. Reza S. Abhari



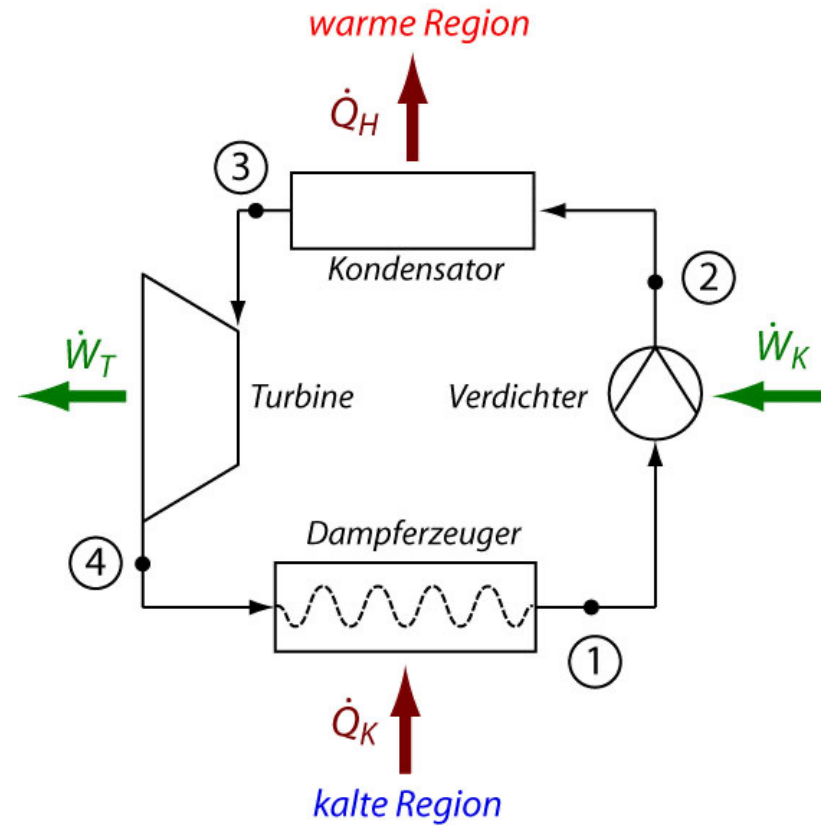
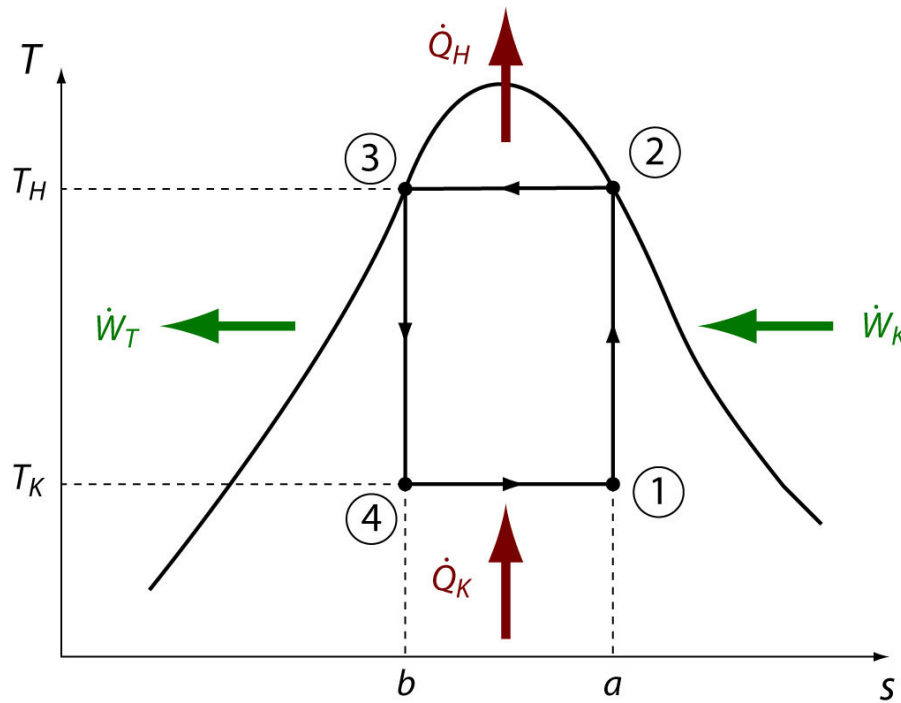
# Overview

Vorlesung		Übung/Beispiel	
Datum	Thema	Datum	Thema
09.11	Prozess des Energieaustausches	09.11	Geschwindigkeitsdreiecke
16.11	Dampfkraftprozesse	16.11	Rankine Zyklus
23.11	Gasarbeitsprozesse - Verbrennungsmotoren	23.11	Diesel / Otto Zyklus
30.11	Gasarbeitsprozesse - Gasturbinenprozesse	30.11	Brayton Zyklus
07.12	Gasarbeitsprozesse - Kombinierten Zyklen	07.12	Kombinierter Zyklus
14.12	Kältemaschinen und Wärmepumpen	14.12	Kältemaschine/Wärmepumpe
21.12	Kältemaschinen Oxyfuel, Carbon Capture and Storage	21.12	Wärmepumpe



## 5.1 Einleitung

- Zwei Haupttypen von Kältemaschinen und Wärmepumpen:
  - Kompressionskältemaschinen, Kompressionswärmepumpen
  - Absorptionskältemaschinen und Absorptionswärmepumpen
- Wichtig: Carnot-Prozess
- Umkehrung des Carnot-Wärmekraftprozesses ergibt den Carnot-Kältemaschinenprozess
- Kältemaschinenprozess ist linkslaufend





- Teilprozess 4  $\rightarrow$  1 : Verdampfung
  - Arbeitsmittel tritt im Nassdampfzustand 4 in den Verdampfer ein, nimmt Wärme vom kalten Reservoir auf, verdampft teilweise
  - Temperatur und Druck bleiben beim Verdampfungsprozess konstant
- Teilprozess 1  $\rightarrow$  2 : Kompression
  - Isentrope Kompression, bis zum Sättigungszustand 2 bei  $T_H$
- Teilprozess 2  $\rightarrow$  3 : Kondensation
  - Bei konstanter Temperatur und Druck gibt Arbeitsmittel im Kondensator Wärme ab, bis zur vollständigen Kondensation
- Teilprozess 3  $\rightarrow$  4 : Expansion
  - Isentrope Expansion bis Zustand 4

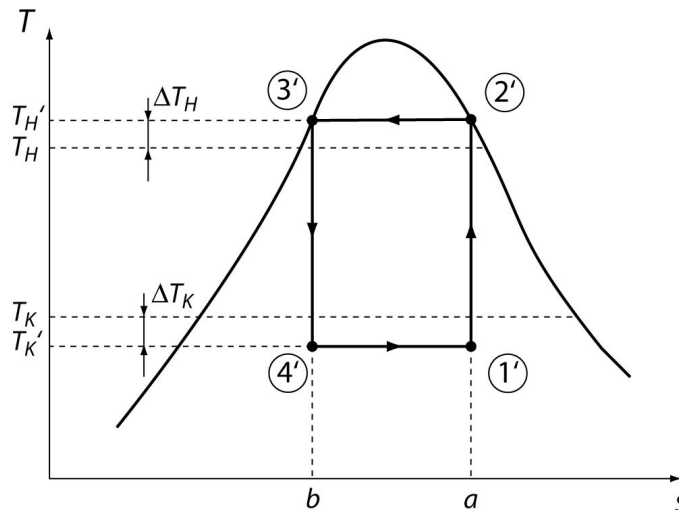


- Leistungsziffer:

$$\varepsilon_{k \max} = \frac{\frac{\dot{Q}_K}{\dot{m}}}{\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}}} = \frac{T_K (s_a - s_b)}{(T_H - T_K)(s_a - s_b)} = \frac{T_K}{(T_H - T_K)}$$

- Reale Prozesse:

- Temperaturdifferenzen in Verdampfer und Kondensator

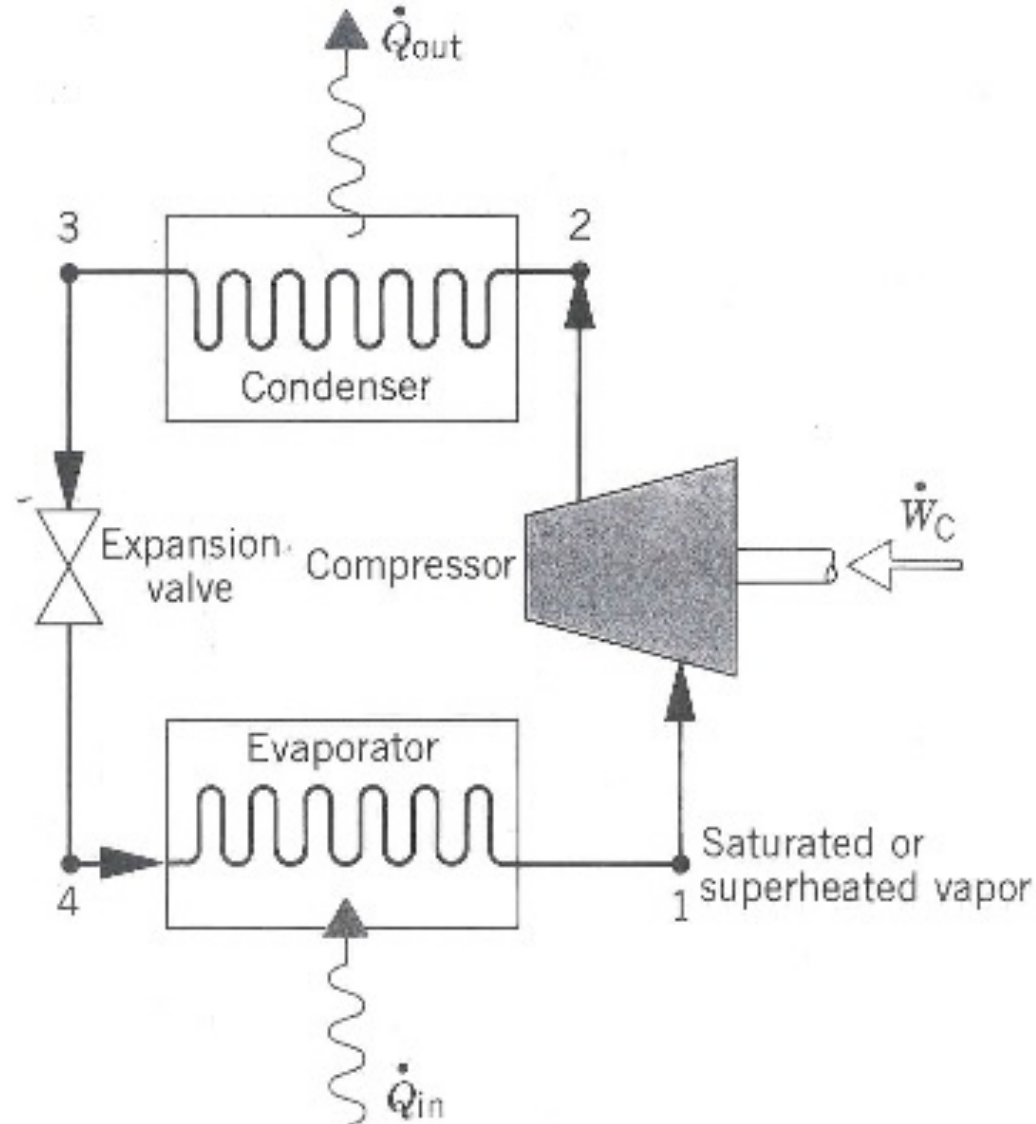


$$\varepsilon'_k = \frac{T'_K}{T'_H - T'_K}$$

- Verdichtung von Zweiphasenmischung nicht empfohlen, da Flüssigkeitstropfen den Kompressor beschädigen können
- Drossel anstelle von Turbine, da Turbinenarbeit sehr klein

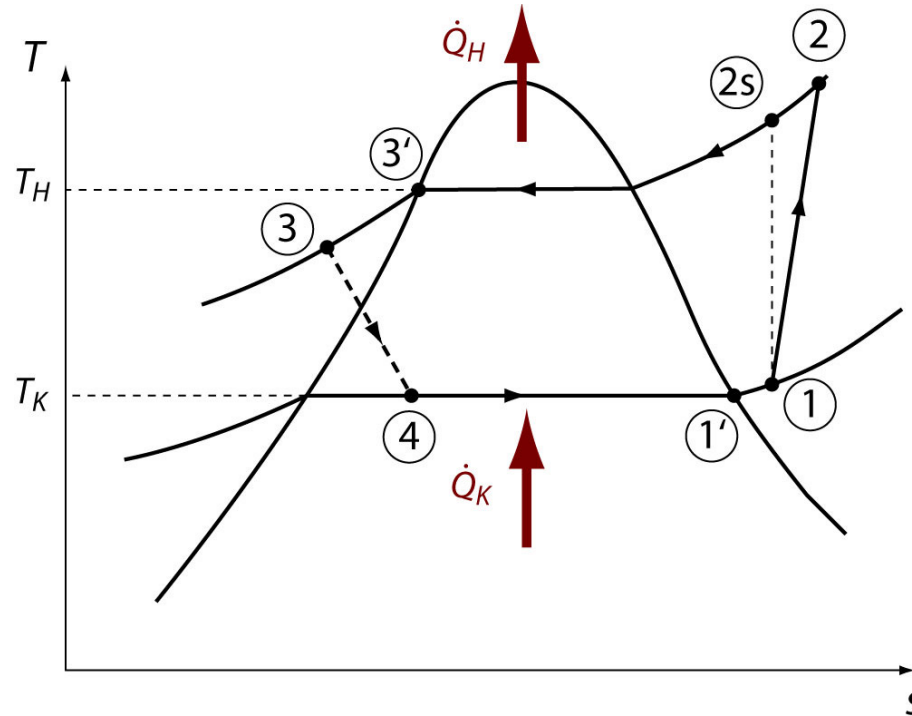


## 5.2 Kaltdampf-Kompressionskältemaschine





## – Gebräuchlichste Kältemaschinen



### – Verdampfung 4 → 1:

- Arbeitsmittel nimmt Wärme aus dem kalten Reservoir auf und verdampft. Kompression kann vollständig im Überhitzungsgebiet stattfinden. Zustand 1 ist meist überhitzt

$$\frac{\dot{Q}_K}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$





– Kompression 1 → 2

- adiabat irreversible Kompression bis zum Druck  $p_2$

$$\frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

- isentroper Wirkungsgrad des Kompressors:

$$\eta_{Ks} = \frac{(\dot{W}_K / \dot{m})_S}{\dot{W}_K / \dot{m}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

– Kondensation 2 → 3

- Wärmeabfuhr an das warme Reservoir, normalerweise die Umgebung.  
Zustand 3 meist unterkühlt:  $T_3 < T_{3'}$

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$



- Expansion 3  $\rightarrow$  4
  - Im Drosselventil dehnt sich das Kühlmittel bis zum Verdampfungsdruck aus, wobei

$$h_3 = h_4$$

- Zustand 4 liegt im Nassdampfgebiet
- Leistungsziffer:

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_K / \dot{m}}{\dot{W}_K / \dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

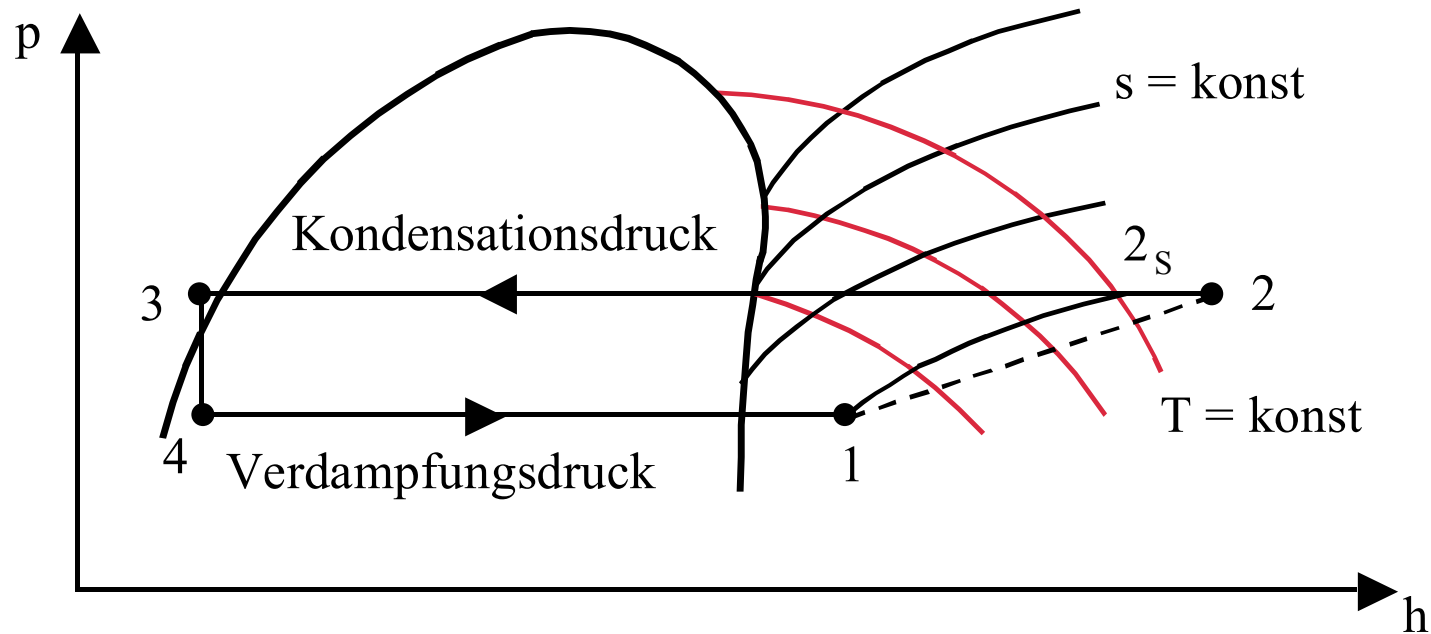


## 5.3 Kühlmittel

- Häufigste Kühlmittel: Halogen-Kohlen-Wasserstoffe
  - z.B. Freon 12 oder Dichlor-Difluormethan
  - zerstören Ozonschicht, werden daher heute nicht mehr eingesetzt
- Halogen-freie Kühlmittel:
  - Freon-13a ( $\text{CF}_2\text{CFCF}_3$ , Tetrafluoräthan)
  - Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )
- Hohe Drücke im Kondensator und sehr tiefe Drücke im Verdampfer unerwünscht
- Chemische Stabilität, Giftigkeit, Umweltverträglichkeit, korrosive Eigenschaften, Beschaffungskosten



## – p-h-Diagramm

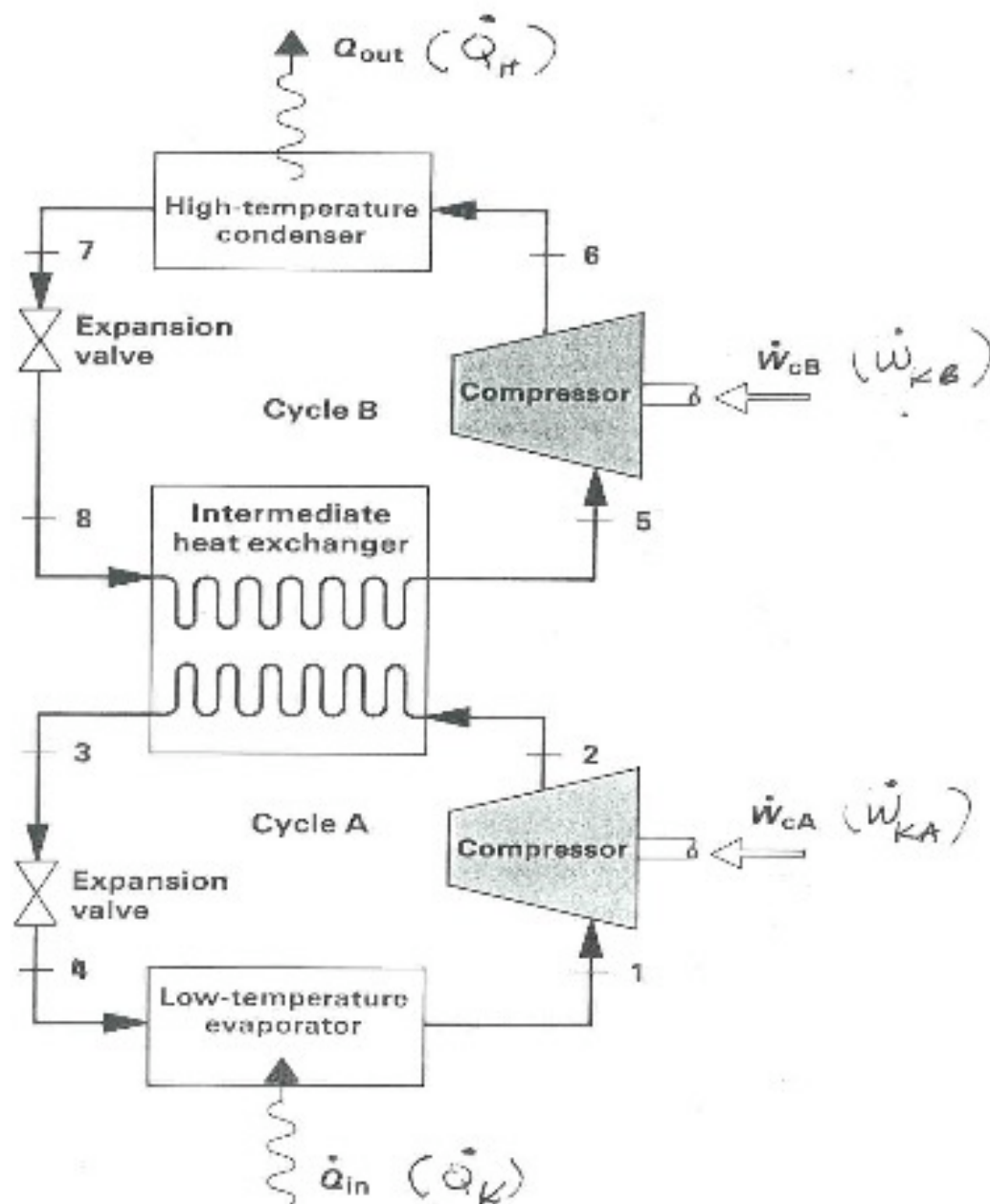




## 5.4 Mehrstufige Kältemaschinen

- Für sehr tiefe Temperaturen ist ein hohes Druckverhältnis  $p_{\text{Kondens}}/p_{\text{Verdampf}}$  nötig, das wiederum Exergieverluste vergrößert
- Deshalb: Zwei- oder mehrstufiger Betrieb
- Zweistufiger Betrieb durch Hintereinanderschaltung von zwei Prozessen
- Kopplung der beiden Prozesse durch Zwischen-Wärmetauscher
- Leistungsziffer:

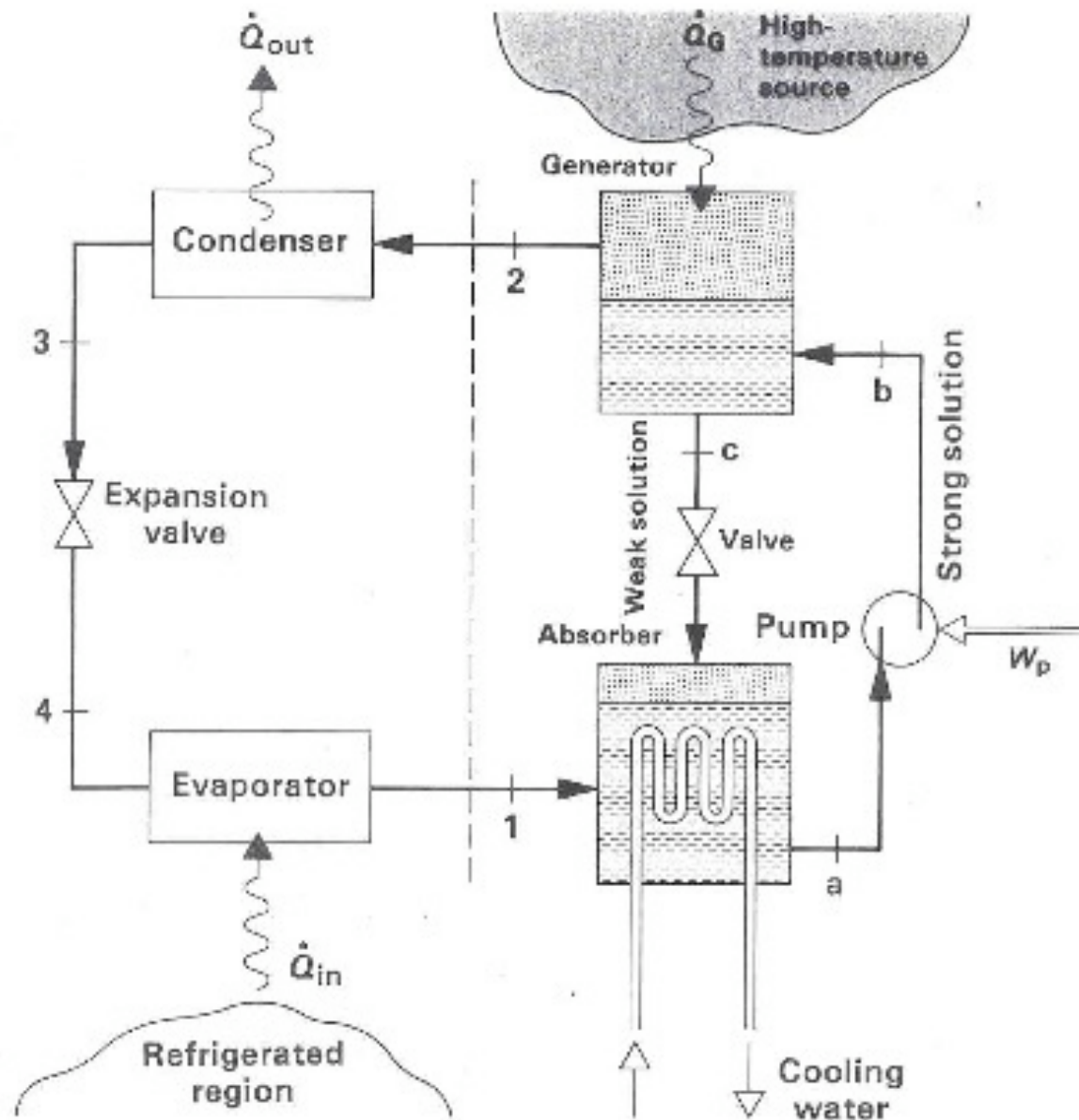
$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_{KA} + \dot{W}_{KB}}$$





## 5.5 Absorptions - Kältemaschine

- Kühlmittel und Absorptionsmittel werden im Absorber gemischt
- Flüssige Mischung wird auf höheren Druck gepumpt, was weniger Arbeit benötigt
- Durch eine Wärmequelle werden Kühlmittel und Absorptionsmittel wieder getrennt
- Reines Kühlmittel tritt in den Kondensator ein
- Absorptions-Systeme:
  - Ammoniak/Wasser
  - Wasser/Lithium-Bromid



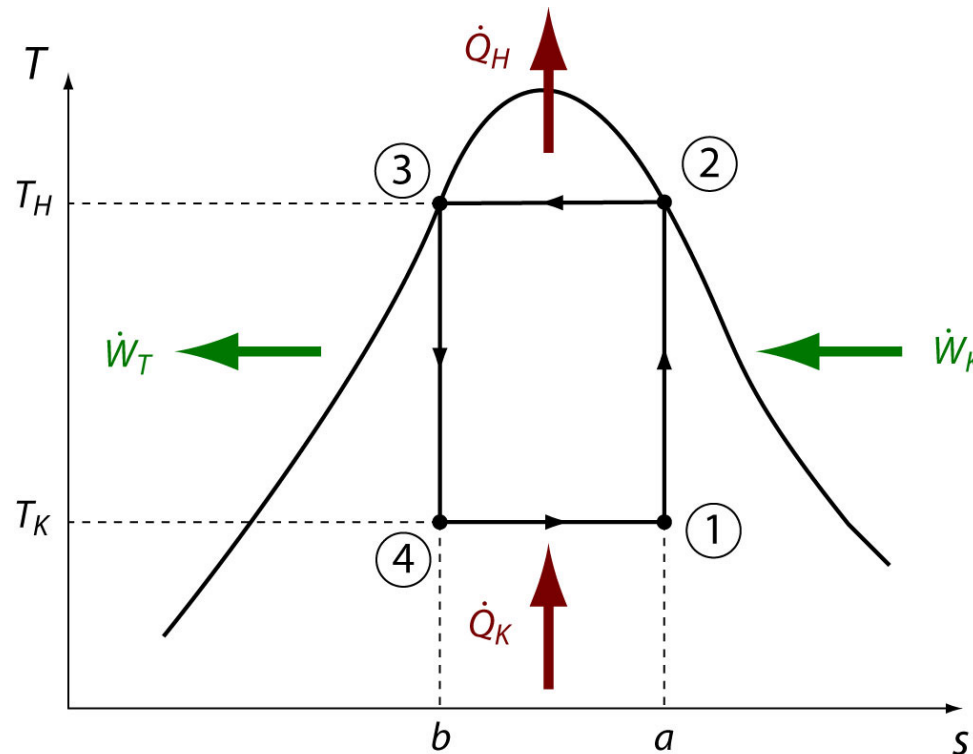




## 5.6 Wärmepumpen

- Für Heizung oder industrielle Prozesse
- Im linkslaufenden Carnot-Prozess wird  $\dot{Q}_H$  betrachtet

- Leistungsziffer: 
$$\varepsilon_{WP\max} = \frac{\dot{Q}_H / \dot{m}}{(\dot{W}_K - \dot{W}_T) / \dot{m}} = \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

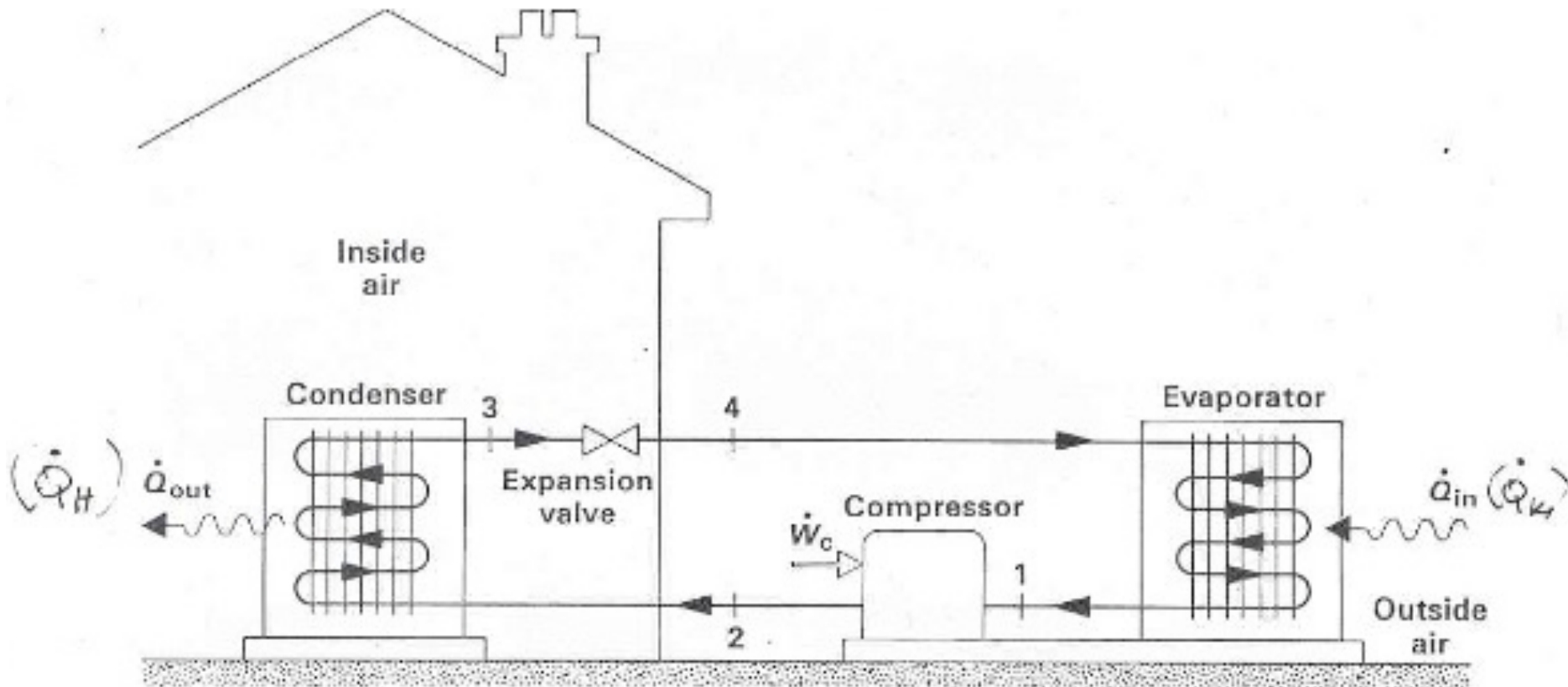




- Luftwärmepumpen: Umgebungsluft als Wärmequelle
- Zusatzheizung bei tiefen Temperaturen ( $0^{\circ}\text{C}$ )
- Oder: Grundwasser als Wärmequelle, da diese Temperatur auch im Winter relativ konstant ist
- Dampf-Kompressionswärmepumpe
  - bestehend aus: Kompressor, Kondensator, Drossel, Verdampfer
  - Wärmequellen: Umgebungsluft, Wasser aus Seen und Flüssen, Erdwärme, Sonnenkollektoren, Abwärme von anderen Prozessen

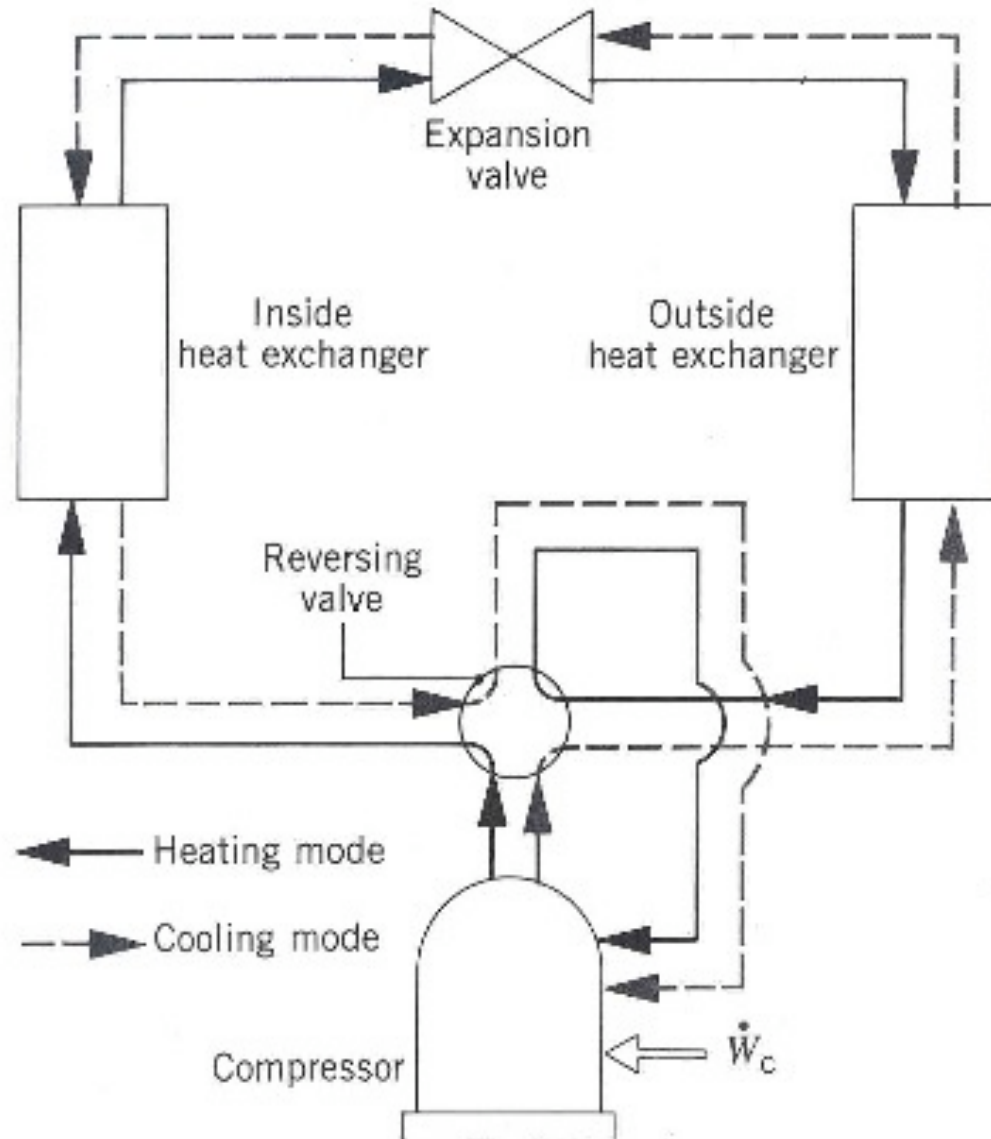


– Leistungsziffer: 
$$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_H / \dot{m}}{\dot{W}_K / \dot{m}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} > 1$$





## – Luft-Wärmepumpe





- Arbeiten im Heizungs- und Kühlmodus durch Umschaltventil
- Heizungsmodus: innerer Wärmetauscher arbeitet als Kondensator, äusserer als Verdampfer
- Kühlungsmodus: innerer Wärmetauscher arbeitet als Verdampfer, äusserer als Kondensator