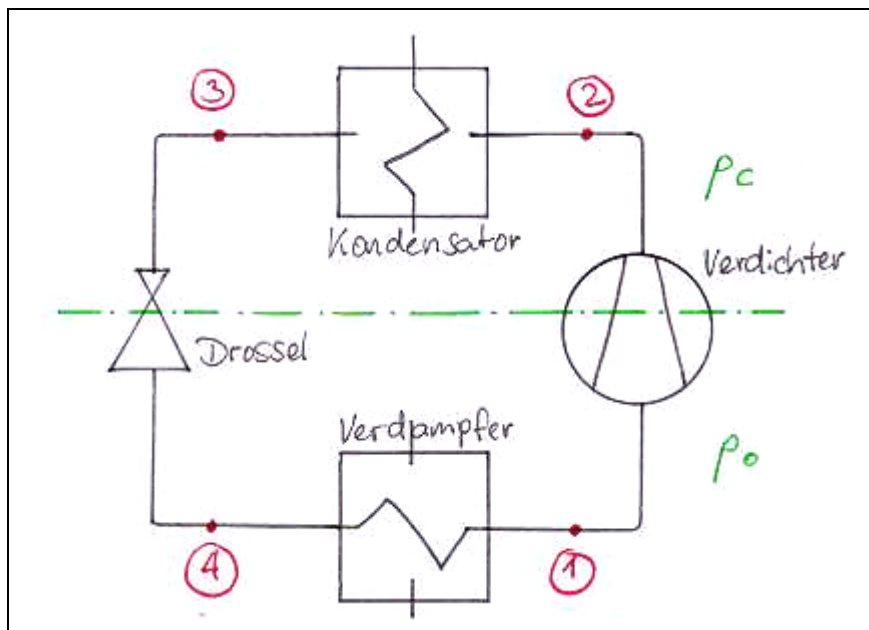


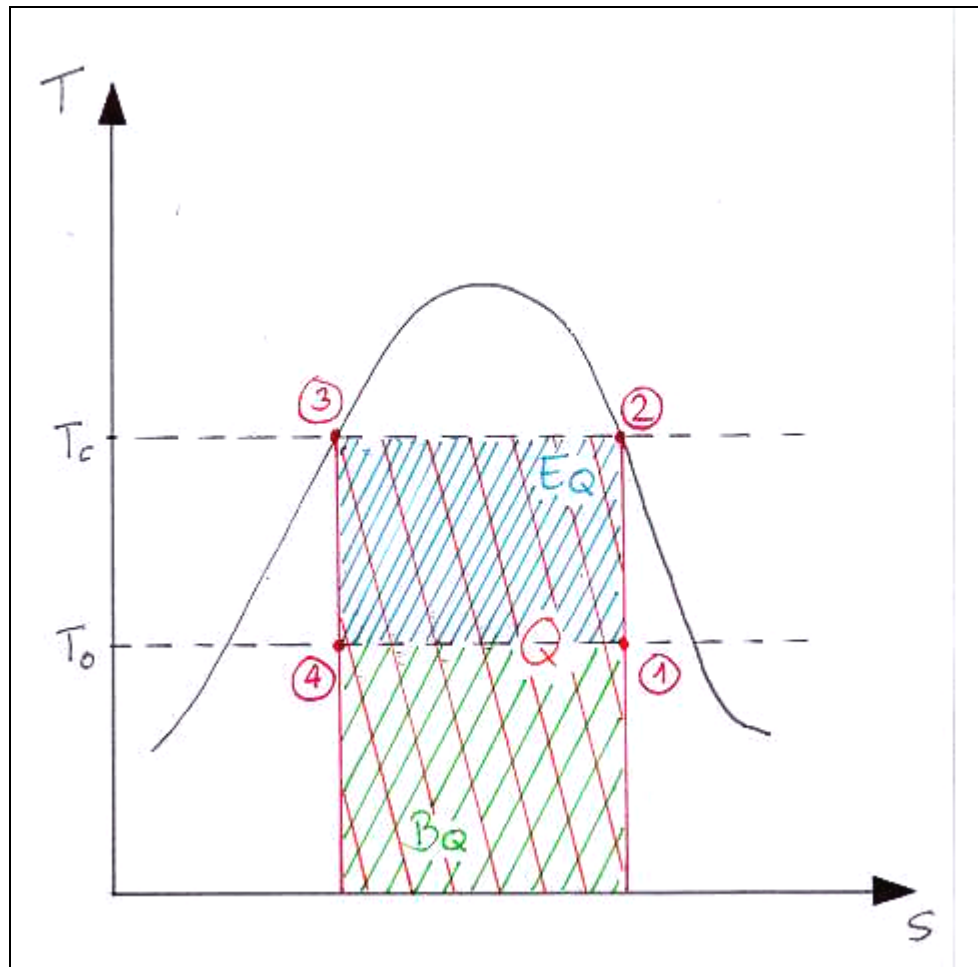
## Wärmepumpen

- Wärmequellen (heutige Verbreitung)
  - Luft (10%)
  - Erdreich (80%)
  - Grundwasser (10%)
- Nutzung der Erdwärme:
  - flächig verlegte Rohrschlangen in ca. 1m Tiefe
  - heute auch Tiefenbohrungen mit Erdspeissen bis ca. 60...80m
- Thermodynamische Grundlagen (einfaches Anlagenschema):



- am Verdampfer:
  - Kältemittelverdampfungstemperatur  $T_0$  muß unter der der Wärmequelle liegen, z.B. unter  $10^\circ\text{C}$  bei Grundwasser;  $p_0$  richtet sich nach  $T_0$
- am Kondensator
  - Kältemittelkondensationstemperatur  $T_c$  muß über gewünschter Heizwassertemperatur liegen, z.B. über  $40^\circ\text{C}$  bei 40/30-FB-Heizung;  $p_c$  richtet sich nach  $T_c$

- Kreisprozess idealisiert im T,s-Diagramm ( $T_0 \approx T_{\text{amb}}$ )



- Exergie:  $E_Q = \Delta S \cdot (T_c - T_0)$  zugeführt im Kompressor
- Anergie:  $B_Q = \Delta S \cdot (T_0 - 0K)$  aus dem Erdreich entnommen
- Wärme:  $Q = E_Q + B_Q$  Nutzen
- Carnot-Leistungsziffer für den idealisierten Prozess (Verhältnis von Leistungen)

$$\epsilon_c = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ab}}}{P_{\text{el}}} = \frac{\Delta S \cdot T_c}{\Delta S \cdot (T_c - T_0)} = \frac{T_c}{T_c - T_0}$$

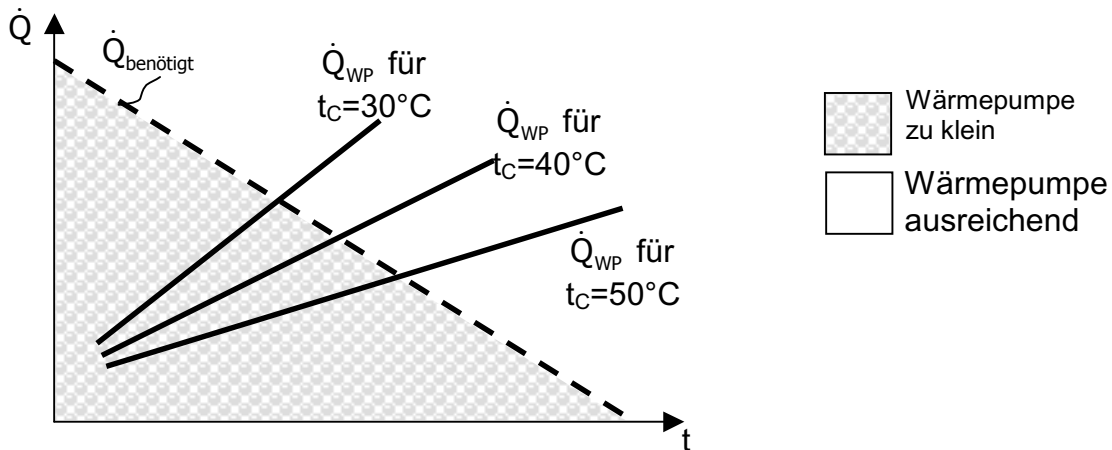
- exergetischer Gütegrad zur Bewertung des realen Prozesses

$$\zeta = 0,2 \dots 0,5 \dots 0,7$$

- Leistungsziffer für den realen Prozess (Verhältnis von Leistungen)

$$\epsilon_{\text{real}} = \epsilon_c \cdot \zeta$$

- wann wird  $\epsilon_{\text{real}}$  hoch?  
 $T_C$  niedrig – Niedrigenergiehaus, Fußboden-Heizung  
 $T_C - T_0$  niedrig – höhere Temperatur des Wärmespendermediums (Winter -> Übergangsjahreszeit -> Sommer); günstig z.B. Tiefenbohrungen mit konstanter Temperatur um 12°C als schwankende Lufttemperaturen
- Wie erfüllt die Wärmepumpe Anforderungen des Gebäudes?



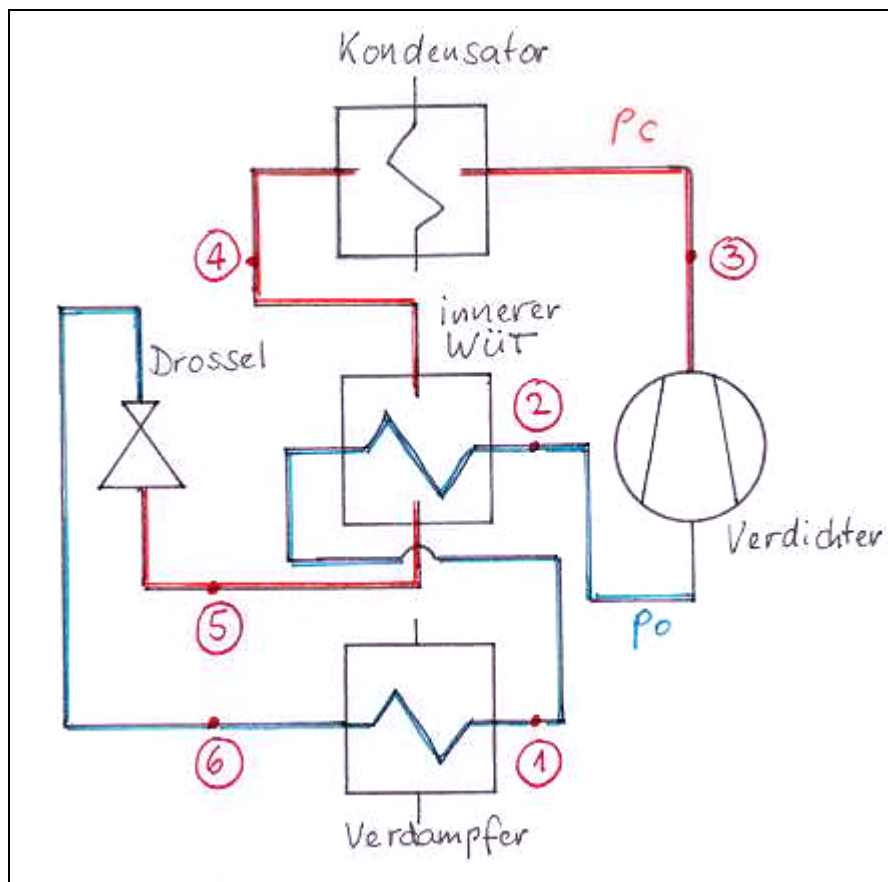
Bereich „Wärmepumpe zu klein“ – zusätzlicher WE nötig  
 Bereich „Wärmepumpe ausreichend“ – Pumpe taktet

Gegenläufige Verhältnisse bei Bedarf und Bedarfsdeckung: zum Winter hin wird eine höhere Vorlauftemperatur für die Heizung gebraucht, gerade dann sinkt die Leistung der WP durch geringere Außentemperaturen

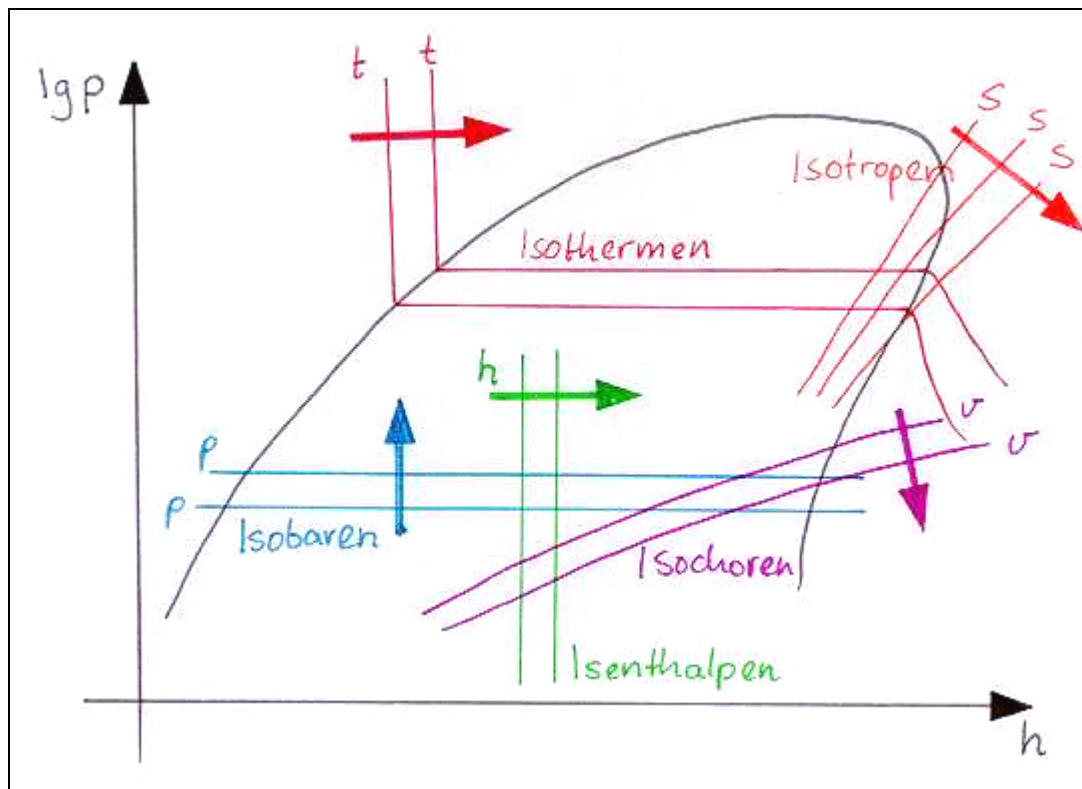
- Arbeitszahl für den realen Prozess (Verhältnis von Energien)

$$\beta = \frac{Q_{\text{ab}}}{P_{\text{el}}}$$

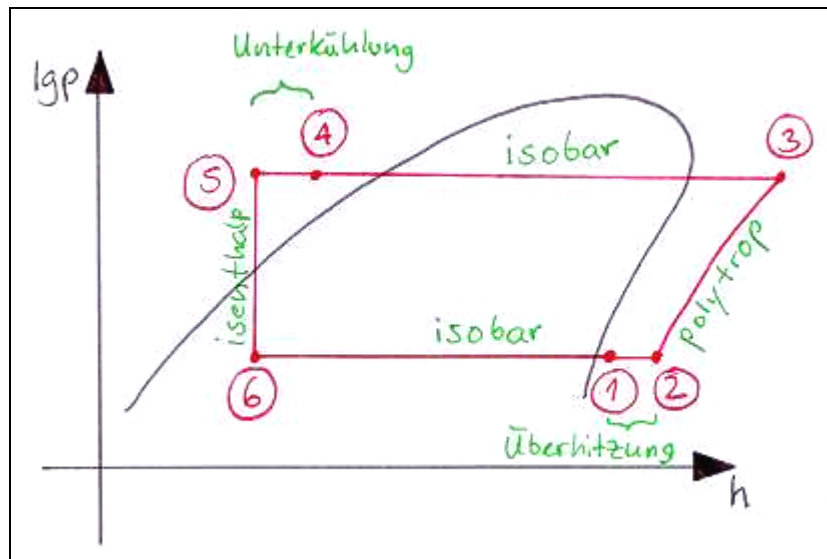
- Anlagenschema mit innerem Wärmeübertrager:



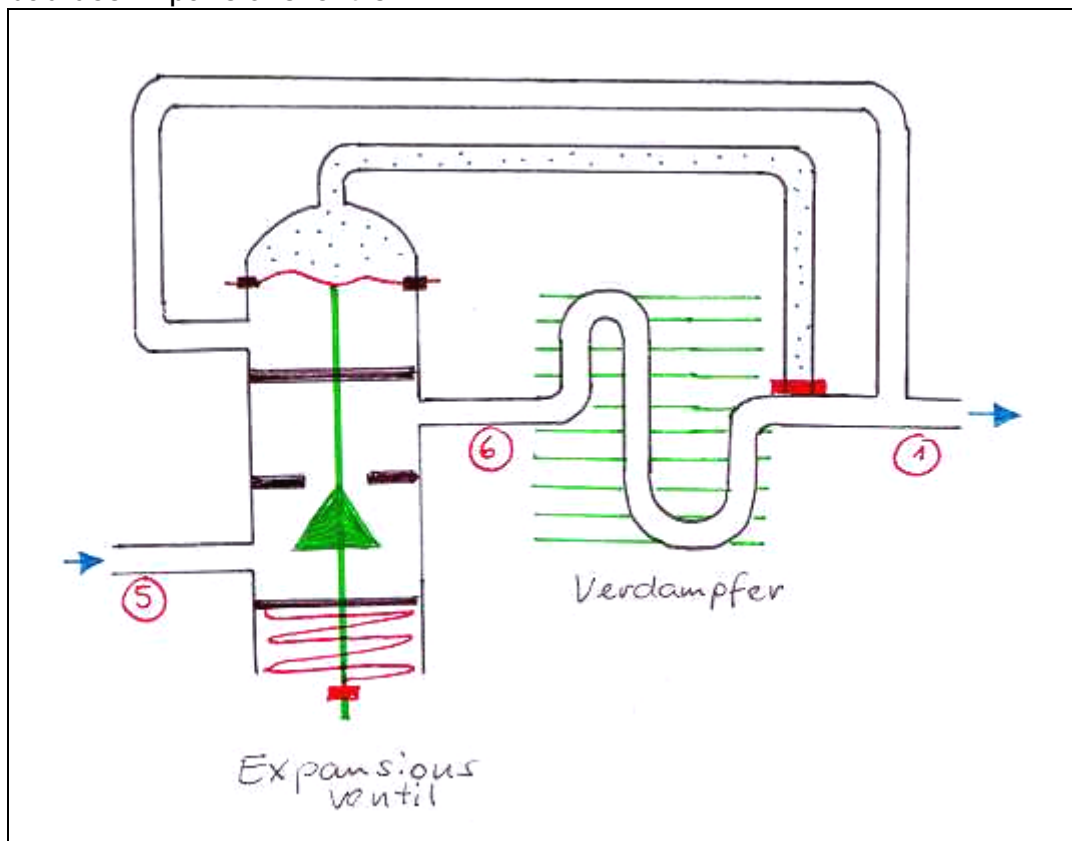
- Linien im  $\lg p, h$ -Diagramm:



- Prozess im lgp,h-Diagramm (Labor):



- Aufbau des Expansionsventils:



## Beispiel: Vergleich Wärmepumpe und Gas-Brennwertkessel

- a) Eine Außenluftwärmepumpe soll bei 3°C Außenlufttemperatur eine Wasservorlauftemperatur von 35°C erzeugen. Temperaturdifferenz in den Wärmeübertragern sei im Mittel 5K. Exergetischer Gütegrad der Anlage für diesen Fall sei 0,5. Gesucht ist die reale Leistungsziffer.

$$T_C = t_{\text{Vorlauf,Heizung}} + \Delta t_{\text{WÜT}} = 35^\circ\text{C} + 5\text{K} = 40^\circ\text{C}$$

$$T_O = t_{\text{Außenluft}} - \Delta t_{\text{WÜT}} = 3^\circ\text{C} - 5\text{K} = -2^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_{\text{real}} = \zeta \cdot \varepsilon_C = \zeta \cdot \frac{T_C}{T_C - T_O} = 0,5 \cdot \frac{(40 + 273,15)\text{K}}{(40 - (-2))\text{K}} = 3,7.$$

- b) Eine Wärmepumpe hat eine Arbeitszahl nach Herstellerangaben (Prüfstand) von  $\beta_{\text{Test}}=4,7$ . Unter durchschnittlichen Bedingungen ergibt sich für das Jahresmittel aber eine Arbeitszahl von  $\beta_{\text{Betrieb}}=3,4$ .

Ein Gaskessel hat nach Herstellerangaben (Prüfstand) einen Jahresnutzungsgrad bezogen auf den Heizwert von  $\eta_{\text{Test}}=1,08$ . Unter durchschnittlichen Bedingungen ergibt sich für das Jahresmittel aber ein Nutzungsgrad von  $\eta_{\text{Betrieb}}=0,95$ .

Berechnen Sie die nötigen Primärenergieeinsätze für die Versorgung eines Einfamilienhauses mit 10000 kWh/a Wärme. Beachten Sie die Primärenergiefaktoren. Führen sie die Rechnung jeweils mit  $\beta$  und  $\eta$  laut Hersteller und Realität durch.

Wärmepumpe	Gaskessel
$\beta=4,7$ (3,4)	$\eta=1,08$ (0,95)
$W_{\text{el,zu}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{\beta} = \frac{10000\text{kWh/a}}{4,7(3,4)}$ =2100 (2900) kWh <sub>el</sub> /a	$Q_{\text{F,zu}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{\eta} = \frac{10000\text{kWh/a}}{1,05(0,95)}$ =9300 (10500) kWh <sub>Gas</sub> /a
$p_{\text{Primär,el}}=3,0$	$p_{\text{Primär,Gas}}=1,07$
$Q_{\text{Primär,zu}} = W_{\text{el,zu}} \cdot p_{\text{Primär,el}}$ =6300 (8700) kWh/a	$Q_{\text{Primär,zu}} = Q_{\text{F,zu}} \cdot p_{\text{Primär,Gas}}$ =100000 (11200) kWh/a

- c) Für die beiden Varianten ist eine grobe Abschätzung der jährlichen Kosten zu machen (Investition, Betrieb, Wartung). Die Anschaffungskosten sollen bei der WP für Gerät und Tiefenbohrungen gelten. Annuität sei 8% pro Jahr. Für die Verbrauchskosten mit den realen Daten aus b) rechnen.

Wärmepumpe	Gaskessel
<b>Investition</b>	
$K_{Invest}=20000 \text{ DM}$	$K_{Invest}=6000 \text{ DM}$
$K_{Invest,a}=a \cdot K_{Invest}$ $=8\%/a \cdot 20000 \text{ DM}$ $=1600 \text{ DM/a}$	$K_{Invest,a}=a \cdot K_{Invest}$ $=8\%/a \cdot 6000 \text{ DM}$ $=480 \text{ DM/a}$
<b>Betrieb</b>	
Preis für Elektroenergie: $k_{el}=0,15 \text{ DM/kWh}_{el}$	Preis für Energie aus Gas: $k_{Gas}=0,05 \text{ DM/kWh}_{Gas}$
$K_{Betrieb,a}=k_{el} \cdot W_{el,zu}$ $=0,15 \text{ DM/kWh}_{el} \cdot 2900 \text{ kWh}_{el}/a$ $=435 \text{ DM/a}$	$K_{Betrieb,a}=k_{Gas} \cdot Q_{F,zu}$ $=0,05 \text{ DM/kWh}_{el} \cdot 10500 \text{ kWh}_{el}/a$ $=525 \text{ DM/a}$
<b>Wartung/Instandhaltung</b>	
ca. 1% der Investitionskosten pro Jahr $K_{Wartung,a}=200 \text{ DM/a}$	durch Wartungsvertrag $K_{Wartung,a}=200 \text{ DM/a}$
<b>Gesamtkosten</b>	
$K_a=K_{Invest,a}+K_{Betrieb,a}+K_{Wartung,a}$ $=2235 \text{ DM/a}$	$K_a=K_{Invest,a}+K_{Betrieb,a}+K_{Wartung,a}$ $=1205 \text{ DM/a}$

Quelle: Datenpool des IfHK,  
Wolfenbüttel