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

Ziel des Versuches ist es, die Kenngröße der Wärmepumpe zu ermitteln, indem der Transport von Wärmeenergie zwischen zwei Wärmereservoiren 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 Wärmemeng Q_2, zuzüglich der Arbeit A. Dementsprechend gilt

$$Q_1 = Q_2 + A \tag{1}$$

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

$$\nu = \frac{Q_1}{A} \tag{2}$$

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

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \tag{3}$$

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

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} > 0 \tag{4}$$

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

$$\nu_{\text{id}} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \tag{5}$$

und aus 1 und 4 für die Güte der realen Wärmepumpe

$$\nu_{\text{real}} < \frac{T_1}{T_1 - T_2} \ . \tag{6}$$

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

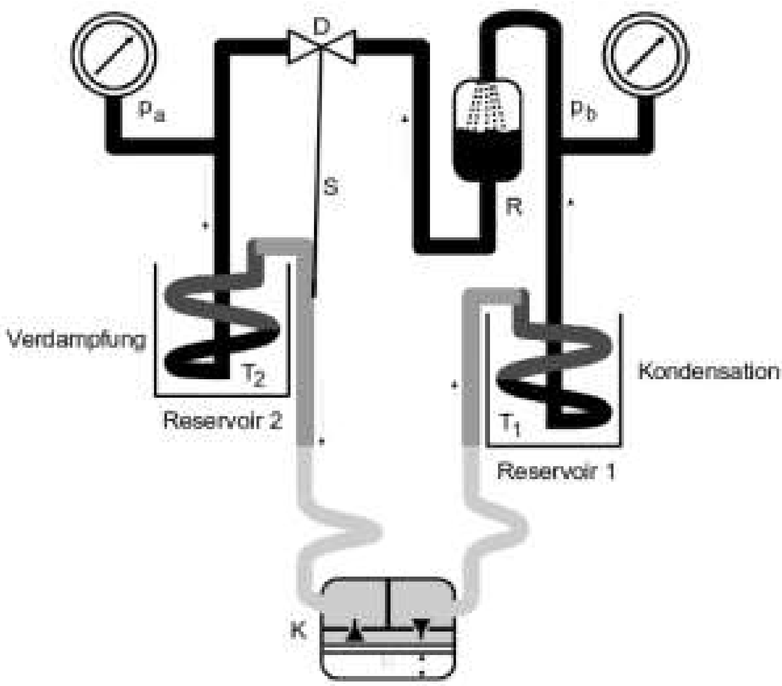

Abbildung 1: Aufbau einer Wärmepumpe

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 1) sorgt der Kompressor K für einen Kreislauf, den das Transportgas und somit sowohl beide Wärmereservoires, 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 Reservoire 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 Reservoire 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 Reservoires 2 verhindert.

1.3 Die Bestimmung der Kenngrößen einer realen Wärmepumpe

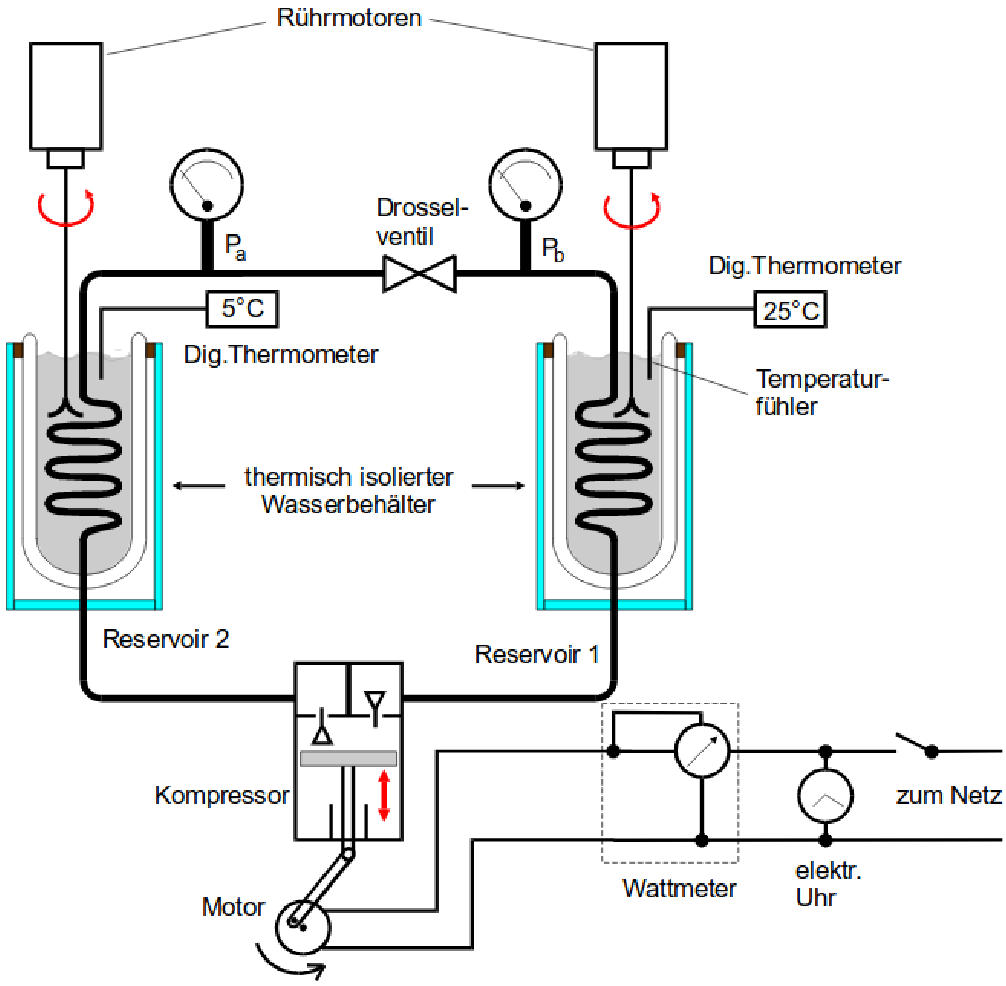

Abbildung 2: Aufbau der Messapparatur

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 2 zwei jeweils zwischen dem jeweiligen Reservoires und dem Drosselventil D installierte Manometer, für die Temperaturverläufe zwei digitale Thermometer in den Reservoires und für die Leistungsaufnahme des Kompressors ein Wattmeter.

Die Reservoires 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

$$\nu = \frac{\mathrm{d}Q_1}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{1}{N} \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}Q_1}{\mathrm{d}t} = (m_1 c_\mathrm{w} + m_\mathrm{k} c_\mathrm{k}) \cdot \frac{\mathrm{d}T_1}{\mathrm{d}t} \tag{8}$$

bestimmen.
Dabei beschreiben m_1 die Wassermasse in Reservoire 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

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}Q_2}{\mathrm{d}t} \cdot \frac{1}{L} \tag{9}$$

$$\frac{\mathrm{d}Q_2}{\mathrm{d}t} = (m_2 c_\mathrm{w} + m_\mathrm{k} c_\mathrm{k}) \cdot \frac{\mathrm{d}T_2}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

bestimmen.
Fast analog zur vorherigen Bestimmung der Güteziffer wird nun die Wassermasse m_2 des Reservoires 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

$$A = -\int_{V_\mathrm{a}}^{V_\mathrm{b}} p \,\mathrm{d}V \ . \tag{11}$$

Für eine adiabatische Komprimierung gilt die Poissonsche Gleichung

$$p_{\mathrm{a}} V_{\mathrm{a}}^{\kappa} = p_{\mathrm{b}} V_{\mathrm{b}}^{\kappa} = p V^{\kappa} \quad , \tag{12}$$

sodass für A

$$\begin{aligned} A &= -p_{\mathrm{a}} V_{\mathrm{a}}^{\kappa} \int_{V_{\mathrm{a}}}^{V_{\mathrm{b}}} V^{-\kappa} \,\mathrm{d}V = \frac{1}{\kappa - 1} p_{\mathrm{a}} V_{\mathrm{a}}^{\kappa} \left(V_{\mathrm{b}}^{-\kappa+1} - V_{\mathrm{a}}^{-\kappa+1} \right) \\ &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_{\mathrm{b}} \sqrt[\kappa]{\frac{p_{\mathrm{a}}}{p_{\mathrm{b}}}} - p_{\mathrm{a}} \right) V_{\mathrm{a}} \end{aligned} \tag{13}$$

folgt und für die mechanische Kompressionsleistung

$$\begin{aligned} N_{\mathrm{mech}} = \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_{\mathrm{b}} \sqrt[\kappa]{\frac{p_{\mathrm{a}}}{p_{\mathrm{b}}}} - p_{\mathrm{a}} \right) \frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t} \\ &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_{\mathrm{b}} \sqrt[\kappa]{\frac{p_{\mathrm{a}}}{p_{\mathrm{b}}}} - p_{\mathrm{a}} \right) \frac{1}{\rho} \frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} \end{aligned} \tag{14}$$

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

2 Durchführung

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

Zuerst werden die beiden Gefäße der Reservoires 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 $50\,^{\circ}\mathrm{C}$ erreicht.

3 Auswertung

4 Diskussion