

V206

Die Wärmepumpe

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Steffen Kober

steffen.kober@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.12.2021

Abgabe: 14.07.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Das Prinzip einer Wärmepumpe	3
2.2	Die Arbeitsweise einer Wärmepumpe	3
2.3	Kenngrößen einer realen Wärmepumpe	4
3	Durchführung	5
4	Auswertung	7
4.1	Auswertung der Temperaturverläufe mittels Ausgleichsrechnung	8
4.2	Vergleich der realen- und idealen Güteziffer	9
4.3	Bestimmung der Verdampfungswärme und des Massendurchsatzes	9
4.4	mechanische Leistung des Kompressors	11
5	Diskussion	12
	Literatur	12

1 Ziel

In diesem Versuch wird eine Wärmepumpe untersucht. Es sollen die reale Gütezahl dieser und die mechanische Leistung, die erbracht wird, berechnet werden. Diese kann man dann mit der Gütezahl einer theoretischen, idealen Wärmepumpe und den Messwerten der Leistung vergleichen und somit die Effizienz der realen Wärmepumpe diskutieren.

2 Theorie

Typischer Weise gleichen sich die Temperaturen zweier Reservoirs immer an. Meist aber ist es von größerem Interesse sehr kalte oder sehr warme Stoffe zu betrachten, um neue Erkenntnisse zu erlangen. Daher benötigt man eine Methode dies zu realisieren. Eine Methode ist die Nutzung einer Wärmepumpe. Denn durch eine Wärmepumpe ist es möglich die (Wärme-)Energie aus einem niederenergetischen Reservoir in ein höherenergetisches Reservoir zu "pumpen". Betrachtet man beispielsweise zwei Behälter einer Flüssigkeit, ermöglicht es eine Wärmepumpe die Temperatur eines der Reservoirs zu senken und gleichzeitig die des Anderen zu erhöhen.

2.1 Das Prinzip einer Wärmepumpe

Wie bereits erwähnt ermöglicht es eine Wärmepumpe die natürliche Flussrichtung der Wärmeenergie umzukehren. Um dies zu realisieren muss man allerdings zusätzlich Energie in das System einfließen lassen. Typischer Weise wird dies durch mechanische Arbeit erbracht.

Für eine solche Wärmepumpe wird die Güte

$$\nu_{\text{ideal}} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (1)$$

als Eigenschaft der Wärmepumpe definiert. Hierbei beschreibt Q_1 die abgegebene Wärmemenge des "kalten" Reservoirs und A die mechanische Arbeit die in das System eingebracht wird. Somit beschreibt die Güte das Verhältnis zwischen transportierter Wärme und aufgebrauchter mechanischer Arbeit.

Aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgt für eine Wärmepumpe der Zusammenhang $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$. Daraus kann gefolgert werden, dass die Wärmeübertragung immer reversibel verlaufen muss. Dies ist allerdings nur eine theoretische Forderung, welche nicht realisiert werden kann, da es immer gewisse Energieverluste gibt. Daher lässt sich lediglich die Aussage treffen

$$\nu_{\text{real}} < \nu_{\text{ideal}}$$

2.2 Die Arbeitsweise einer Wärmepumpe

In der Wärmepumpe wird ein reales Gas als Wärmetransportmedium verwendet. Dieses nimmt beim Verdampfen Energie auf und gibt diese beim Kondensieren wieder ab. Zur

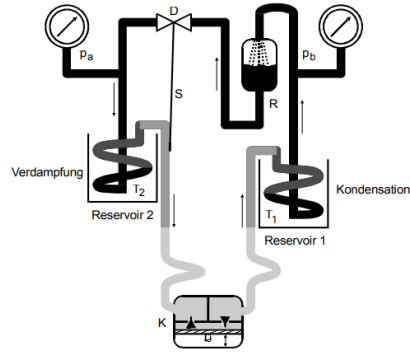


Abbildung 1: Skizze zur theoretischen Grundlage der Wärmepumpe.

Realisierung der Wärmepumpe werden meist Gase mit hoher Verdampfungswärme genutzt. In Abbildung 1 ist der grundlegende Aufbau einer Wärmepumpe skizziert. Der Kompressor K sorgt für eine Zirkulation des Gases durch die Reservoirs. Durch das Drosselventil D wird dort ein lokaler Druckunterschied aufgebaut. Dieser Druckunterschied ist so gewählt, dass bei beiden Drücken das Gas einen unterschiedlichen Aggregatzustand annimmt. Beim Verdampfen nach Durchlaufen von D nimmt das Gas die Verdampfungswärme L pro Gramm auf, wodurch also das Reservoir an Energie beziehungsweise Wärme verliert. Diese Energie wird dann durch Kondensation im anderen Reservoir abgegeben. Dies geschieht, da der Kompressor K das Gas komprimiert also den Druck erhöht. Eine Wärmepumpe kann noch durch viele Apparaturen erweitert und verbessert werden, allerdings wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

2.3 Kenngrößen einer realen Wärmepumpe

Für eine Wärmepumpe nach Abbildung 2 gibt es drei relevante Kenngrößen. Eine davon ist die bereits im Unterabschnitt 2.1 genannte Güte. Dazu kommen im Folgenden der Massendurchsatz des Transportmediums $\frac{dm}{dt}$ und der Wirkungsgrad η_K des Kompressors K.

In Unterabschnitt 2.1 wurde bisher lediglich eine Formel für die theoretische Güte genannt. Die reale Güte ν_{real} kann durch

$$\nu_{\text{real}} = \frac{(m_1 c_w + m_k c_k) \frac{\Delta T_1}{\Delta t}}{N_{\text{mechanisch}}} \quad (2)$$

bestimmt werden. $\frac{\Delta T_1}{\Delta t}$ kann zu einem geeigneten Zeitintervall aus einer Messreihe, welche mit einer Wärmepumpe nach Abbildung 2 aufgenommen wird, errechnet werden. $N_{\text{mechanisch}}$ ist die mittlere Leistung im gewählten Intervall Δt . $m_1 c_w$ beschreibt die Wärmekapazität des Mediums im Reservoir 1 in Abbildung 2. $m_k c_k$ beschreibt die Wärmekapazität der Rohrleitungen im Reservoir, welche ebenfalls in Abbildung 2 zu sehen sind.

Der Massendurchsatz kann aus der selben Messreihe mit T_2 bestimmt werden.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{(m_2 c_w + m_k c_k) \Delta T_2}{L \Delta t} \quad (3)$$

Die Formel ähnelt Gleichung 2. Lediglich beschreibt hier der Index 2 das Reservoir 2 und an Stelle von $N_{\text{mechanisch}}$ findet sich ein L im Nenner des Bruchs, welches man mit der Kondensationswärme identifiziert. Diese kann ebenfalls aus der Messreihe per Ausgleichsrechnung bestimmt werden.

Die mechanische Kompressorleistung $N_{\text{mechanisch}}$ erhält man durch

$$N_{\text{mechanisch}} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{1}{\rho} \frac{dm}{dt} \quad (4)$$

p_a, p_b sind die Drücke aus Abbildung 2. κ ist das Verhältnis der Molwärmen C_p und C_v und ρ beschreibt die Dichte des Transportmediums im gasförmigen Zustand. Aus der mechanischen Kompressorleistung lässt sich dann der Wirkungsgrad η_K bestimmen.

3 Durchführung

Zur Durchführung des Versuchs ist ein Aufbau notwendig, der in Abbildung 2 dargestellt ist. Die Wärmepumpe ist in zwei Teilbereiche gegliedert. In den beiden Bereichen befindet sich je ein thermisch isoliertes Gefäß (Reservoir), ein Digital-Thermometer und ein Druckmessgerät (Manometer). Die Reservoirs werden mit Wasser befüllt. Im "kalten" Bereich (links) wird die Temperatur T_2 des Wassers und der Druck p_a im Inneren der Rohrleitung gemessen. Im "warmen" Bereich bezeichnen T_1 und p_b die Temperatur des Reservoirs und den Druck in der Leitung. Das Drosselventil zwischen den Teilbereichen regelt die Durchflussmenge des Transportgases anhand der Temperaturdifferenz. Das verwendete Gas ist Dichlordifluormethan ($\text{Cl}_2\text{F}_2\text{C}$). Der Kompressor dient zur Erzeugung des Druckunterschieds in den beiden Teilbereichen. Seine momentane Leistungsaufnahme kann am Leistungsmesser (Wattmeter) abgelesen werden. In den isolierten Gefäßen ist ein Rührmotor installiert, der eine Vermischung des Wassers gewährleistet, damit eine möglichst homogene Temperaturverteilung in diesem gegeben ist. Ein "Reiniger" und eine Steuerungsvorrichtung sorgen dafür, dass das verflüssigte Transportmedium von Gasresten getrennt wird und keine Flüssigkeit in den Kompressor gelangt. Diese Apparaturen sind nur in Abbildung 1 zu sehen. In Abbildung 3 sind die beschriebenen Geräte und deren Anordnung im realen Versuchsaufbau zu sehen.

Bevor der Versuch durchgeführt werden kann, müssen je 3 Liter Wasser in die Gefäße gefüllt werden, die mit einem Messkolben abgemessen werden. Das eingefüllte Wasser hat Raumtemperatur, also etwa $21,7^\circ\text{C}$. Anschließend werden die Rührmotoren eingeschaltet. Sobald nun der Strom am Wattmeter eingeschaltet wird beginnt die Messung. Alle 60 Sekunden werden die Temperaturen T_1 und T_2 , die Drücke p_a und p_b , sowie die Leistung des Kompressors notiert. Bei den Drücken ist darauf zu achten, dass die analogen Druckmesser nur den Relativdruck zur Atmosphäre anzeigen, weshalb zu den Messwerten

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. [8]

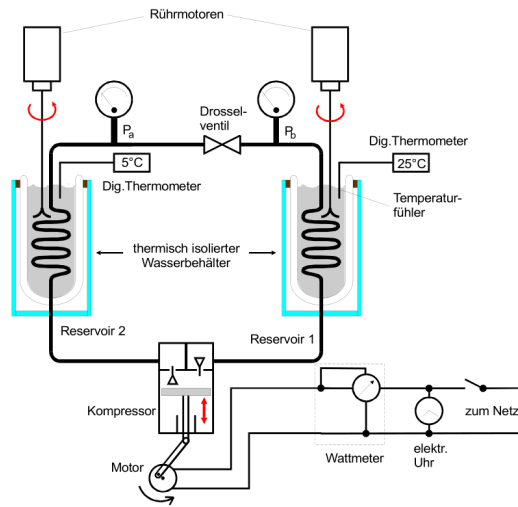


Abbildung 3: Bild des konkreten Aufbaus.



1bar addiert werden muss. Das Ablesen der fünf Messwerte sollte möglichst zeitgleich beziehungsweise in einem kurzen Zeitraum erfolgen.

Im Verlauf der Messung steigt die Temperatur im Reservoir 2, während Die des zweiten Reservoirs abfällt. Ist ein Wert von 50°C im warmen Reservoir erreicht, wird der Kompressor ausgeschaltet und die Messung beendet. Sollte vorher 0°C im kalten Reservoir unterschritten werden, muss die Messung ebenfalls abgebrochen werden, da sonst Teile des Aufbaus gefrieren können.

4 Auswertung

In Tabelle 1 sind die Messwerte zu den Temperaturen des kalten- und warmen Reservoirs in °C, der Druck in den jeweiligen Leitungen in Bar, sowie die Leistungsaufnahme des Kompressors in Watt, in Abhängigkeit zur Zeit dargestellt. Zu den Drücken p_{warm} (p_b) und p_{kalt} (p_a) wurde bereits der Atmosphärendruck von 1bar addiert.

Die Ausgleichs- und Fehlerrechnungen zu den Auswertungsaufgaben wurden mittels Python (Version 3.9.7) unter Verwendung der Pakete *scipy* [4], *numpy* [6] und *uncertainties* [5] durchgeführt. Die Fehlerformeln finden sich gleichwohl an den entsprechenden Stellen.

Tabelle 1: Gemessene Werte für Temperatur, Druck und Leistung.

t / min	$T_{\text{kalt}} / ^\circ\text{C}$	$T_{\text{warm}} / ^\circ\text{C}$	$p_{\text{kalt}} / \text{bar}$	$p_{\text{warm}} / \text{bar}$	P / W
1	21,7	23,0	2,6	7,0	170
2	21,4	23,7	2,8	7,5	175
3	20,3	25,0	3,0	7,7	190
4	18,9	26,4	3,1	8,0	195
5	17,1	28,2	3,2	8,5	200
6	15,4	29,9	3,2	8,9	205
7	13,6	31,7	3,2	9,2	200
8	12,0	33,5	3,2	9,5	200
9	10,4	35,0	3,2	10,0	205
10	8,8	36,8	3,2	10,3	210
11	7,0	38,4	3,2	10,6	210
12	5,7	40,1	3,2	11,0	210
13	4,3	41,6	3,2	11,4	210
14	3,2	43,0	3,2	11,7	215
15	2,5	44,3	3,2	12,0	210
16	1,8	45,7	3,2	12,4	210
17	1,2	46,9	3,2	12,7	210
18	0,7	48,1	3,2	13,0	210
19	0,4	49,2	3,2	13,4	205
20	0,1	50,2	3,2	13,6	205

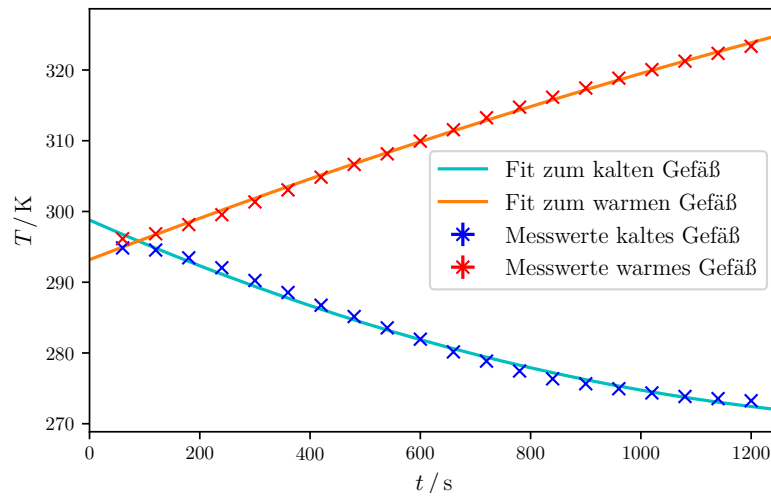
4.1 Auswertung der Temperaturverläufe mittels Ausgleichsrechnung

Zuerst sollten die Temperaturverläufe der Messreihe graphisch dargestellt werden. Anhand der Messdaten kann anschließend durch eine nicht-lineare Regression der Kurvenverlauf approximiert werden. Als Ansatz wurde ein Polynom zweiten Grades gewählt

$$T(t) = At^2 + Bt + C$$

mit den reellen Koeffizienten A , B und C , die sich aus der Regression ergeben. Abbildung 4 zeigt die Temperaturverläufe der beiden Reservoirire und die jeweiligen Ausgleichsfunktionen.

Abbildung 4: Temperaturverläufe in Abhängigkeit zur Zeit und quadratischer Fit zu den Werten. (Erstellt mit dem Paket *matplotlib* [3])



Für die gesuchten Parameter ergeben sich die Werte

$$A = (1.035 \pm 0.162) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}^2} \quad B = (-0.034 \pm 0.002) \frac{\text{K}}{\text{s}} \quad C = (298.79 \pm 0.58) \text{K}$$

für das kalte Gefäß und

$$A = (0.373 \pm 0.094) \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{s}^2} \quad B = (-0.03 \pm 0.001) \frac{\text{K}}{\text{s}} \quad C = (293.19 \pm 0.33) \text{K}$$

für das warme Gefäß.

Mit diesen Parametern lassen sich nun die Differentialquotienten dT_1/dt und dT_2/dt der Temperaturverläufe punktweise über die Ableitung der quadratischen Ausgleichsfunktionen bestimmen. Die Ableitung der Funktion ist durch

$$\frac{dT}{dt}(t) = 2At + B$$

gegeben. Der Fehler des Differentialquotienten beträgt dann nach der gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta \frac{dT}{dt} = \sqrt{(2t\Delta A)^2 + \Delta B^2}.$$

Der Differentialquotient beider Temperaturkurven sollte für je 4 verschiedene Temperaturen ermittelt werden. Ausgewählt wurden die Temperaturen zu den Zeitpunkten $t_1 = 3\text{min}$ (180s), $t_2 = 8\text{min}$ (480s), $t_3 = 13\text{min}$ (780s) und $t_4 = 18\text{min}$ (1080s). Die Werte können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Berechnete Werte der Differentialquotienten zu den ausgewählten Zeitpunkten

	$\frac{dT}{dt}(t_1) / \frac{\text{K}}{\text{s}}$	$\frac{dT}{dt}(t_2) / \frac{\text{K}}{\text{s}}$	$\frac{dT}{dt}(t_3) / \frac{\text{K}}{\text{s}}$	$\frac{dT}{dt}(t_4) / \frac{\text{K}}{\text{s}}$
kaltes Reservoir	-0.031 ± 0.002	-0.024 ± 0.003	-0.018 ± 0.003	-0.012 ± 0.004
warmes Reservoir	0.029 ± 0.001	0.026 ± 0.002	0.024 ± 0.002	0.022 ± 0.002

4.2 Vergleich der realen- und idealen Gütezyiffer

Aus den Werten des Differentialquotienten kann man mit Gleichung 2 die reale Gütezyiffer bestimmen. $m_k c_k$ ist die Wärmekapazität der Gefäße und der Leitungen und hat den Wert $m_k c_k = 750 \text{ J/K}$. $m_1 c_w$ ist die Wärmekapazität des Wassers im warmen Reservoir. Sie berechnet sich mit der Masse $m_1 = 3\text{kg}$ und der spezifischen Wärme von Wasser $c_w \approx 4181.8 \text{ J K/kg}$ [1]. Da der Differentialquotient fehlerbelastet ist, hat die daraus berechnete Gütezyiffer einen Fehler, der sich auch nach Gleichung 2.1 durch einsetzen des Fehlers von dT / dt berechnen lässt. Die Theoriewerte ergeben sich mit Gleichung 1.

Tabelle 3: Vergleich der realen- und idealen Gütezyiffern an den Zeitpunkten t_i

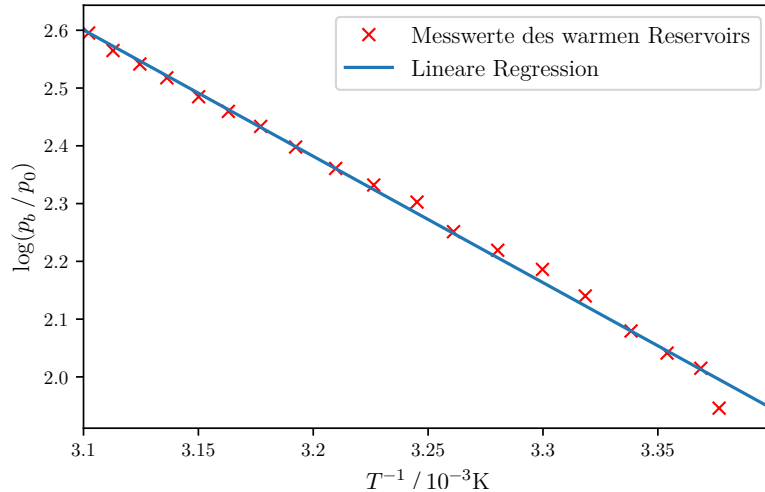
t / s	ν_{ideal}	ν_{real}
180	63,44	$2,01 \pm 0,09$
480	14,26	$1,76 \pm 0,10$
780	8,44	$1,53 \pm 0,12$
1080	6,78	$1,39 \pm 0,15$

4.3 Bestimmung der Verdampfungswärme und des Massendurchsatzes

Nun soll der Massendurchsatz des Transportgases Dichlordifluormethan ($\text{Cl}_2\text{F}_2\text{C}$) berechnet werden. Dies lässt sich mit Gleichung 3 bewerkstelligen. dT_2/dt wurde bereits in Unterabschnitt 4.1 bestimmt und $m_2 c_w$ ist gleich dem Wert von $m_1 c_w$ aus Unterabschnitt 4.2. Die Verdampfungswärme L ist stoffspezifisch und nicht gegeben. Daher muss sie aus den Messwerten bestimmt werden. Dazu wird die Dampfdruckkurve von Dichlordifluormethan betrachtet. Sie ergibt sich durch Auftragen des Druckverhältnisses

in einem System gegen die Temperatur. Näheres wird in Versuch 203 [7] beschrieben. Da es einfacher ist eine lineare Ausgleichsrechnung durchzuführen, wird in Abbildung 5 der Logarithmus des Druckverhältnisses, also $\log(\frac{p_b}{p_0})$, an der y -Achse aufgetragen. p_b ist gleich zu setzen mit p_{warm} und $\frac{p_b}{p_0}$ beschreibt das Druckverhältnis zum Atmosphärendruck p_0 .

Abbildung 5: Dampfdruckkurve von Dichlordifluormethan. Messwerte und linearer Fit in halblogarithmischer Darstellung. (Erstellt mit *matplotlib*[3])



In dem Diagramm sind die Wertepaare des warmen Reservoirs eingetragen, aus denen sich mittels linearer Regression die Parameter m und b der Geraden

$$f(x) = mx + b$$

bestimmen lassen. x ist in diesem Fall Der Kehrwert der Temperatur und $y = f(x)$ der oben beschriebene Logarithmus. Es gilt der Zusammenhang $m = -\frac{L}{R}$ für die Verdampfungswärme, auch dies wird in Versuch 203 [7] ersichtlich. Die Parameter lassen sich rechnerisch als

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \frac{\bar{y} \cdot \overline{x^2} - \overline{xy} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}$$

bestimmen, wurden jedoch mit dem Paket *scipy* [4] berechnet. Der Fehler dieser Größen ergibt sich mit der gaußschen Fehlerfortpflanzung.

Aus den Messwerten konnten die Parameter $m = (-2186 \pm 37) \text{K}$ und $b = 9.4 \pm 0.1$ ermittelt werden. Daraus folgt für $L = -m/R$ mit der allgemeinen Gaskonstante $R \approx 8.314$ [4] der Wert der Verdampfungswärme $L = (18.2 \pm 0.3) \text{kJ/mol}$. Die molare Masse von Dichlordifluormethan beträgt $M = 120.91 \text{g/mol}$ [2], daraus folgt $L = (150 \pm 2.5) \text{kJ/kg}$. Nun kann der Massendurchsatz für die verschiedenen Temperaturen gemäß Gleichung 3 berechnet werden. Diese werden zusammen mit dem jeweiligen Fehler in Tabelle 4 dargestellt.

Die Fehler des Massendurchsatzes ergeben sich gemäß der gaußschen Fehlerfortpflanzung

Tabelle 4: Massendurchsatz zu den Zeitpunkten t_i

t_i / s	$\frac{dm}{dt}(t) \cdot 10^{-3} \text{kg/s}$
180	$2,71 \pm 0,20$
480	$2,16 \pm 0,23$
780	$1,61 \pm 0,29$
1080	$1,06 \pm 0,36$

durch die Gleichung

$$\Delta \frac{dm}{dt} = \sqrt{\left(-\frac{m_2 c_w + m_k c_k}{L^2} \frac{\Delta T_2}{\Delta t} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{m_2 c_w + m_k c_k}{L} \Delta \frac{\Delta T_2}{\Delta t}\right)^2}.$$

4.4 mechanische Leistung des Kompressors

Zuletzt wird nun die mechanische Leistung des Kompressors ausgewertet, welche dieser abgibt, um mit den Drücken p_a und p_b zu arbeiten. Diese Leistung lässt sich gemäß Gleichung 4 berechnen. Die in Unterabschnitt 2.3 bereits diskutierten notwendigen Materialkonstanten sind für Dichlordifluormethan bekannt.

$$\rho_0 = 5.51 \frac{\text{g}}{\text{L}}, p_0 = 1 \text{bar}, \kappa = 1,14 \quad (5)$$

p_0 entspricht hier dem Atmosphärendruck und die Angabe von ρ_0 bezieht sich auf $T = 0^\circ\text{C}$. Die Dichte von Dichlordifluormethan zu den verschiedenen Temperaturen ergibt sich durch die Gleichung

$$\rho(T) = \frac{\rho_0 T_0 \cdot p_b}{p_0 T_2},$$

welche aus der idealen Gasgleichung folgt. Die damit errechneten Werte für die Leistung können nun Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Leistungsabgabe zu den Zeitpunkten t_i

t_i / s	N_{mech}/W
180	$-18,0 \pm 1,3$
480	$-14,1 \pm 1,5$
780	$-10,1 \pm 1,8$
1080	$-6,4 \pm 2,2$

Auch hier werden die Fehler gemäß der gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt.

$$\Delta N_{\text{mech}} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{1}{\rho} \Delta \frac{dm}{dt}.$$

5 Diskussion

Über die Differentialquotienten $\frac{\Delta T_1}{\Delta t}$ und $\frac{\Delta T_2}{\Delta t}$, die Verdampfungswärme L , sowie den Massendurchsatz $\frac{dm}{dt}$ lassen sich keine Vergleiche zu Theoriewerten ziehen. Anders ist dies bei der Güteziffer. Diese ist sehr viel kleiner als der Theoriewert ν_{ideal} für die ideale Güteziffer. Mögliche Ursachen dafür gibt es reichlich. So arbeitet der Kompressor real nicht adiabatisch, die Reservoirs und Rohrleitungen können nicht vollständig isoliert werden, sodass ein konstanter Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Außerdem wurden Reibungsverluste vernachlässigt, welche beim Gastransport weniger wichtig sind, aber bei den Rührmotoren im Wasser für eine zusätzliche Erwärmung der Reservoirs sorgen können. Des Weiteren war es unmöglich den Messprozess exakt durchzuführen, da es händisch nicht möglich ist alle relevanten Werte gleichzeitig festzuhalten. Dazu kommen noch die Ablesegenauigkeiten der analogen Messgeräte von Druck und Leistung. Weiterhin arbeitet die gesamte Wärmepumpe bei höherer Temperaturdifferenz immer ineffizienter, wodurch auch die Ungenauigkeiten insgesamt immer größer werden.

Dennoch steht all dies nicht in Widerspruch zur Theorie, da die reale Güteziffer eben kleiner als die Ideale ist. Auch die (fallende) Monotonie der aus den Messwerten berechneten Güteziffern ist eigentlich eine Bestätigung der Theorie, da diese den oben genannten Effizienzverlust bei steigendem Temperaturunterschied vorhersagt. Selbiges gilt für die mechanische Leistung N , dessen berechnete Werte weitaus kleiner als die Messwerte ausfallen. Der Trend der sinkenden Effizienz ist auch hier zu erkennen. Zusammenfassend ergibt sich, dass die reale Wärmepumpe, die in diesem Versuch verwendet wurde, sehr stark von der idealen Wärmepumpe abweicht, aber in der Funktionsweise der Theorie entspricht.

Literatur

- [1] Horst Czichos und Manfred Hennecke. *Das Ingenieurwissen*. Springer Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-22850-6.
- [2] *Dichlordifluormethan*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). URL: <https://gestis.dguv.de/data?name=026210> (besucht am 10.12.2021).
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.

- [7] *V203 - Verdampfungswärme und Dampfdruck-Kurve*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1712438/mod_resource/content/1/V203.pdf (besucht am 19.01.2022).
- [8] *V206 - Die Wärmepumpe*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1884592/mod_resource/content/1/V206.pdf (besucht am 07.12.2021).

Anhang

v206 Die Wärmepumpe

07.12'21

Füllmenge Reservoir: je 3L ^{kalt}

~~t/min~~ ~~T₁/°C~~ ~~T₂/°C~~ ~~p_a/Bar~~ ~~p_b/Bar~~ ~~P/W~~

t/min	T₁/°C	T₂/°C	p_a/Bar	p_b/Bar	P/W
t/min	T ₁ /°C	T ₂ /°C	p _a /Bar	p _b /Bar	P/W
0	21,7	21,9			
1	21,7	23,0	1,6	6	170
2	21,4	23,7	1,8	6,5	175
3	20,3	25	2	6,7	190
4	18,9	26,4	2,05	7	195
5	17,1	28,2	2,2	7,5	200
6	15,4	29,9	2,2	7,9	205
7	13,6	31,7	2,2	8,2	200
8	12,0	33,5	2,2	8,5	200
9	10,4	35,0	2,2	9	205
10	8,2	36,8	2,2	9,3	210
11	7,0	38,4	2,2	9,6	210
12	5,7	40,1	2,2	10	210
13	4,3	41,6	2,2	10,4	210
14	3,2	43,0	2,2	10,7	215
15	2,5	44,3	2,2	11,0	210

11.12

t/min	T ₂ /°C	T ₁ /°C	p _a [*] /Bar	p _s [*] /Bar	P/W
16	1,8	45,7	2,2	11,4	2-10
17	1,2	46,9	2,2	11,7	2-10
18	0,7	48,1	2,2	12	2-10
19	0,4	49,2	2,2	12,4	205
20	0,1	50,2	2,2	12,6	205

Wärmekapazität Kupferschlange / Reservoire

$$m_k c_k = 750 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

• verwendeter Aufbau: lisch

• Reale Drücke $p_a = p_a^* + 1 \text{ Bar}$,

$$p_s = p_s^* + 1 \text{ Bar}$$

Ablenkgrenzgleich:

$$\Delta T = 0,1^\circ\text{C} \quad , \quad \Delta p = 0,1 \text{ Bar} \quad , \quad \Delta P = 5 \text{ W}$$

lisch