

Praktikum

Bestimmung der Leistungszahl einer elektrisch angetriebenen Wasser / Wasser-Wärmepumpe



Praktikumsversuch

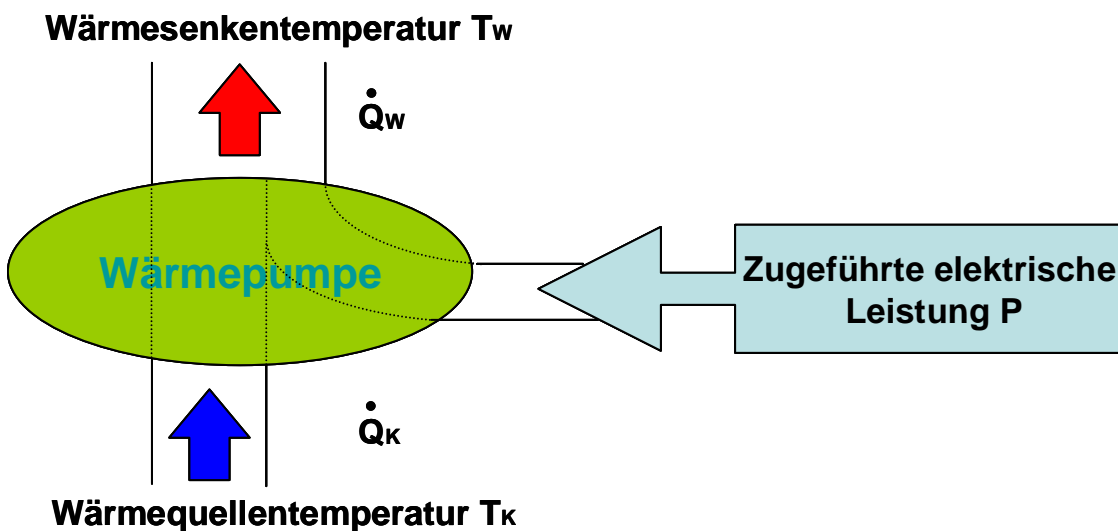
Bestimmung der Leistungszahl einer elektrisch angetriebenen Wasser / Wasser-Wärmepumpe

1. Einleitung und Grundlagen

In Deutschland werden ca. 58 % der Endenergie für die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser verwendet, im Bereich der Haushalte ist dieser Anteil sogar ca. 90 %. Die Wärmepumpe ist ein energiesparendes und umweltschonendes Heizsystem, das Umweltwärme nutzt. Geringer Energieverbrauch, niedrige Umweltbelastung und geringe Betriebskosten sind die Vorteile dieser Heiztechnik.

Idealerweise wird die Wärmepumpe in Verbindung mit einer guten Wärmedämmung und einer Niedertemperaturheizung eingesetzt. Die Technik ist ausgereift. Die Wärmepumpe kann sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch im Vergleich zu fossil befeuerten Heizanlagen gut bestehen.

Eine Wärmepumpe ist eine Arbeitsmaschine, die mit Hilfe höherwertiger Energie (elektrische Energie) Wärme von einem tieferen auf ein höheres Temperaturniveau hebt.



Jede Kompressionswärmepumpe enthält die folgenden Komponenten:

- Verdampfer
- Verdichter
- Kondensator
- Expansionsventil

Diese Komponenten sind durch Leitungen verbunden, in denen ein Kältemittel mit geeigneten thermodynamischen Eigenschaften den Kreisprozess nach Bild 1 durchläuft.

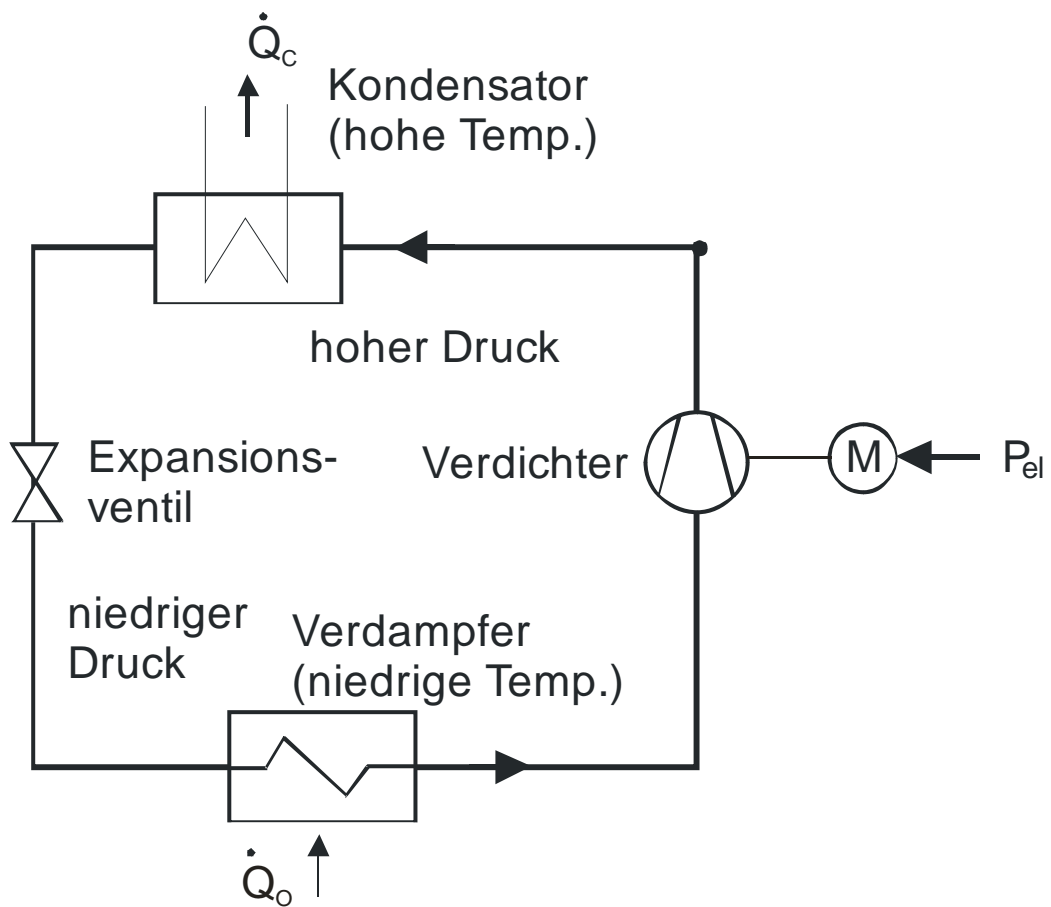


Bild 1: Prinzipielle Schaltung einer Wärmepumpe

Im Verdampfer wird das flüssige Kältemittel unter Wärmezufuhr auf niedrigem Temperaturniveau beim Druck p_0 verdampft. Der etwas überhitzte Kältemitteldampf wird vom Verdichter angesaugt und auf den Druck p verdichtet und damit auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Im Kondensator gibt der überhitzte Kältemitteldampf seine Überhitzungs- und Kondensationswärme ab, wird verflüssigt und im Expansionsventil auf den Verdampfungsdruck p_0 entspannt, wobei ein Teil des flüssigen Kältemittels verdampft.

Im Bild 2 ist ein Wärmepumpen-Kreisprozess im $\lg p, h$ -Diagramm eingezeichnet. Dieses Diagramm ist besonders gut dafür geeignet, da hier die Beträge der spezifischen Wärmen und Arbeiten direkt als Strecken abgelesen werden können.

Das Verhältnis zwischen gewonnenem Nutzwärmestrom und aufgewendeter Arbeitsleistung wird mit der Leistungszahl ε bezeichnet. Diese Leistungszahl lässt sich aus den Werten im lg p, h-Diagramm wie folgt bestimmen:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

Eine Wärmepumpe lässt sich besonders dort vorteilhaft anwenden, wo Umwelt- oder Abwärme von einem noch angemessen hohen Temperaturniveau ($>0^\circ\text{C}$) zur Verfügung steht und wo Nutzwärme bei nicht sehr hohen Temperaturen (z. B. Heizung $<50^\circ\text{C}$) benötigt wird, so dass nur eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungs- und Kondensationstemperatur zu überwinden ist.

Für eine ideale Wärmepumpe, die nach dem Carnot'schen Kreisprozess arbeitet und nur reversible Zustandsänderungen durchläuft, gilt für die Leistungszahl:

$$\varepsilon_c = \frac{T}{T - T_0} \quad (2)$$

mit: T Kondensationstemperatur
 T_0 Verdampfungstemperatur

Jedoch entstehen in der Praxis Verluste, die man mit dem Realfaktor η_{WP} beschreibt. Dieser Realfaktor setzt sich zusammen aus den Verlusten bei der Wärmeübertragung im Verdampfer und Kondensator und denen des elektrischen Antriebsmotors, den mechanischen und thermodynamischen Verlusten des Kompressors und beträgt im Mittel ca. $\eta_{WP} = 0,5$.

Daher gilt:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \cdot \eta_{WP} = \varepsilon_c \cdot 0,5 \quad (3)$$

Man sieht aus Gl. (3) und Gl. (2), dass die Leistungszahl einer Wärmepumpe keine Konstante ist. Sie hängt von deren Betriebszustand ab. Bei hoher Außentemperatur und dadurch bedingter hoher Verdampfungstemperatur sowie niedrigerer Vorlaufstemperatur eines Warmwasserheizsystems steigt die Leistungszahl an.

Diese Leistungszahl erlaubt jedoch keine exakte Beurteilung der Wärmeerzeugung hinsichtlich ihres Primärenergieeinsatzes, da bei der reinen energetischen Betrachtung die Verluste bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie (Strom) nicht berücksichtigt wurden.

Mit Hilfe der Primärenergieleistungsziffer können alle Heizsysteme hinsichtlich ihres Primärenergieeinsatzes bewertet und gegenübergestellt werden.

Definition der Primärenergieleistungsziffer:

$$\varepsilon_{PE} = \frac{\text{genutzte Heizenergie}}{\text{insgesamt aufgewendete Primärenergie}} = \frac{\dot{Q}}{P_{el} / \eta_K} = \varepsilon \cdot \eta_K \quad (4)$$

mit:

P_{el}	aufgenommene el. Leistung
η_K	Kraftwerkswirkungsgrad
\dot{Q}	an Heizungswasser abgegebener Wärmestrom

Für die Primärenergieleistungsziffer der elektrischen Kompressionswärmepumpe ergibt sich aus (2), (3) und (4):

$$\varepsilon_{PE} = \eta_{WP} \cdot \eta_K \cdot \left[\frac{T}{T - T_0} \right] \quad (5)$$

Bei einer Verdampfungstemperatur von 0°C und einer Kondensationstemperatur von 60°C hat eine Kompressionswärmepumpe etwa die gleiche Primärenergieleistungsziffer wie eine Feuerungsheizung (ca. 90 %). Die Primärenergieleistungsziffer einer elektrischen Widerstandsheizung beträgt dagegen 33,3 %.

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit der Primärenergieleistungsziffer von der Kondensationstemperatur bei einer Verdampfungstemperatur von 10°C. Wie die Leistungszahl nimmt dabei die Primärenergieleistungsziffer mit steigender Kondensationstemperatur ab.

Heutige Wasser / Wasser-Wärmepumpen erreichen Leistungszahlen von ca. 5,5 bis 6,5 bei W10 / W35 (d.h. 10°C Wärmequellentemperatur, 35°C Heizungsvorlauftemperatur).

Damit die Gebäudeheizung mittels einer Wärmepumpe energetisch sinnvoll wird, muss entweder die Kondensationstemperatur abgesenkt (z. B. durch Niedertemperaturheizung) oder die Verdampfungstemperatur angehoben werden (durch höhere Wärmequellentemperatur, z. B. wenn die Wärmepumpe ihre Wärme aus dem Erdreich oder vom Grundwasser bezieht).

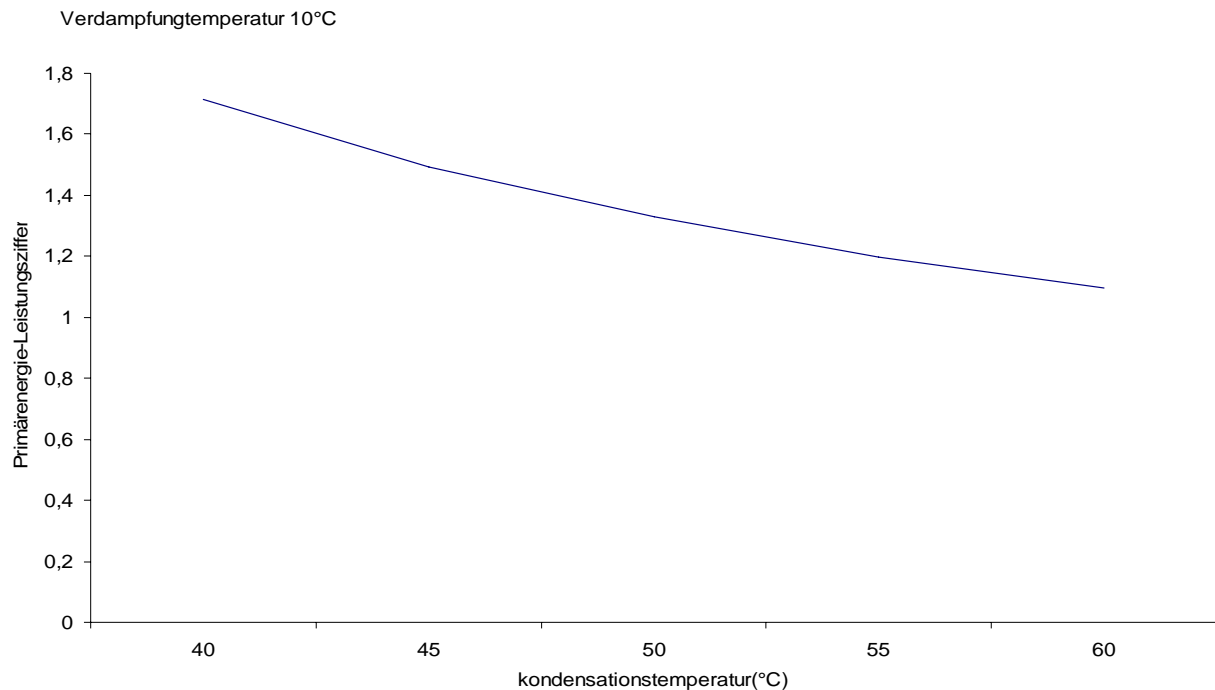


Bild 3: Abhängigkeit der Primärenergieleistungsziffer von der Kondensationstemperatur

2. Experimentelle Bestimmung der Leistungszahl

Experimentell gewinnt man die Nutzleistung der Wasser / Wasser-Wärmepumpe aus dem Volumenstrom und den Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmeträgerflüssigkeit der Wärmesenke.

$$\dot{Q} = \dot{V}_W \cdot \rho_W \cdot c_W (\vartheta_{\text{aus}} - \vartheta_{\text{ein}}) \quad (6)$$

\dot{V}_W	Volumenstrom des Wassers
ρ_W	Dichte des Wassers
c_W	spezif. Wärmekapazität des Wassers
ϑ_{ein}	Eintrittstemperatur
ϑ_{aus}	Austrittstemperatur

Die vom Verdichter aufgenommene elektrische Leistung wird mit einem Leistungswandler gemessen.

3. Beschreibung der Versuchsanlage

Wasser / Wasser-Wärmepumpe

Das Kältemittel R407C wird in einem vollhermetischen Scroll-Verdichter (1) auf den Kondensationsdruck p verdichtet und im Kondensator (2) unter Wärmeabgabe verflüssigt. Das nun flüssige Kältemittel wird im Expansionsventil (6) auf den Druck p_0 entspannt und verdampft unter Wärmeaufnahme im Verdampfer (7). Leicht überhitzt wird es vom Verdichter angesaugt. Zur Verbesserung der Leistungszahl ist ein innerer Wärmeübertrager (3) eingebaut. Das Kältemittel R407C ist ein ternäres Gemisch aus 23 Massen-% R32 (Difluormethan), 25% R125 (Pentafluormethan) und 52% R134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan). Das Ozonzerstörungspotenzial ist $ODP = 0$, das Treibhauspotenzial beträgt $GWP = 1525$.

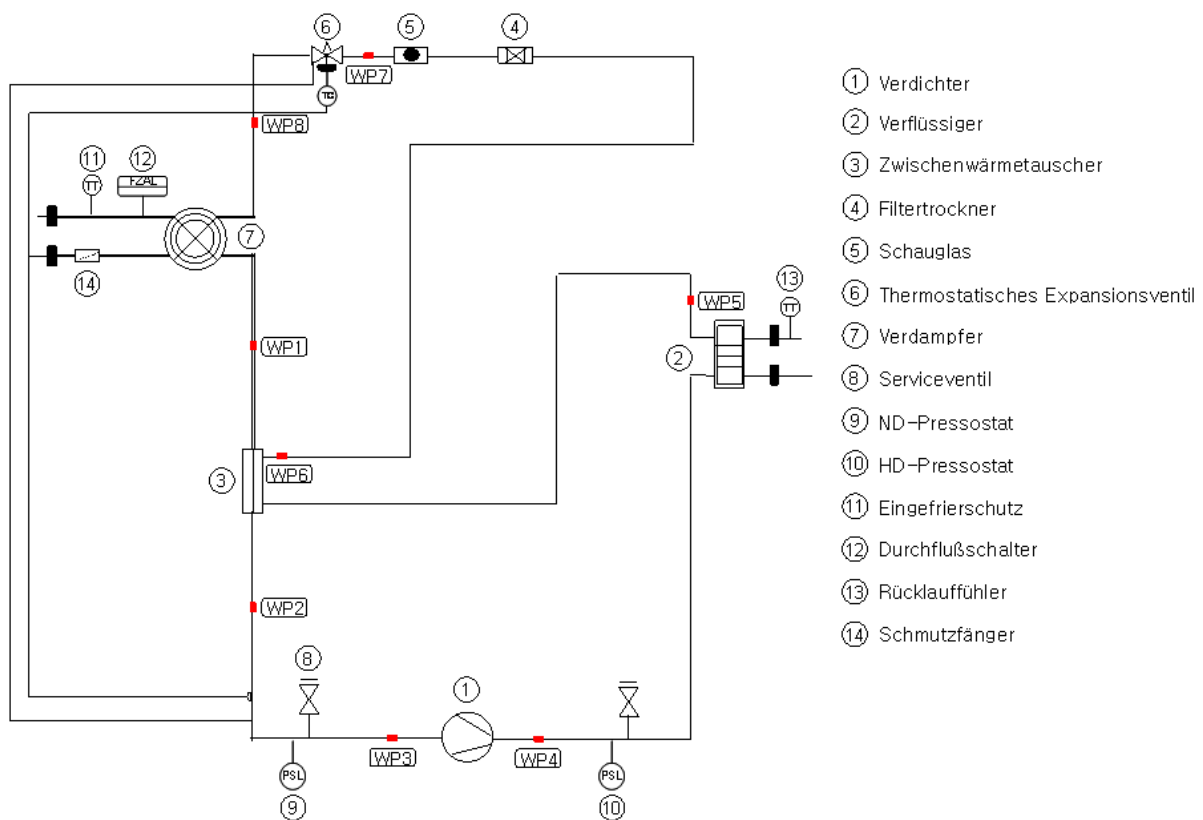
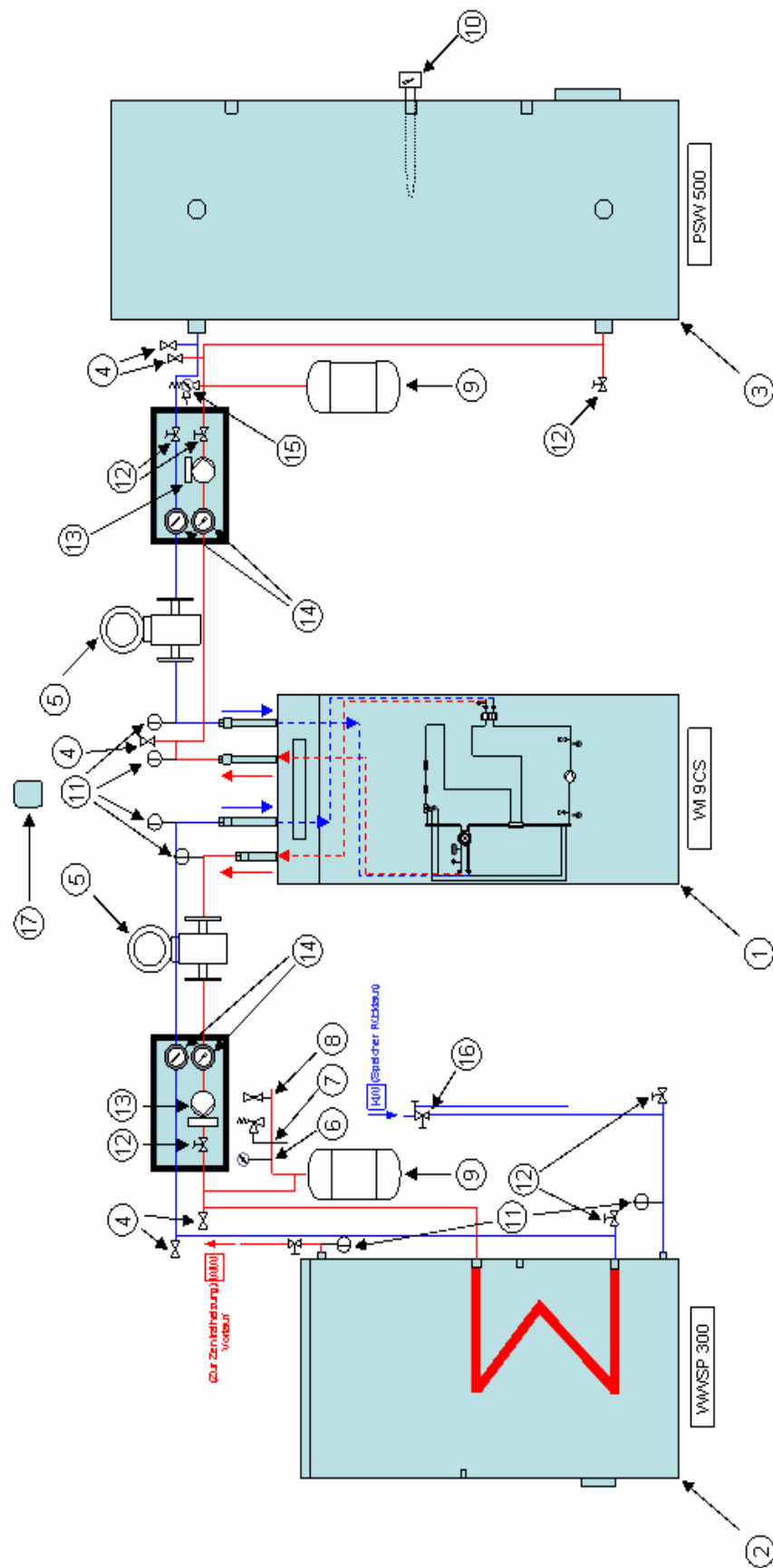


Bild 4: Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe

Der Schaltplan mit der wasserseitigen Verrohrung ist in Bild 5 dargestellt. Der Speicher (3) auf der rechten Seite (PSW 500) stellt den Brunnen dar. Das kalte Wasser wird mit einer Umwälzpumpe (13) zum Verdampfer der Wärmepumpe gefördert. Der Volumenstrom wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (5) bestimmt. Mit Pt-100 Fühlern (11) wird die Ein- und Austrittstemperatur des Wassers am Verdampfer gemessen. Der vom Kondensator der Wärmepumpe abgegebene Wärmestrom kann durch Messung des wasserseitigen Volumenstroms und der Ein- und Austrittstemperatur ermittelt werden. Die Wärme wird im Speicher (2) auf der linken Seite (WWSP 300) über einen Wärmeübertrager eingespeichert.



- ① Wärmepumpe
- ② Warmwasserspeicher
- ③ Pufferspeicher
- ④ Entlüfter
- ⑤ Promag50
- ⑥ Manometer
- ⑦ Sicherheitsventil
- ⑧ Schnellentlüfter
- ⑨ Ausdehnungsgefäß
- ⑩ Heizkörper
- ⑪ Temperaturfühler
- ⑫ Absperrventil
- ⑬ Umwälzpumpe
- ⑭ Bimetallischer Thermometer
- ⑮ Sicherheitsventil mit Manometer
- ⑯ Absperrventil mit Entleerung
- ⑰ Raumtemperatur

Schema der Wärmepumpe mit wasserseitiger Verrohrung und Messfühlern

Bild 5: Schaltplan der Wasser / Wasser - Wärmepumpe

Hinweise zur Ausarbeitung des Hauptdachversuchs „Wärmepumpe“

Die folgenden Punkte sind in knapper Darstellung auszuarbeiten:

1. Beschreibung des Versuchs, der verwendeten Messinstrumente und deren Zweck. Was wurde mit welchem Ziel gemacht?
2. Erklären Sie den Unterschied zwischen einem Kühlschrank und einer Wärmepumpe. Wo befinden sich am Kühlschrank die Komponenten Verdampfer und Kondensator? Welche elektrische Leistung ist für den Betrieb eines Kühlschranks nötig?
3. Die ermittelten Versuchswerte und gefundenen Ergebnisse sind in beiliegende Tabelle einzutragen.
4. Berechnung der Leistungszahl der Wärmepumpe aus den gemessenen Daten.
5. Zeichnen Sie den Verlauf der Leistungszahl in Abhängigkeit von der wasserseitigen Kondensatoraustrittstemperatur bzw. der Verdampfereintrittstemperatur.
6. Diskutieren Sie die Ergebnisse. Erklären Sie die Abhängigkeit der Leistungszahl von den oben genannten Temperaturen. Bei welchen Bedingungen ist die Leistungszahl besonders groß? Bitte nennen Sie einige Beispiele für solche Bedingungen aus praktischen Anwendungen von Wärmepumpen.
7. Zeichnen Sie den Verlauf der Primärenergieleistungsziffer in Abhängigkeit von der Kondensatortemperatur bei der im Praktikum gemessenen Verdampfertemperatur. Erklären Sie den Begriff der Primärenergieleistungsziffer und deren Zweck.
8. Beschreiben und erklären Sie den Verlauf der elektrischen Verdichterleistung während des Versuchs unter Zuhilfenahme des $\log p, h$ -Diagramms.