


**ZIEL**

**Aufzeichnung und Auswertung des Druck-Enthalpie-Diagramms einer Kompressionswärmepumpe**

**AUFGABEN**

- **Demonstration der Funktionsweise einer elektrischen Kompressionswärmepumpe.**
- **Quantitative Untersuchung des zugehörigen Kreisprozesses.**
- **Aufzeichnung und Auswertung des Druck-Enthalpie-Diagramms.**

**ZUSAMMENFASSUNG**

Eine elektrische Kompressionswärmepumpe besteht aus einem Kompressor mit Antriebsmotor, einem Verflüssiger, einem Ausdehnungsventil und einem Verdampfer. Ihre Funktionsweise beruht auf einem Kreisprozess mit Phasenübergang, den das Arbeitsmittel in der Pumpe durchläuft und der idealisiert in die vier Schritte Kompression, Verflüssigung, gedrosselte Entspannung und Verdampfung unterteilt werden kann. Die theoretische Leistungszahl des idealisierten Kreisprozesses lässt sich aus den in einem Mollier-Diagramm abgelesenen spezifischen Enthalpien  $h_1$ ,  $h_2$  und  $h_3$  berechnen. Sind die Enthalpien  $h_2$  und  $h_3$  des idealisierten Kreisprozesses sowie die dem Warmwasserreservoir pro Zeitintervall  $\Delta t$  zugeführte Wärmemenge  $\Delta Q_2$  bestimmt, so lässt sich der Massestrom des Arbeitsmittels abschätzen.

**BENÖTIGTE GERÄTE**

Anzahl	Geräte	Art.-Nr.
1	Wärmepumpe D (230 V, 50 Hz)	<b>1000820</b> oder
	Wärmepumpe D (115 V, 60 Hz)	<b>1000819</b>
2	Temperatursensor Pt100 mit Messklemme	<b>1009922</b>
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	<b>1000540</b> oder
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	<b>1000539</b>
<b>Zusätzlich empfohlen:</b>		
1	3B NETlab™	<b>1000544</b>

**ALLGEMEINE GRUNDLAGEN**

Eine elektrische Kompressionswärmepumpe besteht aus einem Kompressor mit Antriebsmotor, einem Verflüssiger, einem Ausdehnungsventil und einem Verdampfer. Ihre Funktionsweise beruht auf einem Kreisprozess mit Phasenübergang, den das Arbeitsmittel in der Pumpe durchläuft und der idealisiert in die vier Schritte Kompression, Verflüssigung, gedrosselte Entspannung und Verdampfung unterteilt werden kann.

**2**

Zur Kompression wird das gasförmige Arbeitsmittel vom Kompressor angesaugt, ohne Entropieänderung ( $s_1 = s_2$ ) von  $p_1$  auf  $p_2$  komprimiert und dabei überhitzt, siehe Abb. 1 und Abb. 2. Die Temperatur steigt daher von  $T_1$  auf  $T_2$ . Pro Masseneinheit wird die mechanische Verdichtungsarbeit  $\Delta w = h_2 - h_1$  verrichtet.

Im Verflüssiger kühlt das Arbeitsmittel stark ab und kondensiert. Die frei werdende Wärme (Überhitzungswärme und Kondensationswärme) beträgt pro Masseneinheit  $\Delta q_2 = h_2 - h_3$ . Sie erwärmt das umgebende Reservoir. Das kondensierte Arbeitsmittel gelangt zum Entspannungsventil, um dort gedrosselt (d.h. ohne mechanische Arbeit) auf niedrigeren Druck entspannt zu werden. Dabei nimmt auch die Temperatur ab, da Arbeit gegen die molekularen Anziehungskräfte im Arbeitsmittel verrichtet werden muss (Joule-Thomson-Effekt). Die Enthalpie bleibt konstant ( $h_4 = h_3$ ).

Im Verdampfer verdampft das Arbeitsmittel unter Aufnahme von Wärme vollständig. Dies führt zur Abkühlung des umgebenden Reservoirs. Pro Masseneinheit beträgt die aufgenommene Wärme  $\Delta q_1 = h_1 - h_4$ .

Zur Darstellung des Kreisprozesses einer Kompressionswärmepumpe verwendet man häufig das Mollier-Diagramm des Arbeitsmittels. Darin ist der Druck  $p$  gegen die spezifische Enthalpie  $h$  des Arbeitsmittels aufgetragen (die Enthalpie ist ein Maß für den Wärmeinhalt des Arbeitsmittels, sie wird im Allgemeinen mit wachsendem Druck und mit zunehmendem Gasanteil größer).

Außerdem werden die Isothermen ( $T = \text{const.}$ ) und Isentropen ( $S = \text{const.}$ ) sowie der relative Masseanteil der flüssigen Phase des Arbeitsmittels angegeben. Links von der sogenannten Siedelinie ist das Arbeitsmittel vollständig kondensiert. Rechts von der sogenannten Taulinie liegt das Arbeitsmittel als überhitzter Dampf und innerhalb beider Linien als Flüssigkeits-Gas-Gemisch vor. Die beiden Linien berühren sich im kritischen Punkt.

Zur Darstellung im Mollier-Diagramm lässt sich der oben beschriebene idealisierte Kreisprozess durch Messung der Drücke  $p_1$  und  $p_2$  hinter und vor dem Entspannungsventil und der Temperatur  $T_1$  vor dem Kompressor und  $T_3$  vor dem Expansionsventil bestimmen.

Im Experiment sind die Komponenten mit Kupferrohr zu einem geschlossenen System verbunden und auf einem Grundbrett aufgebaut. Sie können dank der übersichtlichen Anordnung unmittelbar mit der Abfolge der Zustandsänderungen im Kreisprozess der Wärmepumpe in Verbindung gebracht werden. Verdampfer und Verflüssiger sind als Kupferrohrwendeln ausgebildet und tauchen in je einen Wasserbehälter ein, der als Reservoir zur Bestimmung der aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärme dient. Zwei große Manometer zeigen die Druckverhältnisse des Kältemittels in den beiden Wärmetauschern an. Zwei Analogthermometer ermöglichen die Temperaturmessung in den beiden Wasserbehältern. Zur Messung der Temperaturen in den Kupferrohren vor dem Kompressor und vor dem Expansionsventil werden Temperatursensoren mit angepasster Messklemme eingesetzt.

Die theoretische Leistungszahl des idealisierten Kreisprozesses lässt sich aus den im Mollier-Diagramm abgelesenen spezifischen Enthalpien  $h_1$ ,  $h_2$  und  $h_3$  berechnen:

$$(1) \quad \eta_{\text{th}} = \frac{\Delta q_2}{\Delta w} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Sind die Enthalpien  $h_2$  und  $h_3$  des idealisierten Kreisprozesses sowie die dem Warmwasserreservoir pro Zeitintervall  $\Delta t$  zugeführte Wärmemenge  $\Delta Q_2$  bestimmt, so lässt sich der Massestrom des Arbeitsmittels abschätzen.

$$(2) \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_2 - h_3}$$

**AUSWERTUNG**

$T_1$  und  $p_1$  legen Punkt 1 im Mollier-Diagramm fest. Der Schnittpunkt der zugehörigen Isentropen mit der Horizontalen  $p_2 = \text{const.}$  ergibt Punkt 2. Der Schnittpunkt der Horizontalen mit der Siedelinie führt zu Punkt 3 und das Lot auf die Horizontale  $p_4 = \text{const.}$  zu Punkt 4.

Die zusätzliche Messung der Temperatur  $T_3$  gibt einen erweiterten Einblick in die in der Wärmepumpe ablaufenden Prozesse:  $T_3$  stimmt nicht mit der Temperatur überein, die auf der Temperaturskala des zugehörigen Manometers abgelesen wird. Diese Temperaturskala beruht auf der Dampfdruckkurve des Arbeitsmittels. Also zeigt die Messung, dass das Arbeitsmittel vor dem Entspannungsventil kein Gemisch aus Flüssigkeit und Gas, sondern vollständig flüssig ist.

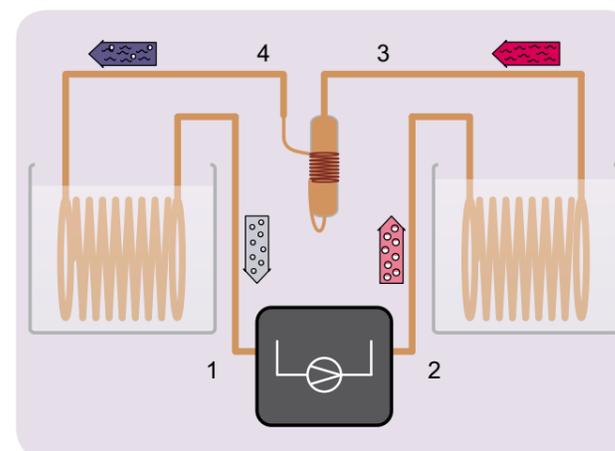


Abb. 1: Schematische Darstellung der Wärmepumpe mit Kompressor (1, 2), Verflüssiger (2, 3), Entspannungsventil (3, 4) und Verdampfer (4, 1)

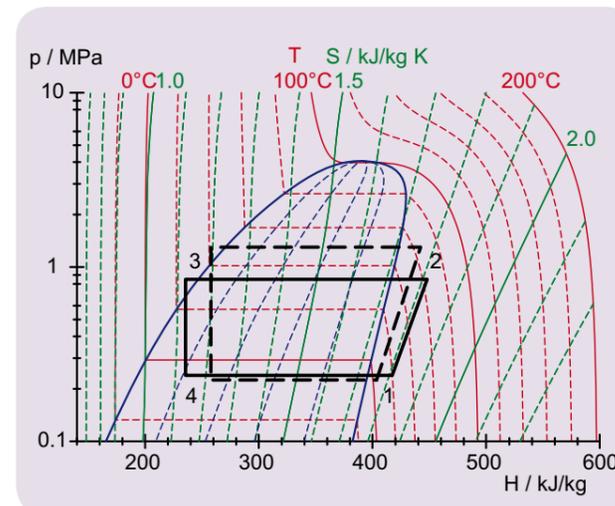


Abb. 2: Darstellung des idealisierten Kreisprozesses der Wärmepumpe im Mollier-Diagramm.