

# **Versuch 206**

## **Die Wärmepumpe**

Jonah Nitschke  
lejonah@web.de

Sebastian Pape  
sepa@gmx.de

Durchführung: 15.11.2016

Abgabe: 22.11.2016

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theorie</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Bestimmung der realen Güteziffer $\nu$ . . . . .                     | 4         |
| 2.2      | Bestimmung des Massendurchsatzes . . . . .                           | 4         |
| 2.3      | Bestimmung der mechanischen Kompressorleistung $N_{mech}$ . . . . .  | 5         |
| <b>3</b> | <b>Aufbau und Durchführung</b>                                       | <b>5</b>  |
| 3.1      | Aufbau . . . . .   | 5         |
| 3.2      | Durchführung . . . . .   | 6         |
| <b>4</b> | <b>Auswertung</b>  | <b>7</b>  |
| 4.1      | Temperaturverläufe . . . . .   | 7         |
| 4.1.1    | Ausgleichsfunktion . . . . .   | 7         |
| 4.2      | Differentialquotient der nicht-linearen Ausgleichsrechnung . . . . . | 8         |
| 4.3      | Bestimmung der Güteziffer $\nu$ . . . . .                            | 9         |
| 4.4      | Bestimmung des Massendurchsatzes . . . . .                           | 10        |
| 4.5      | Bestimmung der mechanische Kompressorleistung $N_{mech}$ . . . . .   | 11        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b>  | <b>12</b> |
| <b>6</b> | <b>Messdaten</b>   | <b>13</b> |

# 1 Einführung

Im folgendem Versuch geht es um den Transport von Wärmeenergie zwischen zwei Wärmereservoirien. Im Gegensatz zu der allgemein gültigen Regel, wird hier nun mithilfe einer Wärmepumpe Wärmeenergie von einem Reservoir mit kaltem Wasser in ein Reservoir mit warmen Wasser transponiert. Während des Versuchs werden verschiedene Messwerte aufgenommen, um hinterher das Verhältniss von Temperatur, Druck sowie aufgewandter Arbeit zu beurteilen.

## 2 Theorie

Damit nun in dem folgendem Versuch der Wärmefluss von dem kälteren Reservoir zu dem wärmeren Reservoir realisiert werden kann, muss zusätzliche Arbeit aufgewandt werden. Für diesen Prozess wird eine Wärmepumpe benutzt, deren Aufbau später noch in Kapitel 3 erläutert wird und deren Bedingungen zur Vereinfachung der Berechnungen als idealisiert betrachtet werden.

Um das Verhältnis von transponierter Wärmemenge zu aufgewandter Arbeit anzugeben, wird die Gütezahl  $\nu$  eingeführt. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (1) gilt für den Wärmenergietransport zwischen zwei Medien:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_2 + A \quad (2)$$

Die in unserem Fall geltende 2. Formel (2) sagt, dass die vom Transportmedium am Reservoir 2 abgegebene Wärmeenergie  $Q_1$ , der Summe der aus Reservoir 1 entnommenen Wärmeenergie  $Q_2$  und der aufgewandten Arbeit  $A$  entsprechen muss. Die Gütezahl der Wärmepumpe kann somit über folgende Formel errechnet werden:

$$\nu = \frac{Q_1}{A} \quad (3)$$

Nach dem 2.HS der Thermodynamik lässt sich zudem die Beziehung zwischend den Wärmemengen und Temperaturen der beiden Reservoirie durch folgende Formel ausdrücken:

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

Für die Gültigkeit dieser Formel muss jedoch gelten, dass der stattfindende Übertragungsprozess reversibel sei. Somit müsste die aufgewandte mechanische Energie jederzeit

vollständig zurückgewonnen werden können. Da es sich dabei um eine idealisierte Annahme handelt, die in der Realität nie zutrifft, muss (4) umformuliert werden:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} > 0 \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (1) bis (4) folgt somit:

$$\nu_{id} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

$$\nu_{real} = \frac{Q_1}{A} < \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (7)$$

Die Gleichungen (6) und (7) zeigen, dass eine Wärmepumpe umso effektiver eingestuft werden kann, je kleiner die Differenz zwischen  $T_1$  und  $T_2$  ist.

## 2.1 Bestimmung der realen Güteziffer $\nu$

Mit den Werten von  $T_1$  kann nun die pro Zeiteinheit gewonnene Wärmemenge berechnet werden:

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

$$\nu = \frac{\Delta Q_1}{\Delta t N} \quad (9)$$

$m_1 c_w$  und  $m_k c_k$  entsprechen dabei den Wärmekapazitäten der Kupferschlange und des Eimers. Für die Güteziffer wird noch  $N$  als die zeitlich gemittelte Leistung benötigt.

## 2.2 Bestimmung des Massendurchsatzes

Mit den Werten von  $T_2$  und der Verdampfungswärme  $L$  kann nun der Massendurchsatz  $\Delta m$  berechnet werden:

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

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = L \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (11)$$

### 2.3 Bestimmung der mechanischen Kompressorleistung $N_{mech}$

Um die mechanische Kompressorleistung  $N_{mech}$  zu bestimmen muss vorher die vom Kompressor aufgebrachte Arbeit zur Komprimierung des Volumens  $V_a$  auf das Volumen  $V_b$  berechnet werden:

$$A_m = \frac{1}{\kappa - 1} \left( p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) V_a \quad (12)$$

Für den Kompressor wird nun näherungsweise angenommen, dass es sich um eine adiabatische Komprimierung handelt, sodass die Poisson-Gleichung als Zusammenhang zwischen Druck und Volumen gilt:

$$p_a V_a^\kappa = p_b V_b^\kappa = p V^\kappa. \quad (13)$$

Mit der Dichte  $\rho$  im gasförmigen Zustand, also beim Druck  $p_a$ , kann nun  $N_{mech}$  berechnet werden:

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

## 3 Aufbau und Durchführung

### 3.1 Aufbau

Die verwendete Wärmepumpe besteht aus mehreren Komponenten. Grundlegend sind zwei thermisch isolierte Reservoirs mit einer festgelegten Wassermenge. Durch beide Reservoirs läuft ein Kupferrohr, in dem sich das Gas Dichlodifluormethan befindet. Der Kompressor erzeugt mithilfe der eingebrachten Leistung  $L$  in beiden Hälften unterschiedliche Drücke, indem er das Gas "adiabatisch" komprimiert. Das anfangs kondensierte Gas durchströmt zuerst das Kupferrohr in Reservoir 2 und verdampft unter dem dort herrschenden Druck  $p_a$  bei der Temperatur  $T_2$ . Dabei entzieht es dem Reservoir die Verdampfungswärme und wird danach weiter zum Kompressor geleitet. Dort wird es solange komprimiert, bis der Druck  $p_b$  im Reservoir 1 hoch genug ist, um das Gas bei der Temperatur  $T_1$  kondensieren zu lassen. Die entstehende Kondensationswärme wird dort ans Wasser abgegeben, sodass dieses sich erhitzt. In einem nachgeschalteten Reiniger wird die Flüssigkeit von Gasresten getrennt, um eine blasenfreie Flüssigkeitszufuhr zu dem Drosselventil zu gewährleisten. Damit in den Kompressor keine Flüssigkeitsreste gelangen, wird eine Steuervorrichtung angebracht. Die über Temperaturdifferenzen zwischen Ausgang und Eingang des Kompressors die Flüssigkeitszufuhr steuert, sodass eine eventuell zu niedrige Verdampfungsrate in Reservoir 2 ausgeglichen werden kann.

### 3.2 Durchführung

Am Anfang des Experimentes werden die beiden Reservoirs mithilfe eines Messkolbens mit 4l Wasser befüllt. Nach Einbau der beiden Reservoirs in die Apparatur werden Rührstäbe und Kompressor eingeschaltet. Um die beiden Reservoirs optimal abzudichten, werden unter die beiden Behälter noch Holzkeile geschoben. Nun werden im Abstand von einer Minute die verschiedenen Drücke und Temperaturen von Reservoir 2  $[p_a, T_2]$  und Reservoir 1  $[p_b, T_1]$ , sowie die durch den Kompressor eingebrachte Leistung  $L$  gemessen und notiert. Bei dem Druck wird dabei die innere schwarze Skala abgelesen und am Ende wird bei allen Werten noch  $1\text{bar}$  hinzuaddiert. Sobald die Temperatur im Reservoir 2 die  $50^\circ\text{C}$  Marke erreicht, wird der Kompressor wieder ausgeschaltet.

## 4 Auswertung

In der Auswertung werden die gemessenen Temperaturen, Drücke und Leistungen als fehlerfrei angenommen.

### 4.1 Temperaturverläufe

Die während des Versuches gemessenen Temperaturen von Reservoir 1 und Reservoir 2 sind in dem Diagramm 1 dargestellt. Die Temperatur in K wurde gegenüber der Zeit in s aufgetragen.

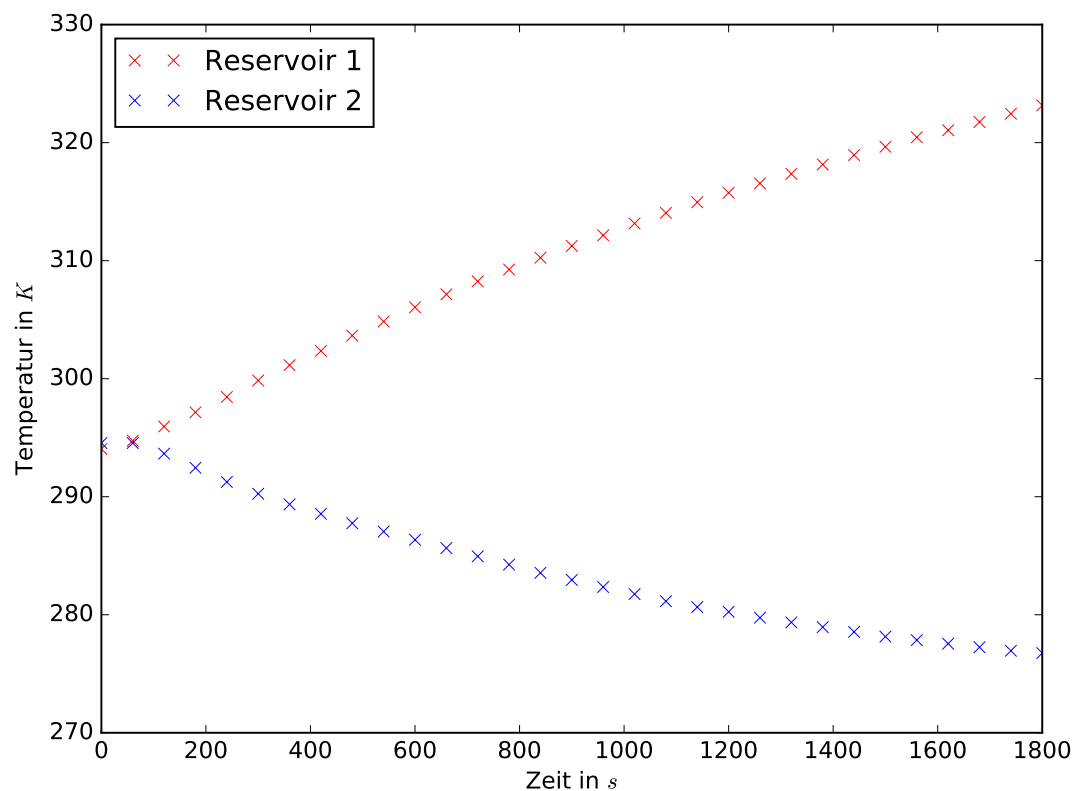


Abbildung 1: Temperaturverlauf

#### 4.1.1 Ausgleichsfunktion

Den Temperaturverlauf der beiden Reservoirs wurde darüberhinaus durch eine nicht-lineare Ausgleichsrechnung dargestellt. Hierfür wurde die quadratische Funktion  $T(t) =$

$A \cdot t^2 + B \cdot t + C$  verwendet. Der Fit wurde mit Hilfe von *curve\_fit* erstellt, wobei die Fehler aus der Kovarianz-Matrix von *curve\_fit* entstammen. An der Ausgleichskurve wird deutlich, dass sich die Temperaturverläufe relativ präzise approximieren lassen. Die Fehler sind in der selben Einheit, wie der zugehörige Parameterwerte.

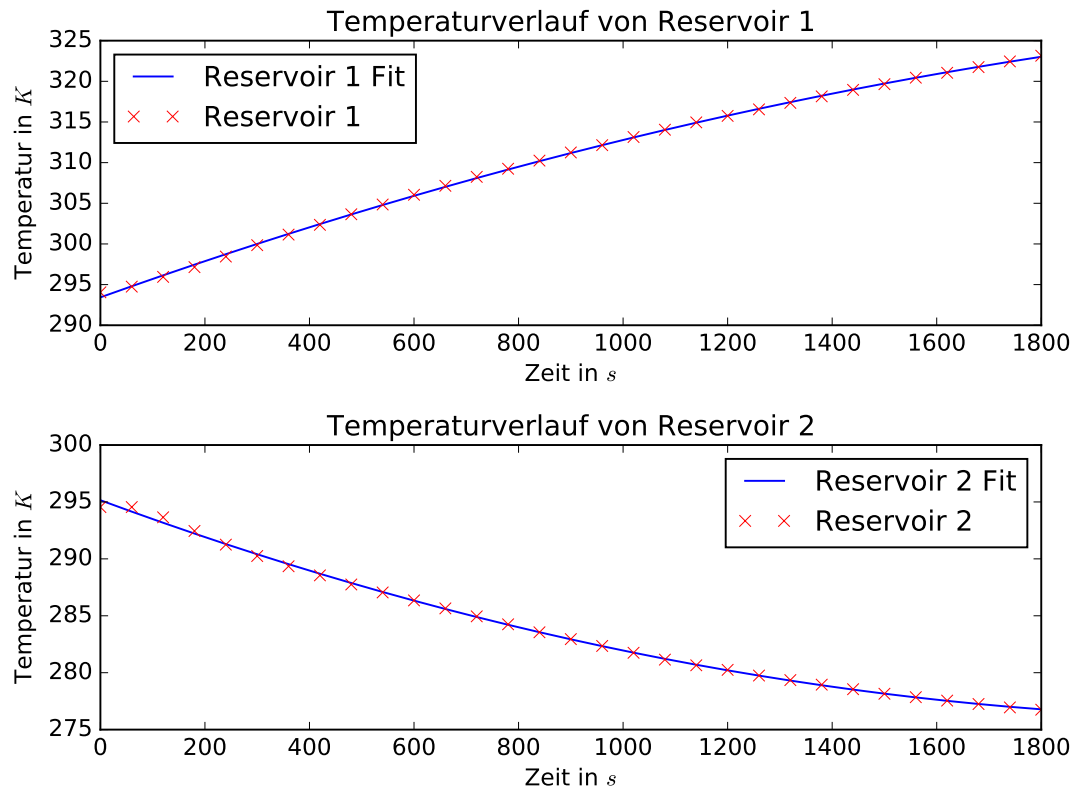


Tabelle 1: Parameter der Ausgleichsrechnung

| Reservoir | Parameter $A$ in $\mu \frac{K}{s^2}$ | Fehler | Parameter $B$ in $\frac{K}{s}$ | Fehler   | Parameter $C$ in K | Fehler |
|-----------|--------------------------------------|--------|--------------------------------|----------|--------------------|--------|
| 1         | -3,643                               | 0,116  | 0,023                          | 0,000 22 | 29,343             | 0,0842 |
| 2         | 3,748                                | 0,127  | -0,017                         | 0,000 24 | 29,515             | 0,0923 |

## 4.2 Differentialquotient der nicht-linearen Ausgleichsrechnung

Der Differentialquotient  $\frac{d}{dt}T(t)$  der Ausgleichskurve ergibt sich aus:

$$\frac{d}{dt}T(t) = \frac{d}{dt}(A \cdot t^2 + b \cdot t + C) = 2A \cdot t + B$$



Der Differentialquotient wurde für die Zeiten 360s, 720s, 1080s und 1440s berechnet. Daraus ergeben sich die Werte:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}T_1(360) &= 0,0204 \pm 0,00023 & \frac{d}{dt}T_2(360) &= -0,0143 \pm 0,00025 \\ \frac{d}{dt}T_1(720) &= 0,0177 \pm 0,00027 & \frac{d}{dt}T_2(720) &= 0,0177 \pm 0,00030 \\ \frac{d}{dt}T_1(1080) &= 0,151 \pm 0,00033 & \frac{d}{dt}T_2(1080) &= 0,151 \pm 0,00036 \\ \frac{d}{dt}T_1(1440) &= 0,0125 \pm 0,00040 & \frac{d}{dt}T_2(1440) &= 0,0125 \pm 0,00044\end{aligned}$$

Die Fehler werden nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wie folgt ermittelt:

$$\Delta \frac{d}{dt}T(t) = \sqrt{\left(\frac{d^2T(t)}{dtA} \cdot \Delta A\right)^2 + \left(\frac{d^2T(t)}{dtB} \cdot \Delta B\right)^2}$$

Dabei ist  $\Delta x$  jeweils der Fehler des hinterstehenden Parameters.

### 4.3 Bestimmung der Gütezahl $\nu$

In dem folgenden Abschnitt wird die Gütezahl  $\nu$  der verwendeten Wärmepumpe bestimmt. Diese ergibt sich aus der Formel (9). Für die Wärmekapazität der Apparatur wurde der Wert  $750 \frac{\text{J}}{\text{K}}$  verwendet. Dieser war an dem Versuchsaufbau angegeben. Die Wärmekapazität des Wassers ist für einen Liter mit  $4182 \frac{\text{J}}{\text{K}}$  zu bemessen. In dem Versuch wurden die Reservoirs mit 4l Wasser befüllt. Mit der Ausgleichsgeraden ergibt sich für  $\nu$  die Formel:

$$\nu = \frac{1}{N}(m_1 c_\omega + m_k c_k)(2A \cdot t + B) \quad (15)$$

In der Formel (15) sind die Parameter  $A$  und  $B$  die einzigen fehlerbehafteten Größen. Die Fehler wurden mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet.

Tabelle 2: Gütezahl

| <i>Zeit</i> | $\nu_{real}$ | <i>Fehler</i> | $\nu_{ideal}$ |
|-------------|--------------|---------------|---------------|
| 360         | 2,826        | 0,0322        | 25,521        |
| 720         | 2,564        | 0,0395        | 13,230        |
| 1080        | 2,115        | 0,0464        | 9,546         |
| 1440        | 1,748        | 0,0557        | 7,895         |

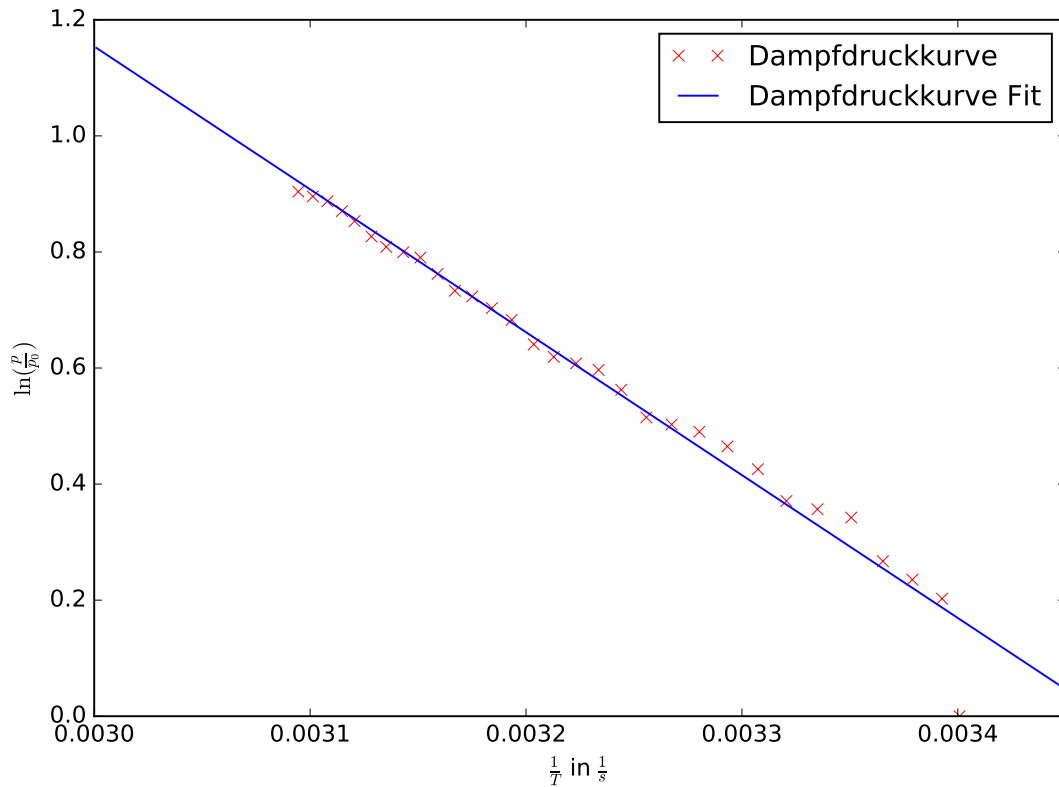
Da nur  $A$  und  $B$  mit Fehlern behaftet sind ergibt sich die folgende Fehlerformel.

$$\Delta \nu = \sqrt{\left(\frac{d\nu}{dA} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{d\nu}{dB} \Delta B\right)^2}$$

Die ideale Gütezahl ist fehlerfrei, da sie über die Temperaturen errechnet wurde. Diese ergibt sich aus Formel (6).

#### 4.4 Bestimmung des Massendurchsatzes

Damit der Massendurchsatz bestimmt werden kann, muss zunächst die Verdampfungswärme  $L$  ermittelt werden. Die Verdampfungswärme ist über  $L = R \cdot T \log(\frac{p_0}{p})$  zu berechnen. Dabei ist  $R$  die allgemeine Gaskonstante,  $T$  die momentane Temperatur,  $p_0$  der Anfangswert des Druckes und  $p$  der momentane Druck ist. In dem folgenden Diagramm sind die  $\log(\frac{p_0}{p})$  gegenüber den reziproken Temperaturen aufgetragen.



(a) Graph zur Bestimmung der Verdampfungswärme

Die Ausgleichsgerade ergibt sich aus der Steigung  $m = -2462,019$  und dem Achsenabschnitt  $n = 8,540$ . Die Ausgleichsrechnung wurde mit Hilfe von *curve\_fit* bewerkstelligt. Die Parameter  $m$  und  $n$  sind mit den Fehlern  $\Delta m = 68,222$  und  $\Delta n = 0.220$  behaftet. Aus der Steigung  $m$  und der allgemeinen Gaskonstanten  $R$  lässt sich die Verdampfungswärme über  $L = -mR$  errechnen. Somit ergibt sich für die Verdampfungswärme schließlich  $L = (20470,715 \pm 567,230) \frac{\text{Js}}{\text{molK}}$ . Mit  $L$  lässt sich nun auch der Massendurchsatz nach (11) berechnen.

Tabelle 3: Massendurchsatz

| <i>Zeit</i> | $\frac{dm}{dt}$ in $\frac{\text{mol}}{\text{s}}$ | <i>Fehler</i> |
|-------------|--|---------------|
| 360         | −0,012 17  | 0,000 43      |
| 720         | −0,009 87  | 0,000 42      |
| 1080        | −0,007 56  | 0,000 44      |
| 1440        | −0,005 26  | 0,000 46      |

Die Fehler ergeben sich mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wie folgt.

$$\Delta \frac{dm}{dt} = \sqrt{\left(\frac{d^2m}{dt^2} \cdot \Delta A\right)^2 + \left(\frac{d^2m}{dt^2} \cdot \Delta B\right)^2 + \left(\frac{d^2m}{dt^2} \cdot \Delta L\right)^2}$$

#### 4.5 Bestimmung der mechanische Kompressorleistung $N_{mech}$

Wie in der Theorie erwähnt wurde, wird der natürliche Wärmeenergiefluss mit Hilfe von mechanischer Arbeit umgekehrt. Die dafür benötigte Leistung  $N_{mech}$  lässt sich über (14) berechnen. Vorerst muss der Massendurchsatz von  $\frac{\text{mol}}{\text{s}}$  in die Einheiten  $\frac{\text{g}}{\text{mol s}}$  umgerechnet werden, sodass die mechanische Leistung in W errechnet wird. Das verwendete Gas Dichlordifluormethan ( $\text{Cl}_2\text{F}_2\text{C}$ ) hat eine Molare Masse von  $120,91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ . Die Dichte  $\rho$  lässt sich unter der Annahme, dass der Kompressor adiabatisch arbeitet über die ideale Gasgleichung festlegen.

$$pV = nRT \quad \Leftrightarrow \quad nR = \frac{pV}{T}$$

Daraus folgt für  $n_0R = n_2R$ , mit  $V = \frac{m}{\rho}$ :

$$\begin{aligned} \frac{p_0 m}{\rho_0 T_0} &= \frac{p_2 m}{\rho T_2} & \Leftrightarrow & \frac{p_0}{\rho_0 T_0} = \frac{p_2}{\rho T_2} \\ \Leftrightarrow \rho &= \frac{p_2 \rho_0 T_0}{p_0 T_2} \end{aligned}$$

Als Werte waren  $\rho_0 = 5,51 \frac{\text{g}}{\text{l}}$  bei  $T = 273,15\text{K}$ ,  $p_0 = 1\text{bar}$  und  $\kappa = 1,14$  vorgegeben. Durch (14) ergeben sich die in Tabelle 4 visualisierten Werte. Der Fehler für die mechanische Leistung  $N_{mech}$  ergibt sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wie folgt.

$$\Delta N_{mech} = \sqrt{\left(\frac{dN_{mech}}{d\frac{dm}{dt}} \cdot \Delta \frac{dm}{dt}\right)^2}$$

Tabelle 4: Mechanische Kompressorleistung  $N_{mech}$  und Dichte  $\rho$ 

| <i>Zeit</i> | <i>Dichte <math>\rho</math> in <math>\frac{\text{g}}{\text{m}^3}</math></i> | <i>Leistung <math>N_{mech}</math> in W</i> | <i>Fehler</i> |
|-------------|---|--|---------------|
| 360         | 24,447  | 0,1029                                     | 0,003 56      |
| 720         | 21,655  | 0,1027                                     | 0,004 30      |
| 1080        | 20,342  | 0,0911                                     | 0,005 10      |
| 1440        | 19,451  | 0,0705                                     | 0,006 03      |

## 5 Diskussion

Im Folgendem werden die Versuchsergebnisse diskutiert. Dabei wird besonders auf den Vergleich zwischen der idealen Güteziffer  $\nu_{ideal}$  und der empirisch gefundenen Güteziffer  $\nu_{real}$  eingegangen. In dem Versuch wird deutlich, dass sich die Temperaturverläufe geeignet durch ein quadratisches Polynom approximieren lassen. Anhand der Ausgleichsrechnung wurde dies deutlich. Die Messwerte weichen lediglich minimal von dem Graphen der Ausgleichskurve ab. Die beiden Güteziffern unterscheiden sich deutlich. Gründe dafür könnte die idealisierte Annahme sein, dass der Kompressor adiabatisch arbeitet. Zudem waren die Reservoirs nicht optimal isoliert, sodass ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattgefunden hat. Dadurch wird die Güte der Wärmepumpe vermindert, weil mehr Arbeit aufgewendet werden muss, um den Wärmeenergieverlust auszugleichen. Desweiteren waren die Skalierungen an den Messapparaturen nicht fein genug dargestellt, um die zweite Nachkommastelle bei den Manometern genau ablesen zu können. Daher wurden alle verwendeten Drücke auf die zweite Nachkommastelle gerundet und sind so in Tabelle 5 dargestellt. Ebenso grob war die Skalierung auf dem Generator des Kompressors, sodass die abgelesene Leistung ohne Nachkommastellen angegeben wurde. Die Thermometer, mit denen die Temperatur in den Reservoirs gemessen wurde, waren digital und erlaubten eine genaue Messung bis auf die zweite Nachkommastelle. Es wird deutlich, dass die Messbedingungen nicht optimal waren, sodass die Güte der Wärmepumpe bereits dadurch gemindert wurde. Die gemachten Messfehler und die nicht erfüllbaren idealisierten Annahmen führen somit dazu, dass die realen Werte deutlich von den theoretischen Werten abweichen.

## 6 Messdaten

Tabelle 5: Messdaten

| <i>Zeit</i> in s | $T_1$ in K | $T_2$ in K | $p_1$ in bar | $p_2$ in bar | <i>Leistung</i> in W |
|------------------|------------|------------|--------------|--------------|----------------------|
| 0                | 294,05     | 294,55     | 4,9          | 5,0          | 0                    |
| 60               | 294,75     | 294,55     | 6,0          | 4,3          | 115                  |
| 120              | 295,95     | 293,65     | 6,2          | 4,6          | 120                  |
| 180              | 297,15     | 292,45     | 6,4          | 4,7          | 125                  |
| 240              | 298,45     | 291,25     | 6,9          | 4,8          | 125                  |
| 300              | 299,85     | 290,25     | 7,0          | 4,8          | 127                  |
| 360              | 301,15     | 289,35     | 7,1          | 4,7          | 126                  |
| 420              | 302,35     | 288,55     | 7,5          | 4,6          | 125                  |
| 480              | 303,65     | 287,75     | 7,8          | 4,5          | 124                  |
| 540              | 304,85     | 287,05     | 8,0          | 4,4          | 123                  |
| 600              | 306,05     | 286,35     | 8,1          | 4,3          | 123                  |
| 660              | 307,15     | 285,65     | 8,2          | 4,2          | 122                  |
| 720              | 308,25     | 284,95     | 8,6          | 4,1          | 121                  |
| 780              | 309,25     | 284,25     | 8,9          | 4,0          | 121                  |
| 840              | 310,25     | 283,55     | 9,0          | 4,0          | 122                  |
| 900              | 311,25     | 282,95     | 9,1          | 3,9          | 122                  |
| 960              | 312,15     | 282,35     | 9,3          | 3,8          | 123                  |
| 1020             | 313,15     | 281,75     | 9,7          | 3,8          | 124                  |
| 1080             | 314,05     | 281,15     | 9,9          | 3,8          | 125                  |
| 1140             | 314,95     | 280,65     | 10,1         | 3,7          | 125                  |
| 1200             | 315,75     | 280,25     | 10,2         | 3,7          | 125                  |
| 1260             | 316,55     | 279,75     | 10,5         | 3,6          | 125                  |
| 1320             | 317,35     | 279,35     | 10,8         | 3,6          | 125                  |
| 1380             | 318,15     | 278,95     | 10,9         | 3,6          | 125                  |
| 1440             | 318,95     | 278,55     | 11,0         | 3,6          | 125                  |
| 1500             | 319,65     | 278,15     | 11,2         | 3,6          | 125                  |
| 1560             | 320,45     | 277,85     | 11,5         | 3,5          | 125                  |
| 1620             | 321,05     | 277,55     | 11,7         | 3,5          | 125                  |
| 1680             | 321,75     | 277,25     | 11,9         | 3,5          | 125                  |
| 1740             | 322,45     | 276,95     | 12,0         | 3,5          | 125                  |
| 1800             | 323,15     | 276,75     | 12,1         | 3,4          | 125                  |

Mit  $T_1$  der Temperatur aus Reservoir 1,  $T_2$  der Temperatur aus Reservoir 2,  $p_1$  dem Druck aus Reservoir 1 und  $p_2$  dem Druck aus Reservoir 2.