

V206

# **Wärmepumpe**

Annika Burkowitz  
annika.burkowitz@tu-dortmund.de

Phillip Alexander Greve  
phillip.greve@tu-dortmund.de

Durchführung: 27.10.2015

Abgabe: 03.11.2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Prinzip einer Wärmepumpe und ihre Güteziffer . . . . .	3
2.2	Aufbau und Funktionsweise einer Wärmepumpe . . . . .	4
2.3	Kenngößen einer Wärmepumpe . . . . .	5
2.3.1	Bestimmung der realen Güteziffer $v$ . . . . .	5
2.3.2	Bestimmung des Massendurchsatzes . . . . .	5
2.3.3	Bestimmung der mechanischen Kompressorleistung $N_{\text{mech}}$ . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>7</b>
	<b>Literatur</b>	<b>7</b>

# 1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird der Transport von Wärmeenergie von einem kälteren zu einem wärmeren Reservoir unter Aufbringen mechanischer Arbeit untersucht. Ein solches System nennt sich Wärmepumpe. Wichtige Kenngrößen sind die Gütezahl und der Massendurchsatz, welche in diesem Versuch bestimmt werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Prinzip einer Wärmepumpe und ihre Gütezahl

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass die Entropie in einem abgeschlossenen System niemals abnehmen kann, verläuft ein Wärmeaustausch zwischen zwei Reservoiren unterschiedlicher Temperatur immer vom Wärmeren zum Kälteren hin. Es ist jedoch möglich die Richtung des Wärmetransports umzukehren, wenn man dem System Energie in Form von mechanischer Arbeit zuführt. Ist dies der Fall, so spricht man von einer Wärmepumpe.

Aus dem Verhältnis der aufzuwendenden Arbeit  $A$  und der an das wärmere Reservoir abgegebenen Wärmemenge  $Q_1$  resultiert die Gütezahl  $v$  einer Wärmepumpe. Da nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik die totale Energie in einem abgeschlossenen System erhalten bleiben muss, muss die abgegebene Wärmemenge  $Q_1$  gleich der Summe aus der aufgewandten Arbeit und der aus dem kälteren Reservoir entnommenen Wärmemenge  $Q_2$  sein:

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

Damit ist

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

der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe.

Unter der Voraussetzung, dass sich die Temperaturen in den Reservoiren während der Wärmeübertragung nicht ändern und der Prozess reversibel verläuft, folgt aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, dass die Summe der reduzierten Wärmemengen  $\int \frac{dQ}{T}$  verschwindet:

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

Reversibilität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Prozess des Energieaustausches zu jedem Zeitpunkt verlustfrei umgekehrt werden kann. Dies ist jedoch nur bei idealen Systemen gegeben, so dass für den irreversiblen, realen Fall nur die Ungleichung

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

gilt.

Verwendet man Gleichung (3) in (1), so ergibt sich nach (2) die Gütezahl für eine ideale Wärmepumpe:

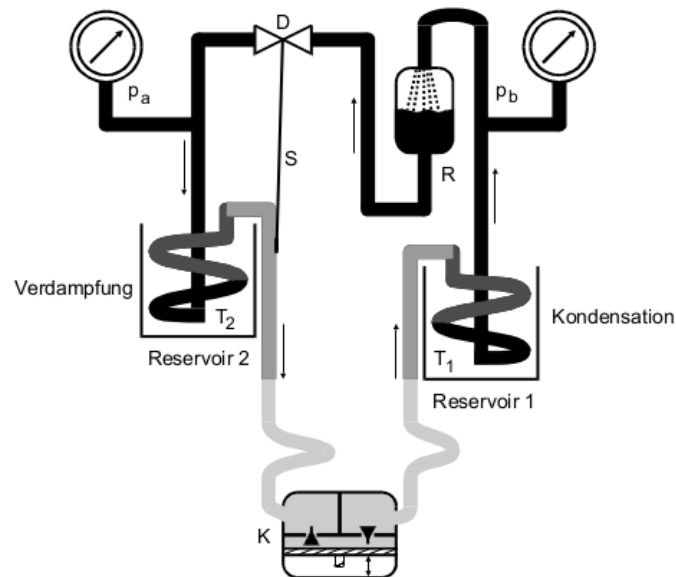
$$v_{\text{ideal}} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (5)$$

Analog gilt mit (1) und (4) nach Gleichung (2) für die reale Wärmepumpe

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

Daraus kann man leicht erkennen, dass die Wärmepumpe einen besseren Wirkungsgrad hat, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen den Reservoiren ist. Wärmepumpen werden beispielsweise in der Heiztechnik verwendet und haben dabei gegenüber anderen Verfahren den großen Vorteil, dass die gewonnene Wärmemenge auch größer als die geleistete mechanische Arbeit sein kann. < Gleichung? >

## 2.2 Aufbau und Funktionsweise einer Wärmepumpe



**Abbildung 1:** Aufbau einer Wärmepumpe ( $p_b > p_a; T_1 > T_2$ ).

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau einer Wärmepumpe zu sehen. Wichtige Elemente sind die Reservoir 1 und 2, welche mit einer genau definierten Menge Wasser gefüllt sind, und in denen sich Kupferspiralen für den Wärmeaustausch zwischen Transportmedium und Wasser befinden. Bei dem Transportmedium handelt es sich um ein reales Gas, welches eine möglichen hohe Kondensationswärme besitzt. In unserem Fall wurde Dichlordifluormethan ( $\text{Cl}_2\text{F}_2\text{C}$ ) verwendet. Das Gas ist bei Temperatur  $T_1$  und dem Druck  $p_b$  flüssig und bei  $T_2$  und Druck  $p_a$  gasförmig. Das flüssige Gas verdampft in Reservoir 2 und entzieht diesem die Verdampfungswärme  $L$  pro Gramm.

Infolgedessen sinkt die Temperatur  $T_2$  in Reservoir 2. Der Kompressor K komprimiert das Gas, wodurch der Druck  $p_b$  steigt, so dass das Gas in Reservoir 1 kondensiert und dabei die zuvor aufgenommene Verdampfungswärme als Kondensationswärme  $L$  pro Gramm abgibt. Dadurch steigt die Temperatur  $T_1$  in Reservoir 1. Zwischen den Reservoirs liegt das Drosselventil D, welches durch Strömungswiderstände den Druckunterschied zwischen  $p_b$  und  $p_a$  erzeugt. Der Reiniger R und die Steuerungsvorrichtung S gewährleisten eine störungsfreien Funktionsweise. Der Reiniger entfernt verbliebene Gasreste aus dem flüssigen Medium, die Steuerungsvorrichtung regelt den Durchlass des Drosselventils.

## 2.3 Kenngrößen einer Wärmepumpe

Zur Beurteilung einer Wärmepumpe ist ihre Güteziffer  $v$ , der Massendurchsatz  $\frac{dm}{dt}$  des Transportmediums und der Wirkungsgrad des Kompressors von Interesse. Wie diese Kenngrößen aus den Messwerten bestimmt werden können wird nachfolgend beschrieben.

### 2.3.1 Bestimmung der realen Güteziffer $v$

Aus den gemessenen Temperaturen  $T_1$  pro Zeitintervall  $\Delta t$  berechnet man die pro Zeitintervall gewonnene Wärmemenge

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = (m_1 c_w + m_k c_k) \frac{\Delta T_1}{\Delta t}. \quad (7)$$

Dabei ist  $m_1 c_w$  die Wärmekapazität des Wassers in Reservoir 1 und  $m_k c_k$  die Wärmekapazität der Kupferschlange und des Behälters gemeinsam. Mit der über  $\Delta t$  gemittelten Leistungsaufnahme des Kompressors  $N$  ergibt sich für die Güteziffer mit (7)

$$v = \frac{\Delta Q_1}{N \Delta t} = \frac{m_1 c_w + m_k c_k}{N} \frac{\Delta T_1}{\Delta t} \quad (8)$$

### 2.3.2 Bestimmung des Massendurchsatzes

Gleichung (7) lässt sich analog für Reservoir 2 für  $\Delta T_2$  aufstellen:

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = (m_2 c_w + m_k c_k) \frac{\Delta T_2}{\Delta t}. \quad (9)$$

Die Wärmeentnahme geschieht in Form der Verdampfungswärme  $L$  pro Massen- und Zeiteinheit. Der Massendurchsatz lässt sich mit (9) berechnen, wenn  $L$  bekannt ist:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{L \Delta t} = \frac{m_2 c_w + m_k c_k}{L} \frac{\Delta T_2}{\Delta t} \quad (10)$$

### 2.3.3 Bestimmung der mechanischen Kompressorleistung $N_{\text{mech}}$

Die Arbeit  $A_{\text{mech}}$ , die von dem Kompressor verrichtet wird, wenn er ein Gasvolumen  $V_a$  auf das Volumen  $V_b$  verdichtet, ist

$$A_{\text{mech}} = - \int_{V_a}^{V_b} p dV \quad (11)$$

Unter der idealisierten Annahme, dass die Kompression des Gases adiabatisch erfolgt, gilt die Poissonsche Gleichung

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

mit  $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ ,  $\kappa > 1$  und den Molwärmen  $C_p$  (für konstanten Druck) und  $C_v$  (für konstantes Volumen). Dies kann man nach  $p$  umformen und in Gleichung (11) einsetzen. Für  $A_{\text{mech}}$  erhält man dann

$$A_{\text{mech}} = -p_a V_a^\kappa \int_{V_a}^{V_b} V^{-\kappa} dV = \frac{1}{\kappa - 1} \left( p_b^\kappa \sqrt{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) V_a \quad (13)$$

und für die mechanische Kompressorleistung

$$N_{\text{mech}} = \frac{\Delta A_{\text{mech}}}{\Delta t} = \frac{1}{\kappa - 1} \left( p_b^\kappa \sqrt{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{1}{\rho} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (14)$$

$\rho$  ist dabei die Dichte des Gases bei dem Druck  $p_a$ . Die Bestimmung von  $\rho$  ist über die Ideale Gasgleichung  $pV = Nk_b T$  und  $\rho_0$ , also der Dichte bei Normalbedingungen möglich. [1]

### 3 Durchführung

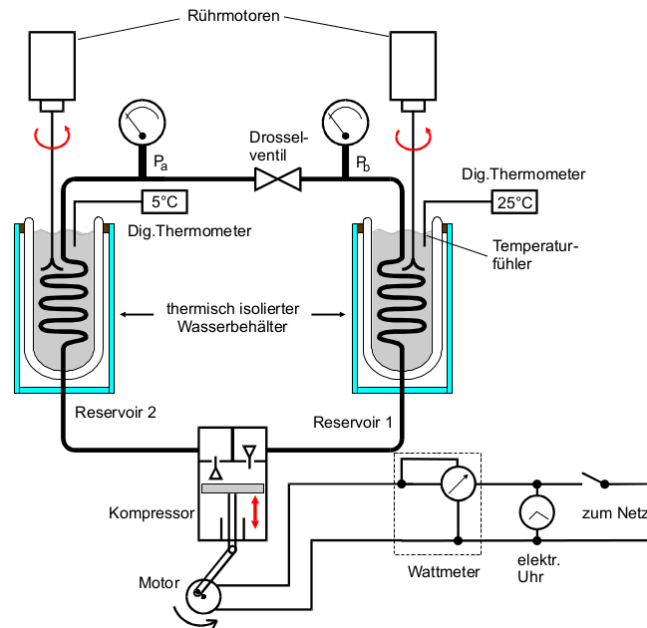


Abbildung 2: Aufbau der Messapparatur.

Zu Beginn werden die Reservoirs 1 und 2 mit je drei Litern Wasser gefüllt. Um die Menge genau messen zu können, wird ein Messkolben mit einem Fassungsvermögen von

einem Liter verwendet. Es werden der Kompressor und die Rührmotoren, die dafür sorgen, dass die Temperatur in den Behältern immer gleichmäßig verteilt ist, angeschaltet. Nun werden im Abstand von einer Minute die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ , die Drücke  $p_a$  und  $p_b$ , sowie die Leistungsaufnahme  $N$  des Kompressors abgelesen. Dies wird solange wiederholt, bis die Temperatur  $T_1$  50°C erreicht hat. Da die Manometer bei Umgebungsdruck auf 0 Bar geeicht sind, muss auf alle abgelesenen Drücke 1 Bar addiert werden.

## 4 Auswertung

In der folgenden Tabelle sind alle Messwerte aufgeführt. Die Temperaturverläufe sind in dem folgenden Diagramm dargestellt und mit einer linearen Ausgleichstrechnung approximiert.

## 5 Diskussion

Bei der Messung gab es bei den Temperaturen eine Abweichung bei Minute 10. Hier die Temperatur gesunken was an dem Defekten und nur zeitweise funktionierenden Rührer des Reservoir 1 liegen könnte. Bei dem Berechnen der Güteziffern ist aufgefallen, dass die reale Güteziffer nur ein Bruchteil der idealen ist. Das liegt daran, dass die Isolierung mangelhaft ist und der Prozess nicht vollkommen reversibel ist wie für eine ideale Wärmepumpe gefordert. Die mangelhafte Isolierung und die damit beeinflussten Messwerte, beeinträchtigten die Genauigkeit der berechneten Werte.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zur Wärmepumpe*. 2015.