

# TECHNIK

Energieumsatz in technischen Systemen



## Die Wärmepumpe

Dr. Ulrich Klisa  
Gymnasium Ochtrup

5/95

Herausgeber:

Technik-Unterricht: Forum e.V. (TUF)  
Memelstraße 75 47057 Duisburg

# Die Wärmepumpe

## 1. Die Arbeitsweise der Wärmepumpe

Bei einer Kompressionswärmepumpe wird ein Arbeitsmittel in einem Kreislauf geführt. Dabei durchläuft es vier Teilprozesse. Es wird **verdampft, verdichtet, verflüssigt und entspannt** (vgl. Anhang 1).

Zur Erläuterung dieses Kreisprozesses werden zuerst grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten dargestellt: Einmal anhand von Alltagserfahrungen, zum anderen anhand des Modells der kinetischen Wärmetheorie.

### 1.1 Physikalische Grundlagen aus der Alltagserfahrung.

a) Wärmeentzug durch Verdampfen:

Kühlende Wirkung von Parfümtropfen und Wassertropfen, die auf der Haut verdunsten.

b) Wärmeabgabe durch Verflüssigen:

Erwärmung von Milch in einer Expressomaschine durch Übertragung der Verflüssigungswärme.

c) Druchabhängigkeit der Siedetemperatur:

Verkürzung der Kochzeit im Schnellkochtopf bei Drücken  $p > 1$  bar und Siedetemperaturen von z.B.  $112^{\circ}\text{C}$ .

d) Temperaturanstieg durch Verdichten:

Erwärmung des Pumpenrohrs einer Handpumpe.

e) Temperaturabsenkung durch Entspannen:

Vereisung einer mit  $\text{CO}_2$  gefüllten Patrone, wenn das Gas schnell entweicht.

### 1.2 Physikalische Grundlagen im Modell der kinetischen Wärmetheorie

Wird einem Stoff Energie durch Wärmezufuhr oder Arbeit übertragen, so erhöht sich seine innere Energie. Durch diese Energieübertragung nimmt die mittlere kinetische Energie der Moleküle im Stoffverband, z.B. einer Flüssigkeit, und somit die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen zu. Entsprechend steigt die Temperatur der Flüssigkeit.

Bei einer bestimmten Temperatur ist die Bewegungsenergie so groß, daß die Teilchen den Verband der Flüssigkeit verlassen und als freie Moleküle in den Gasraum entweichen können: die Flüssigkeit siedet.

Während des Siedens bleibt die Temperatur und somit die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen konstant. Die zugeführte Verdampfungswärme wird als potentielle Energie der Moleküle gegen die Bindungskräfte umgewandelt. Sie wird beim Abkühlen als Kondensationswärme wieder frei.

Die Geschwindigkeit der Teilchen, die notwendig ist, um den Flüssigkeitsverband zu verlassen ist abhängig von den intermolekularen Anziehungskräften des Stoffes und von den

Druckkräften, die auf die Flüssigkeit wirken. Bei geringem Druck reicht eine geringe Teilchengeschwindigkeit aus, um den Stoff sieden und verdampfen zu lassen. Ist der Außendruck dagegen groß, so ist eine größere Geschwindigkeit, d.h. eine höhere Temperatur, erforderlich, damit der Stoff siedet und verdampft.

Wird eine Flüssigkeit nahe der Siedetemperatur plötzlich entspannt, so kühlt sie sich ab. Die erforderliche Arbeit für den Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand wird aus der inneren Energie der Flüssigkeit geschöpft, da aus der Umgebung nicht schnell genug Wärme übertragen werden kann. Dadurch sinkt die Temperatur der Flüssigkeit.

Wird ein Gas unter Aufwand äußerer Arbeit gegen den Gasdruck komprimiert, indem eine Wand nach innen bewegt wird, so werden die Moleküle mit größerer Geschwindigkeit zurückgestoßen. Die Erhöhung der Molekülgeschwindigkeit bedeutet eine Erhöhung der inneren Energie. Das Ergebnis ist ein Temperaturanstieg. Bei umgekehrter Bewegungsrichtung der Wand wird der entgegengesetzte Effekt, nämlich Abkühlung, erzielt.

### 1.3 Der Kreisprozeß der Wärmepumpe

Auf der Grundlage der dargestellten physikalischen Gesetzmäßigkeiten läuft der Kreisprozeß der Wärmepumpe ab. Bei diesem Prozeß wird das Arbeitsmittel bei niedriger Temperatur durch Wärmezufuhr  $Q_{81}$  verdampft und der Dampf isentrop verdichtet. Hierfür ist die Arbeit  $W_{112}$  erforderlich. Dem Dampf wird bei höherer Temperatur und höherem Druck die Wärme  $Q_{25}$  isobar entzogen, wodurch zunächst seine Temperatur sinkt, er dann verflüssigt wird und die Flüssigkeit noch etwas gekühlt werden kann. Das Kondensat muß auf den Verdampfungsdruck gedrosselt werden, wobei es bei konstanter Enthalpie zum Teil verdampft und die Temperatur auf Verdampfungsdrucktemperatur sinkt (vgl. Anhang 2, 3 u. 4). Auf diese Weise kann einem System bei niedriger Temperatur Wärme (Fläche 11 8 1 14) entzogen, durch einen Verdichter dem Arbeitsmittel die Verdichtungsarbeit (Fläche 1 2 3 4 6 1) zugeführt und an ein anderes System die gesamte vom Arbeitsmittel aufgenommene Energie als Wärme (Fläche 14 2 3 4 5 10) abgegeben werden.

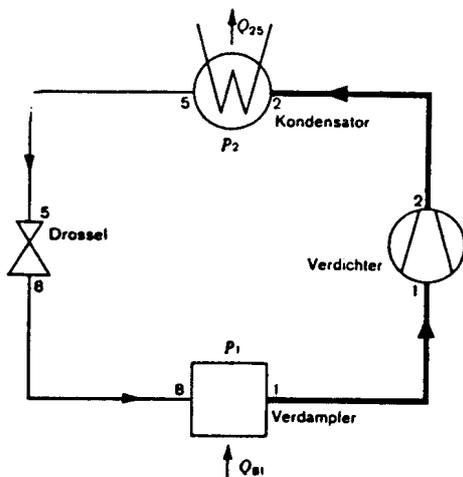


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Wärmepumpe

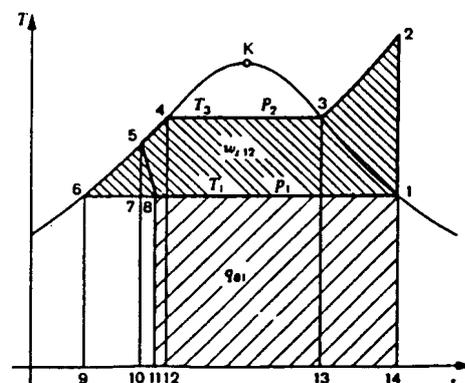


Abb. 2: Linkslaufender Clausius-Rankine-Prozeß im T-s-Diagramm





Als Abzisse ist die spezifische Enthalpie  $h$  (Einheit: kJ/kg) aufgetragen. Die spezifische Enthalpie  $h$  ist ein Maß für die umgesetzte Energiemenge pro kg Arbeitsmittel und kann als „je kg Stoff gespeicherte Energie“ bezeichnet werden.

Der Ablauf des idealen Kreisprozesses erfolgt längs des Kurvenzuges 1 2 2' 3 4, der Ablauf des realen Prozesses längs des Kurvenzuges 1 1\* 2\* 2' 3 3\* 4\* 4 (Abb. 4).

#### *Der ideale Kreisprozeß*

- 12 Verdichtung bis zur Verdichtungstemperatur (überhitzter Arbeitsmitteldampf)
- 22' Abkühlung bis zur Verflüssigungstemperatur; Abgabe der Überhitzungswärme  $h_2 - h_2'$
- 2'3 Verflüssigung: Abgabe der Verflüssigungswärme  $h_2' - h_3$
- 34 Expansion in das Naßdampfgebiet
- 41 Verdampfung, Aufnahme der Verdampfungswärme  $h_1 - h_4$ .

#### *Der reale Kreisprozeß*

- 11\* Überhitzung des Arbeitsmitteldampfes aus Sicherheitsgründen: Vermeidung von Flüssigkeitsschlägen im Verdichter
- 1\*2 Größere Verdichtungsarbeit bedingt durch innere Reibung im Arbeitsmitteldampf sowie durch Reibungs- und Wärmeverluste im Verdichter
- 33\* Flüssigkeitsunterkühlung: Dadurch wird gewährleistet, daß kein dampfförmiges Arbeitsmittel in das Expansionsventil gelangt und zum anderen wird durch die Unterkühlung der Dampfanteil beim Eintritt in den Verdampfer geringer, so daß mehr Verdampfungswärme übertragen werden kann ( $h_4 - h_{4*}$ ).

## 2. Die Leistungszahl der Wärmepumpe

### 2.1 Die Leistungszahl und die Carnot-Leistungszahl

Wie bei anderen Maschinen vergleicht man auch bei der Wärmepumpe die für den Prozeß aufgewendete Energie mit der gewonnenen Nutzenergie. Zugeführt wird die elektrische Energie für den Antriebsmotor des Verdichters und die vom Verdampfer aufgenommene Wärme aus der Umgebung. Bei der Bewertung der Wärmepumpe wird die Umgebungswärme nicht als Aufwand gerechnet, da sie kostenlos zu Verfügung steht.

Die Leistungszahl  $\varepsilon$  der Wärmepumpe ist

und 
$$\varepsilon = (h_2 - h_3)/(h_2 - h_1) \quad (\text{idealer Prozeß})$$

$$\varepsilon = (h_{2*} - h_{3*})/(h_{2*} - h_{1*}) \quad (\text{realer Prozeß mit Sauggasüberhitzung und Flüssigkeitsunterkühlung}).$$

Als idealer Vergleichsprozess aller Wärme-Arbeitsprozesse dient der Carnot-Prozess. Für diesen idealen (gedachten) Prozess ergibt sich der theoretisch größte Wirkungsgrad bzw. im Vergleich mit der Wärmepumpe die theoretisch größte, aber praktisch nicht realisierbare Leistungszahl  $\epsilon_c$

$$\epsilon_c = T / (T - T_0) = T / \Delta T$$

Als Übersichtsrechnung kann  $\epsilon$  ungefähr gleich  $0,5 \cdot \epsilon_c$  gesetzt werden (vgl. Anhang 7).

### 2.3 Die Leistungszahl im log p, h-Diagramm

Die im Kreisprozess umgesetzten Energiemengen sind aus dem log p, h-Diagramm direkt als Enthalpiedifferenzen (Strecken) zu entnehmen. Auf einfache Weise kann so die Leistungszahl für den idealen und realen Prozess ermittelt werden (vgl. Anhang 8).

## 3. Anwendungsmöglichkeiten und Wärmequellen

Die Wärmepumpe ermöglicht es, Wärme aus Wärmequellen mit niedrigem Temperaturniveau zu nutzen. Der Wirkungsgrad ist bei geringem Niveauunterschied sehr günstig und nimmt mit steigendem Niveauunterschied  $\Delta T$  ab. Das bedeutet für die Praxis:

- möglichst hohe Verdampfungstemperatur
- möglichst niedrige Verflüssigungstemperatur.

Soweit es um Raumheizungen geht, ist die letztere Forderung relativ leicht mit technischen Möglichkeiten erfüllbar. Hierzu müssen nur die auf hohe Vorlauftemperatur berechneten Radiatoren durch solche mit größeren Heizflächen und somit geringerer Vorlauftemperatur ersetzt werden. Die idealsten Voraussetzungen bietet hierfür die Fußbodenheizung.

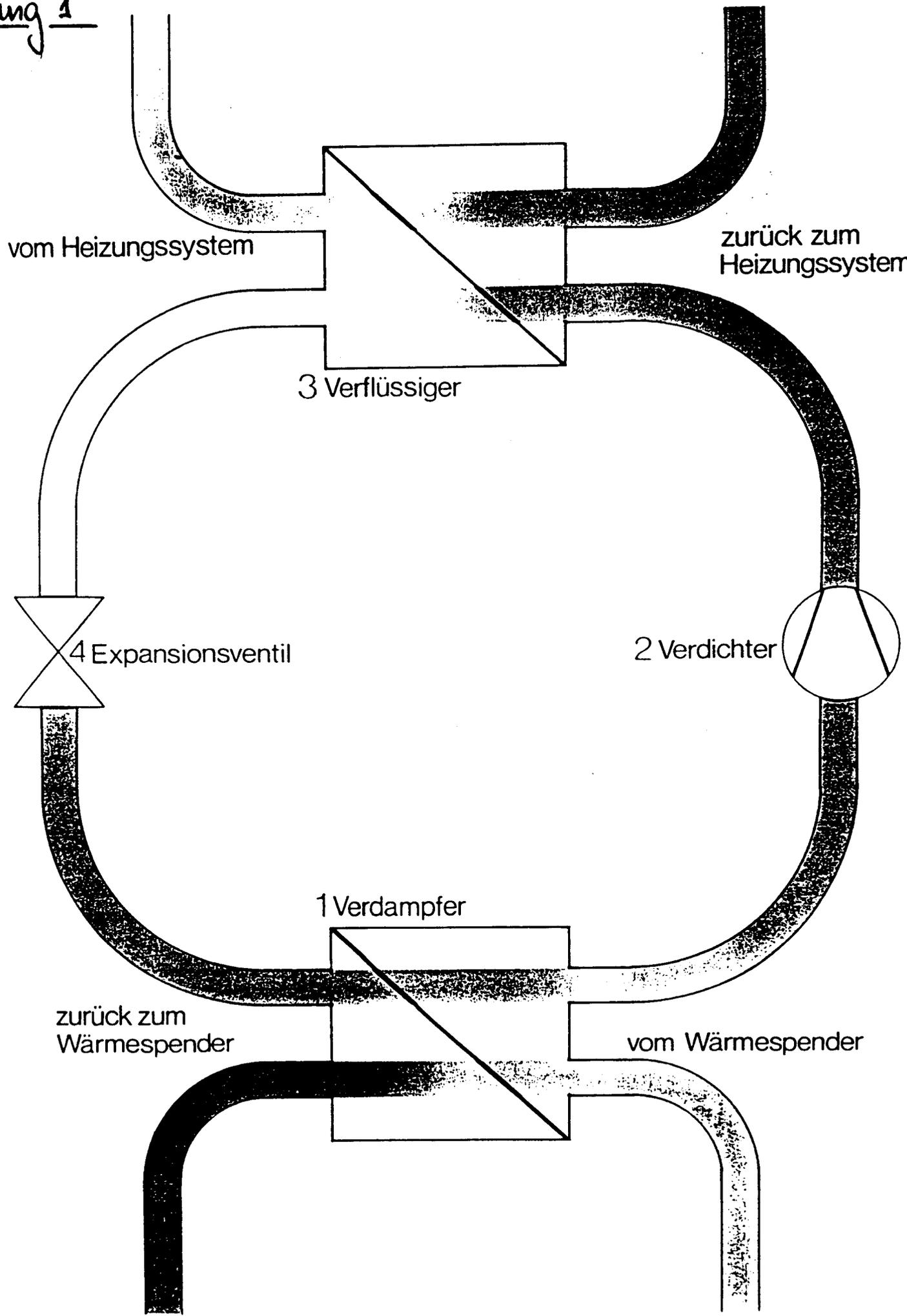
Die Forderung an den Wärmespeicher läßt sich dagegen nicht so leicht erfüllen, da es keinen idealen Wärmespeicher gibt, der überall mit gutem Wirkungsgrad eingesetzt werden kann.

Einen Überblick über die verschiedenen Wärmequellen liefert Tabelle 1 (vgl. Anhang 9.).

### Literatur:

1. Ökologische und physikalische Betrachtungen zur Wärmepumpe, VEW Dortmund, 1978
2. Die Wärmepumpe, RWE Essen, Energieverlag Heidelberg, 1981
3. Einführung in die Wärmelehre, G. Cerbe und H. Hoffmann, München 1980

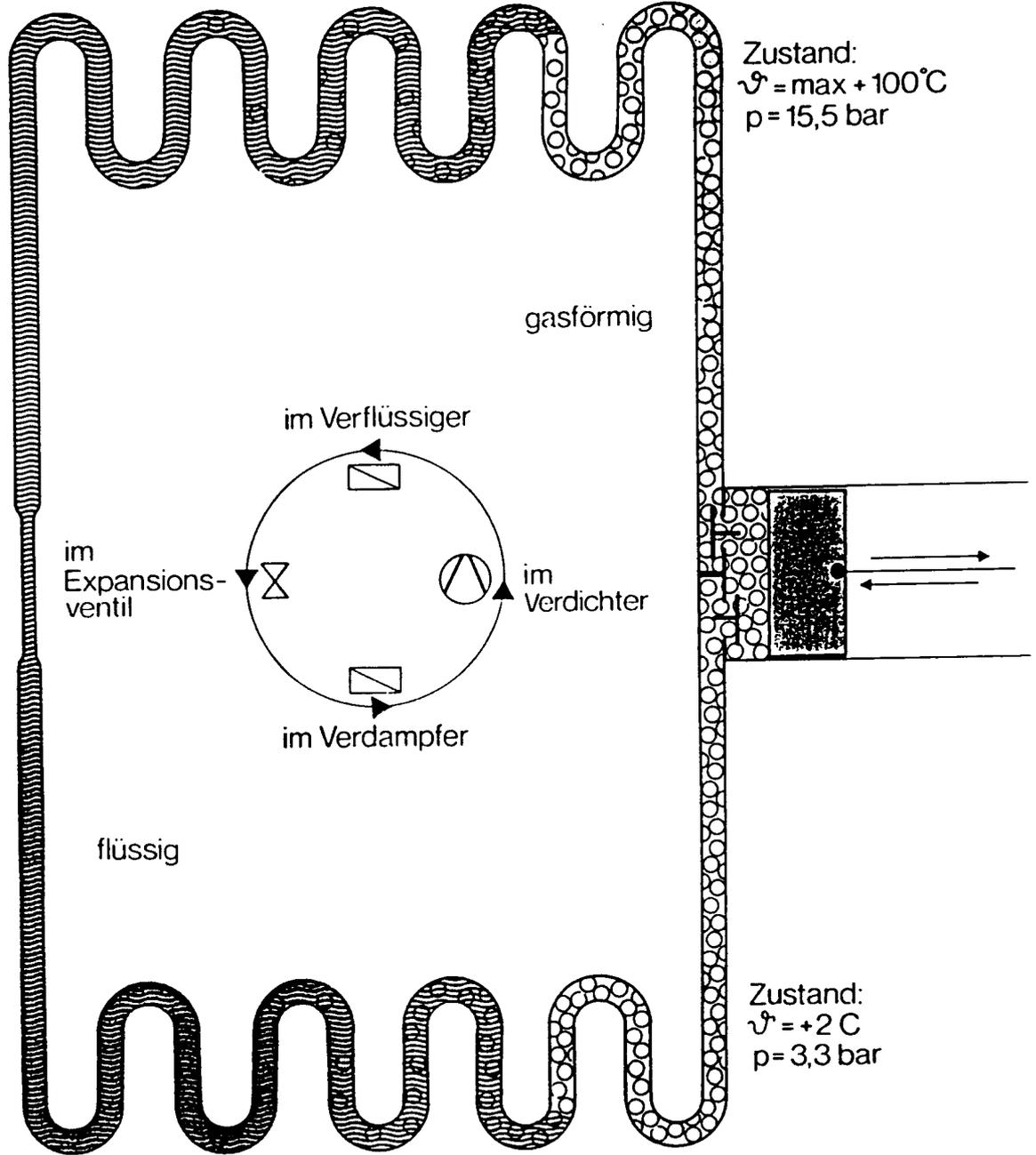
Anhang 1



Aggregatzustandsänderung  
Abgabe von Kondensationswärme

Zustand:  
 $\vartheta = +60^{\circ}\text{C}$   
 $p = 15,5 \text{ bar}$

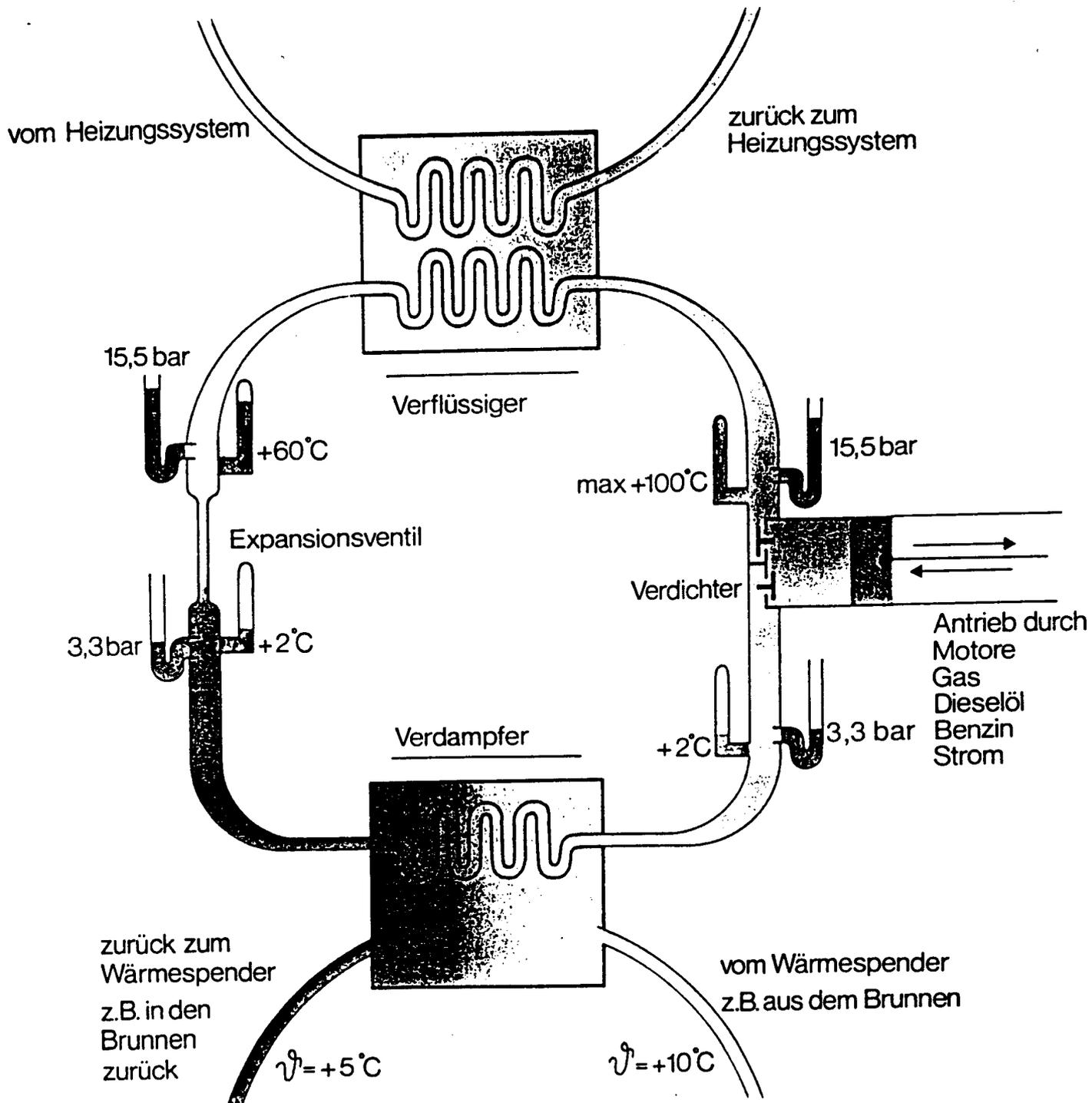
Zustand:  
 $\vartheta = \text{max} + 100^{\circ}\text{C}$   
 $p = 15,5 \text{ bar}$



Zustand:  
 $\vartheta = +2^{\circ}\text{C}$   
 $p = 3,3 \text{ bar}$

Zustand:  
 $\vartheta = +2^{\circ}\text{C}$   
 $p = 3,3 \text{ bar}$

Aggregatzustandsänderung  
Aufnahme von Verdampfungswärme



## Der Kreisprozeß der Wärmepumpe

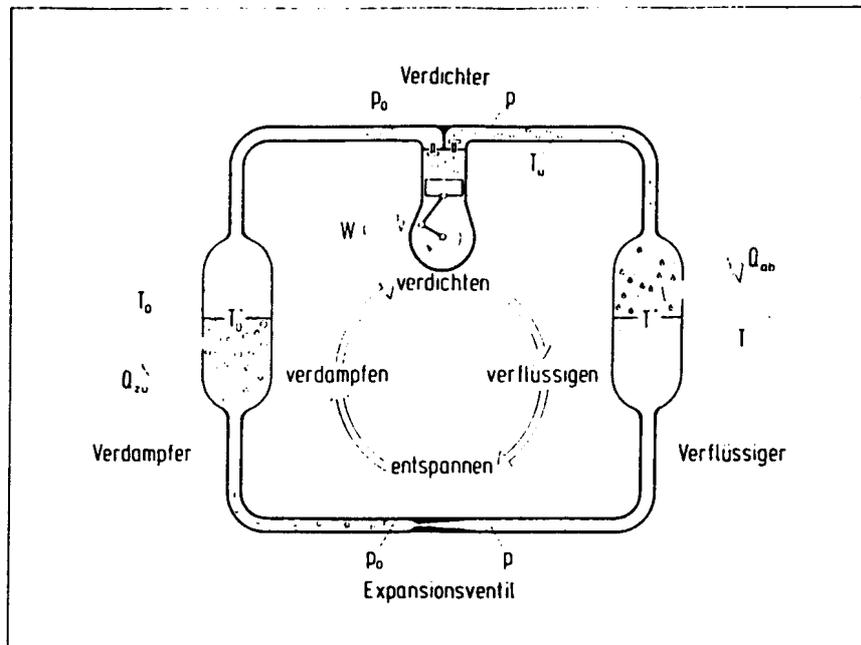
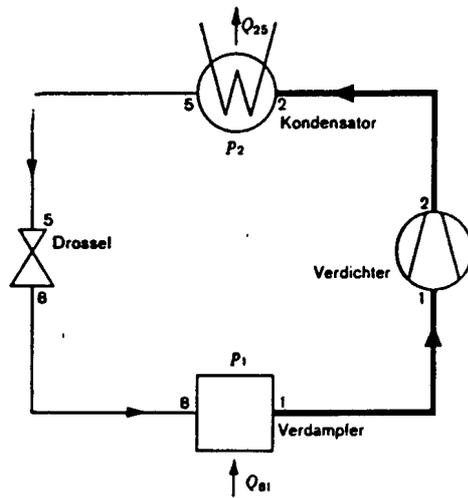


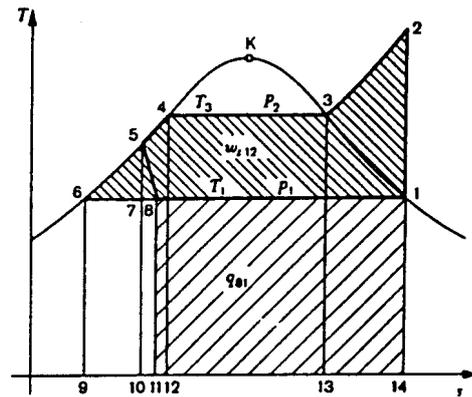
Abb. 6 (FB 1) Kreisprozeß der Wärmepumpe

- $p_0$  Niedriger Druck auf der Verdampferseite vom Auslaß des Expansionsventils bis Einlaß in den Verdichter (beim Arbeitsmittel R 12 beträgt  $p_0$  ca. 3 bar, wenn die Umgebungstemperatur  $T_0$  ca. 3 °C beträgt).
- $p$  Hoher Druck auf der Verflüssigerseite vom Auslaß des Verdichters bis Einlaß in das Expansionsventil (beim Arbeitsmittel R 12 beträgt  $p$  ca. 10 bar, wenn die Umgebungstemperatur  $T$  ca. 40 °C beträgt).
- $T_0$  Temperatur des Mediums (Erde, Wasser, Luft), das den Verdampfer umgibt und aus dem die Wärme  $Q_{zu}$  aufgenommen wird.
- $T$  Temperatur des Mediums (meist Wasser der Zentralheizung), das den Verflüssiger umgibt und an das die Wärme  $Q_{ab}$  abgegeben wird.
- $T_0^*$  Siedetemperatur des Arbeitsmittels im Verdampfer beim Druck  $p_0$ .
- $T_u$  Temperatur des überhitzten Arbeitsmitteldampfes nach dem Verdichten.
- $T^*$  Siedetemperatur des Arbeitsmittels im Verflüssiger beim Druck  $p$ .
- $Q_{zu}$  Dem Verdampfer zugeführte Wärme.
- $Q_{ab}$  Vom Verflüssiger abgegebene Wärme.
- $W$  Vom Verdichter aufgenommene Arbeit.

## Linkslaufender Clausius-Rankine-Prozess<sup>1</sup>



B 5.23 Schematische Darstellung einer Kältdampfmaschine



B 5.24 Linkslaufender Clausius-Rankine-Prozess im  $T,s$ -Diagramm

### T 5.6 Sättigungsdruck der Kältemittel bei $-10^\circ\text{C}$ und $30^\circ\text{C}$

Kältemittel Kurzzeichen	CO <sub>2</sub> R 744	NH <sub>3</sub> R 717	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> R 12	CH <sub>3</sub> Cl R 40	SO <sub>2</sub> R 764
$p_s$ in bar bei $-10^\circ\text{C}$	26,47	2,91	2,19	1,77	1,01
bei $30^\circ\text{C}$	71,93	11,67	7,44	6,53	4,62

Der Kreisprozess im  
T, Q/T-Diagramm

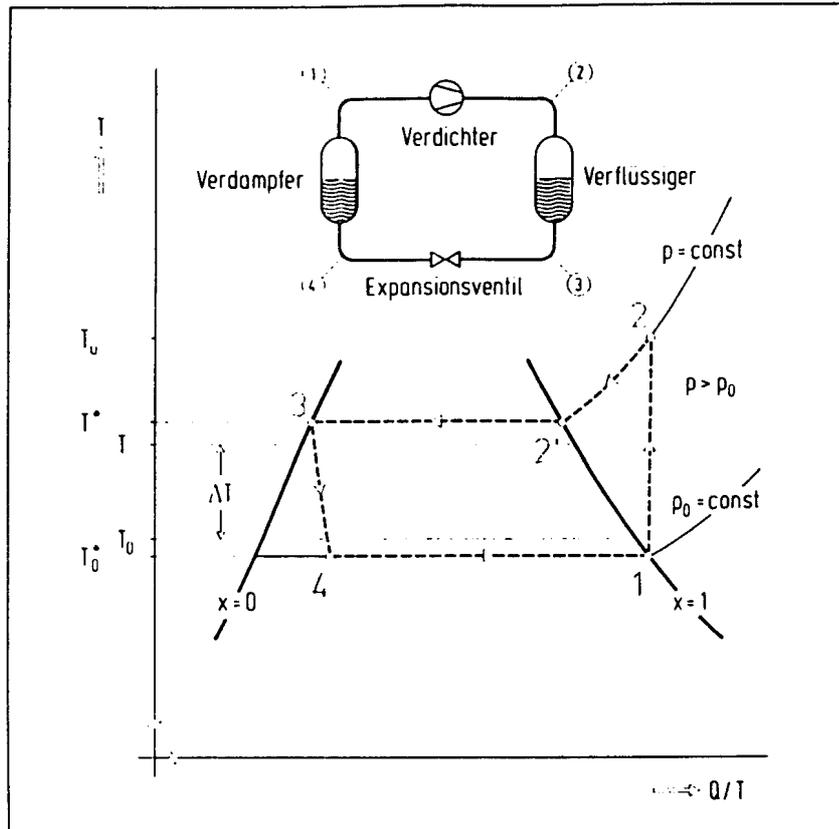
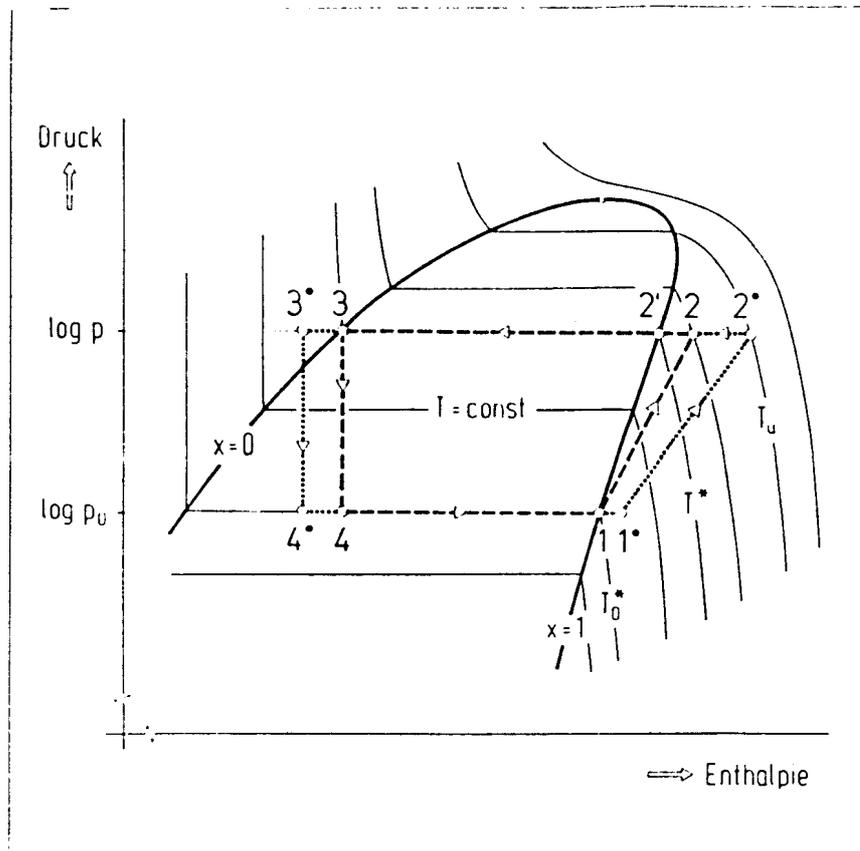


Abb. 7 (FB 2) Der Wärmepumpenkreisprozeß im T, Q/T-Diagramm

## Der ideale und reale Wärmepumpenkreisprozeß im log p, h-Diagramm



- 12 Verdichtung bis zur Verdichtungsendtemperatur (überhitzter Arbeitsmitteldampf)
- 22' Abkühlung bis zur Verflüssigungstemperatur; Abgabe der Überhitzungswärme  $h_2 - h_{2'}$
- 2'3 Verflüssigung: Abgabe der Verflüssigungswärme  $h_{2'} - h_3$
- 34 Expansion in das Naßdampfgebiet keine Energieabgabe (Umwandlung von fühlbarer Wärme in latente Wärme)
- 41 Verdampfung, Aufnahme der Verdampfungswärme  $h_1 - h_4$

Leistungszahlen

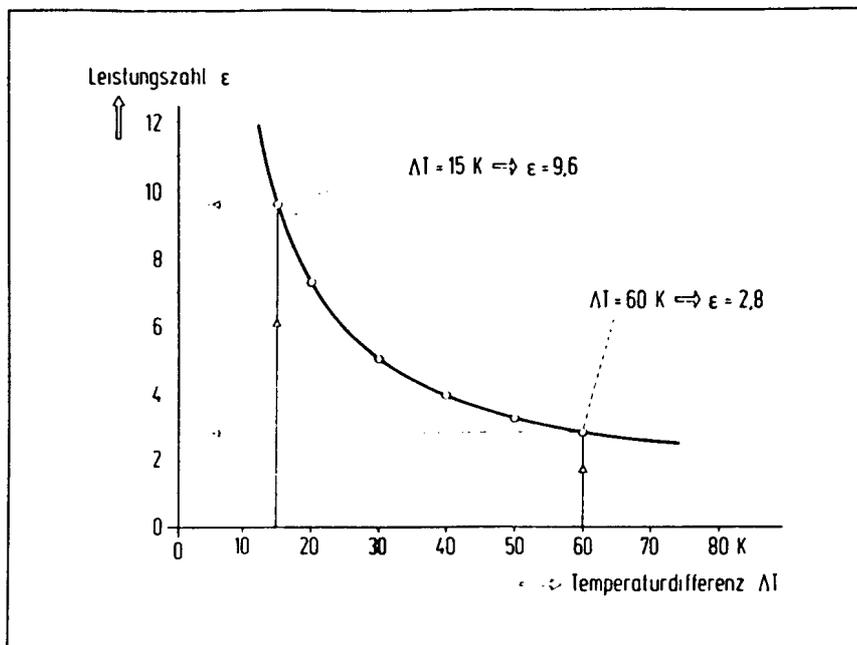


Abb. 9 Leistungszahl in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied  
 $f = 0,5 \cdot f_c$  bezogen auf  $T_0 = 273 \text{ K}$

## Die Leistungszahl im log p, h-Diagramm

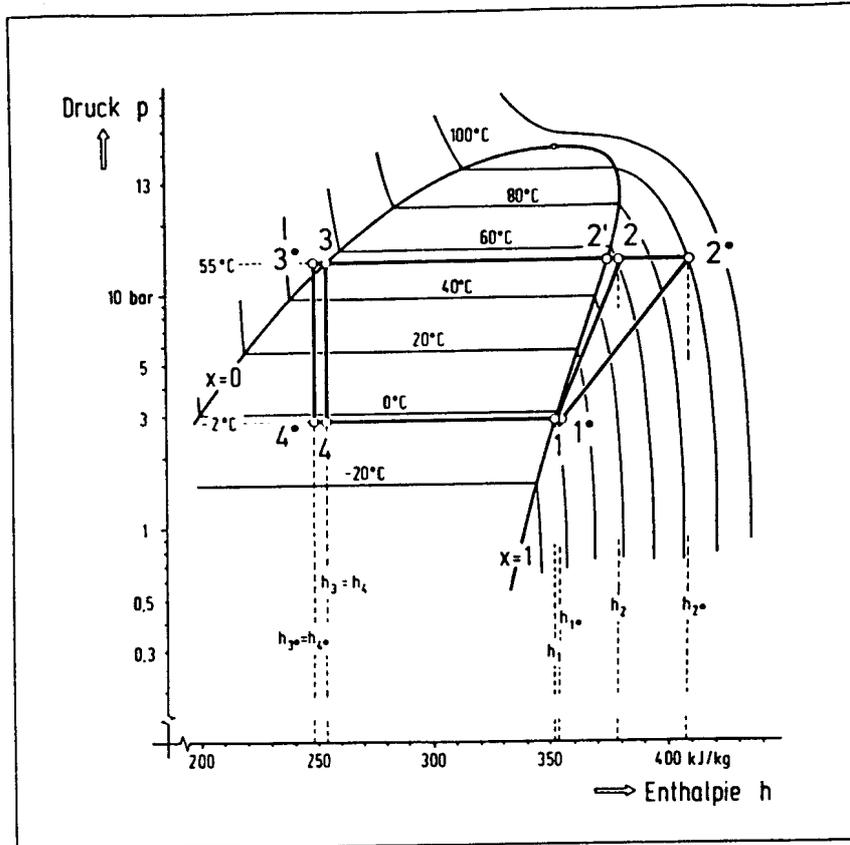


Abb. 10 Ermittlung der Leistungszahl aus dem log p, h-Diagramm

Betriebsbedingungen:	Außentemperatur	+ 3°C
	Verdampfungstemperatur	- 2°C
	Sauggasüberhitzung	+ 1°C
	Verflüssigungstemperatur	+ 55°C
	Flüssigkeitsunterkühlung	+ 50°C
	Heizwasseraustritt	+ 52°C
	Verdichtungsendtemperatur	+ 100°C

$h_1 =$	352 kJ/kg	$h_{1^*} =$	354 kJ/kg
$h_2 =$	378 kJ/kg	$h_{2^*} =$	407 kJ/kg
$h_4 = h_3 =$	254 kJ/kg	$h_{4^*} = h_{3^*} =$	248 kJ/kg

$$E_{\text{ideal}} = \frac{378 - 254}{378 - 352} = 4,8$$

$$E_{\text{real}} = \frac{407 - 248}{407 - 354} = 3,0$$

Kriterien	Luft	Grundwasser	Flußwasser bzw. Oberflächenwasser	Erdreich	Sonnenstrahlung
<p>Örtliche Verfügbarkeit</p> <p>Zeitliche Verfügbarkeit</p> <p>Platzbedarf für den Wärmetauscher</p> <p>Temperatur</p> <p>Spezifische Merkmale</p>	<p>überall</p> <p>ohne Einschränkung</p> <p>gering bis mittelgroß, abhängig vom Anlagensystem</p> <p>- 18 °C bis + 18 °C, nur ca. 10% der Heiztage unter ± 0 °C</p> <p>Geringe Leistung bei größtem Wärmebedarf. Bereifung der Wärmetauscherflächen (Abtauenergie erforderlich). Geräuschprobleme evtl. durch Ventilatoren.</p>	<p>abhängig von geologischer Struktur</p> <p>geringe Schwankungen</p> <p>gering (Förder- und Sickerbrunnen)</p> <p>+ 10 °C bis + 12 °C, wenig schwankend</p> <p>Sorgfältiger Brunnenbau erforderlich. Zur Ableitung fast immer Sickerbrunnen gefordert. Bestimmte Wasserqualität notwendig (z.B. geringer Eisengehalt).</p>	<p>selten</p> <p>evtl. wetterabhängige Schwankungen</p> <p>gering</p> <p>± 0 °C bis + 15 °C, kaum verwendbar unter + 5 °C</p> <p>Zweiter Wärmezeuger erforderlich. Gefahr der Korrosion, Ablagerung und Algenbildung.</p>	<p>bei gelockerter Bauweise</p> <p>ohne Einschränkung</p> <p>groß, Verhältnis Wohnfläche : Erdreich wie 1 : 2 bis 1 : 3</p> <p>± 0 °C bis + 15 °C in Wärmetauschnähe, stark abhängig vom Wärmeentzug</p> <p>Auf geeignete Bepflanzung achten. Geologische Verhältnisse für die Verwendbarkeit entscheidend (kein Fels).</p>	<p>überall</p> <p>stark schwankend</p> <p>große Dachflächen, unbeschattet</p> <p>immer über ± 0 °C, sehr stark schwankend</p> <p>Zweiter Wärmezeuger erforderlich. Einflüsse auf die Architektur.</p>

Anhang 9: Natürliche Wärmequellen bei der Wohnraumbeheizung mit Wärmepumpen