

Nr.206

Die Wärmepumpe

Sara Krieg
sara.krieg@udo.edu

Marek Karzel
marek.karzel@udo.edu

Durchführung: 20.11.2018

Abgabe: 27.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Das Prinzip der Wärmepumpe	3
1.2	Die Arbeitsweise der Wärmepumpe	4
1.3	Die Bestimmung der Kenngrößen einer realen Wärmepumpe	4
1.3.1	Die reale Güteziffer	4
1.3.2	Der Massendurchsatz	5
1.3.3	Die mechanische Kompressorleistung	5
2	Durchführung	6
3	Auswertung	6
4	Diskussion	6

1 Theorie

Ziel des Versuches ist es, die Kenngröße der Wärmepumpe zu ermitteln, indem der Transport von Wärmeenergie zwischen zwei Wärmereservoirien untersucht wird.

1.1 Das Prinzip der Wärmepumpe

Ohne äußere Einflüsse findet Temperaturänderung in Form von Wärmeabgabe vom heißeren zum kälteren Körper oder Medium statt. Durch aufgewandte (mechanische) Arbeit A kann dieser Prozess jedoch auch in anderer Richtung ablaufen.

Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik beträgt die an das wärmere Medium abgegebene Wärmemenge Q_1 , die von dem kühleren Medium aufgenommene Wärmemenge Q_2 , zuzüglich der Arbeit A . Dementsprechend gilt

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (1)$$

Die Gütezahl ν der Wärmepumpe gibt dabei das Verhältnis der abgegebenen Wärmemenge Q_1 zur aufgewandten Arbeit A an

$$\nu = \frac{Q_1}{A} \quad (2)$$

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik führt für die reduzierten Wärmemengen zu der Beziehung, dass deren Summe $\int \frac{dQ}{T}$ null beträgt. Aus dieser folgt

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (3)$$

Allerdings muss es sich für diese Beziehung um einen idealen reversiblen, d.h. umkehrbaren Prozess handeln. Vom Ideal abweichend, gilt für die technische Anwendung also die Ungleichung

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} > 0 \quad (4)$$

Aus 1 und 3 folgt

$$Q_1 = A + \frac{T_2}{T_1} \cdot Q_1,$$

aus 2, für einen reversiblen Vorgang, die ideale Güte

$$\nu_{\text{id}} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

und aus 1 und 4 für die Güte der realen Wärmepumpe

$$\nu_{\text{real}} < \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (6)$$

Aus 5 und 6 ist abzulesen, dass die Wärmepumpe für kleine Temperaturdifferenzen $T_1 - T_2$ am effizientesten arbeitet, die aufgewandte Arbeit A zur Wärmeübertragung also minimal ist.

1.2 Die Arbeitsweise der Wärmepumpe

In der Wärmepumpe fungiert ein reales Gas als Transportmedium, welches bei Wärmeaufnahme verdampft und die Wärme durch Kondensation wieder abgibt, die Wärmeenergie infolgedessen als Phasenumwandlungsenergie transportiert. Vorteilhaft ist daher die Verwendung von Gasen hoher Kondensationswärme.

Nach dem Aufbau der Wärmepumpe (Abbildung) sorgt der Kompressor K für einen Kreislauf, den das Transportgas und somit sowohl beide Wärmereservoirs, als auch ein Drosselventil D durchläuft. An diesem entsteht ein Druckunterschied $p_b - p_a$. Dabei ist das Transportgas bei Druck p_b und Temperatur T_1 flüssig und bei p_a und T_2 gasförmig.

Dem kälteren Reservoir 2 wird durch das Verdampfen des Transportgases die Verdampfungswärme L pro Gramm entzogen. Darauf wird das Gas im Kompressor K adiabatisch komprimiert, sodass dessen Druck und Temperatur steigen und es schließlich die Kondensationswärme L pro Gramm an das Reservoir 1 abgibt.

Weitere nötige Komponenten der Wärmepumpe sind ein Reiniger R, der die Blasen im flüssigen Medium entfernt, sowie ein Steuerungselement S, welches mit dem Drosselventil D gekoppelt ist und das schädliche Eindringen flüssigen Mediums in den Kompressor K über Kontrolle der Temperaturdifferenz am Ein- und Ausgang des Reservoirs 2 verhindert.

1.3 Die Bestimmung der Kenngrößen einer realen Wärmepumpe

Die Kenngrößen der realen Wärmepumpe sind die Güteziffer ν , der Massendurchsatz $\frac{dm}{dt}$, sowie der mechanische Kompressorleistung N_{mech} .

Zu der zeitabhängigen Messungen der Drücke p_a , p_b dienen gemäß Abbildung zwei jeweils zwischen dem jeweiligen Reservoirs und dem Drosselventil D installierte Manometer, für die Temperaturverläufe zwei digitale Thermometer in den Reservoirs und für die Leistungsaufnahme des Kompressors ein Wattmeter.

Die Reservoirs befinden sich in thermisch isolierten Gefäßen und werden während der Messung von zwei Rührmotoren umgerührt.

Im Folgenden können Differentialquotienten anstelle von Differenzenquotienten verwendet werden, da sich die Messreihen der Temperaturen als einfache, zeitabhängige Funktionen beschreiben lassen.

1.3.1 Die reale Güteziffer

Mit der Messung der Zeit T_1 in Abhängigkeit von der Zeit t lässt sich die reale Güteziffer als

$$\nu = \frac{dQ_1}{dt} \cdot \frac{1}{N} \quad (7)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = (m_1 c_w + m_k c_k) \cdot \frac{dT_1}{dt} \quad (8)$$

bestimmen.

Dabei beschreiben m_1 die Wassermasse in Reservoir 1 und m_k die der Kupferschlange und des Eimers, mit den Wärmekapazitäten c_w des Wassers und c_k der Kupferschlange und des Eimers. N gibt die am Wattmeter abgelesene, über das Zeitintervall Δt gemittelte Leistungsaufnahme des Kompressors an.

1.3.2 Der Massendurchsatz

Mithilfe der zeitabhängigen Messung der Temperatur T_2 lässt sich, bei bekannter Verdampfungswärme L , der Massendurchsatz durch

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dQ_2}{dt} \cdot \frac{1}{L} \quad (9)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = (m_2 c_w + m_k c_k) \cdot \frac{dT_2}{dt} \quad (10)$$

bestimmen.

Fast analog zur vorherigen Bestimmung der Güteziffer wird nun die Wassermasse m_2 des Reservoirs 2 benötigt.

1.3.3 Die mechanische Kompressorleistung

Bei der Komprimierung eines Gasvolumens V_a zu dem Volumen V_b verrichtet der Kompressor die Arbeit

$$A = - \int_{V_a}^{V_b} p \, dV . \quad (11)$$

Für eine adiabatische Komprimierung gilt die Poissonsche Gleichung

$$p_a V_a^\kappa = p_b V_b^\kappa = p V^\kappa , \quad (12)$$

sodass für A

$$\begin{aligned} A &= -p_a V_a^\kappa \int_{V_a}^{V_b} V^{-\kappa} \, dV = \frac{1}{\kappa - 1} p_a V_a^\kappa (V_b^{-\kappa+1} - V_a^{-\kappa+1}) \\ &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) V_a \end{aligned} \quad (13)$$

folgt und für die mechanische Kompressionsleistung

$$\begin{aligned} N_{\text{mech}} &= \frac{dA}{dt} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{dV_a}{dt} \\ &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{1}{\rho} \frac{dm}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

mit Dichte ρ des Transportmediums unter dem Druck p_a , die sich mit der idealen Gasgleichung unter den Normalbedingungen $p = 1 \text{ bar}$ und $T = 0^\circ\text{C}$ bestimmen lässt.

2 Durchführung

Es wird eine Apparatur, wie in Abbildung dargestellt, verwendet.

Zuerst werden die beiden Gefäße der Reservoirs mithilfe von Messkolben jeweils mit 3 L Wasser gefüllt.

Daraufhin werden minütlich an den Manometern und digitalen Thermometern die Drücke p_a , p_b und Temperaturen T_1 , T_2 abgelesen. Zusätzlich wird dem Wattmeter die Leistungsaufnahme des Kompressors entnommen. Die Messung wird solange durchgeführt, bis T_1 eine Temperatur von 50°C erreicht.

3 Auswertung

4 Diskussion