

Versuchsnummer: 206

Wärmepumpe

Konstantin Mrozik
konstantin.mrozik@udo.edu

Marcel Kebekus
marcel.kebekus@udo.edu

Durchführung: 10.12.2019

Abgabe: 17.12.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	5
3	Auswertung	6
3.1	Temperaturverläufe	6
3.2	Nicht-lineare Ausgleichsrechnung	6
3.3	Differentialquotienten	7
3.4	Bestimmung der Güteziffer	8
3.5	Massendurchsatz	8
3.6	Mechanische Kompressionsleistung	10
4	Diskussion	10
	Literatur	12

Ziel

Es soll die Gütezahl ν einer Wärmepumpe, der Massendurchsatz von Dichlordifluormethan Cl_2F_2C und die mechanische Leistung des verwendeten Kompressors ermittelt werden.

1 Theorie

Natürlicherweise fließt Wärmeenergie in einem abgeschlossenen System von einem heißen immer ins kalte Reservoir. Möchte man den Wärmefluss umkehren, so muss Arbeit verrichtet werden. Diese Aufgabe übernimmt eine sogenannte Wärmepumpe.

Es gilt nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik:

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

Für das Verhältnis der Wärmemenge Q und der Temperatur T bei reversiblen Wärmeübertragungen gilt nach dem zweiten Hauptsatz:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (2)$$

Da eine vollständige reversible Umwandlung in der realen Umsetzung nicht möglich ist gilt:

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

Die Gütezahl einer Wärmepumpe ist definiert als

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

somit folgt mit Gleichung (1), (2) und (3):

$$\nu_{ideal} = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > \nu_{real} \quad (4)$$

Die reale Gütezahl ergibt sich nach:

$$\nu_{real} = \frac{\Delta Q_1}{\Delta t N} = (m_2 c_w + m_k c_k) \frac{\Delta T_2}{\Delta t N} = L \frac{\Delta m}{\Delta t N} \quad (5)$$

Dabei ist N die über die Zeit Δt gemittelte Leistungsaufnahme des Kompressors, m der Massendurchsatz und L die Verdampfungswärme.

Verdampfungswärme L

Die Dampfdruckkurve wird bestimmt durch die Verdampfungswärme L . Diese Größe ist eine charakteristische Größe der Substanz und im allgemeinen temperaturabhängig.
Definition molare Verdampfungswärme L :

Gibt die Energie an, die benötigt wird, um einen Mol einer Flüssigkeit in Dampf der gleichen Temperatur umzuwandeln. [3][4]

Mechanische Kompressionsleistung

Für die mechanische Kompressionsleistung N_{mech} gilt:

$$A_m = -p_a v_a^\kappa \int_{v_a}^{v_b} V^{-\kappa} dV = \frac{1}{\kappa - 1} p_a V_a^\kappa (V_b^{-\kappa+1} - V_a^{-\kappa+1}) = \frac{1}{\kappa - 1} (p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a) V_a \quad (6)$$

$$N_{mech} = \frac{\Delta A_m}{\Delta t} = \frac{1}{\kappa - 1} (p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a) \frac{\Delta V_A}{\Delta t} = \frac{1}{\kappa - 1} (p_b \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a) \frac{1}{\rho} \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (7)$$

wobei ρ die Dichte des Gases beschreibt und p_a den Druck.

Wärmepumpe

Nun soll die Funktionsweise der Wärmepumpe erörtert werden. Diese verwendet ein reales Gas, welches beim Phasen Wärmeenergie umwandelt, hier also beim Verdampfen Wärme aufnimmt und diese beim Verflüssigen wieder abgibt. Dabei wird ein Gas mit einer möglichst hohen Kondensationswärme verwendet. Der generelle Aufbau ist dabei in Abbildung 1 gezeigt.

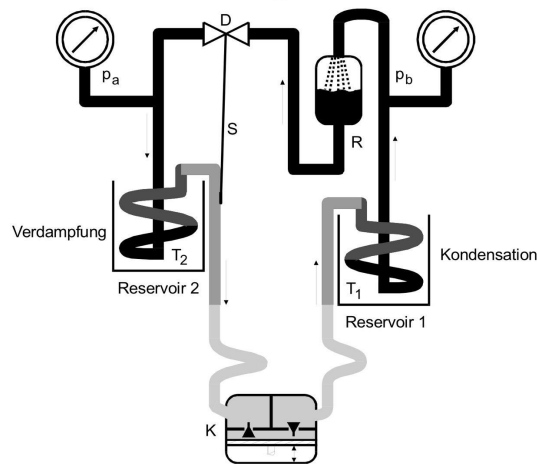


Abbildung 1: Genereller Aufbau der Wärmepumpe [5, S. 196]

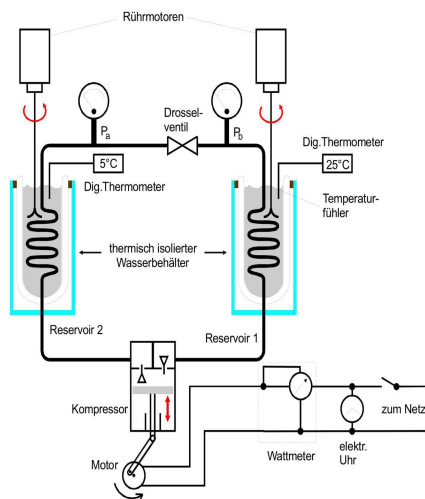
Der dargestellte Kompressor K leistet dabei die nötige Arbeit und erzeugt dabei einen Mediumkreislauf. Für die Druckzonen der Reservoirs 1 und 2 sorgt das Drosselventil D .

Dieses verfügt über eine Steuereinheit, sodass die Ventilöffnung anhand der Temperaturdifferenz der beiden Reservoirs geregelt werden kann.

Genauer, wird in dem Reservoir 1 das Medium bei einem Druck von p_1 kondensiert, das heißt, das Medium gibt Wärmeenergie ab und somit nimmt die Wassertemperatur T_1 zu. Nachdem das Druckventil D durchlaufen wurde verdampft das Medium bei einem Druck von p_2 und nimmt dabei Wärmeenergie auf, wodurch die Temperatur T_2 im Reservoir 2 abnimmt.

Um einen Reibungsfeien Ablauf zu der Anlage gewährleisten, sind im Kreislauf noch weitere Apparaturen eingebaut, die allerdings die funktionsweise nicht weiter verändern. In der Abbildung ist beispielsweise ein "Reiniger" R dargestellt, um das Kondensierte Medium von Gas-Blasen zu befreien.

2 Durchführung



(a) Spezifischer Aufbau der Wärmepumpe [5, S. 197]



(b) Foto des Versuchsaufbaus

In die Reservoirs werden jeweils 3 Liter Wasser gefüllt. Zusätzlich werden Rührmotore in diese installiert, um eine konstante Temperaturverteilung an das Wasser zu gewährleisten und ein Gefrieren der Leitungen der Wärmepumpe zu verhindern. Die Reservoirs sowie die Leitungen der Wärmepumpe sind dabei wärmeisoliert, um diese Verluste möglichst klein zu halten.

Zuerst werden nun die Rührmotoren eingeschaltet und dann die Netzspannung an den Kompressor angelegt. Nun wird für jede Minute der Druck p und die Wassertemperatur T , sowie die Leistung des Kompressors gemessen.

3 Auswertung

3.1 Temperaturverläufe

Die Temperaturverläufe in Abbildung 3, Werte angehängt (siehe 4).

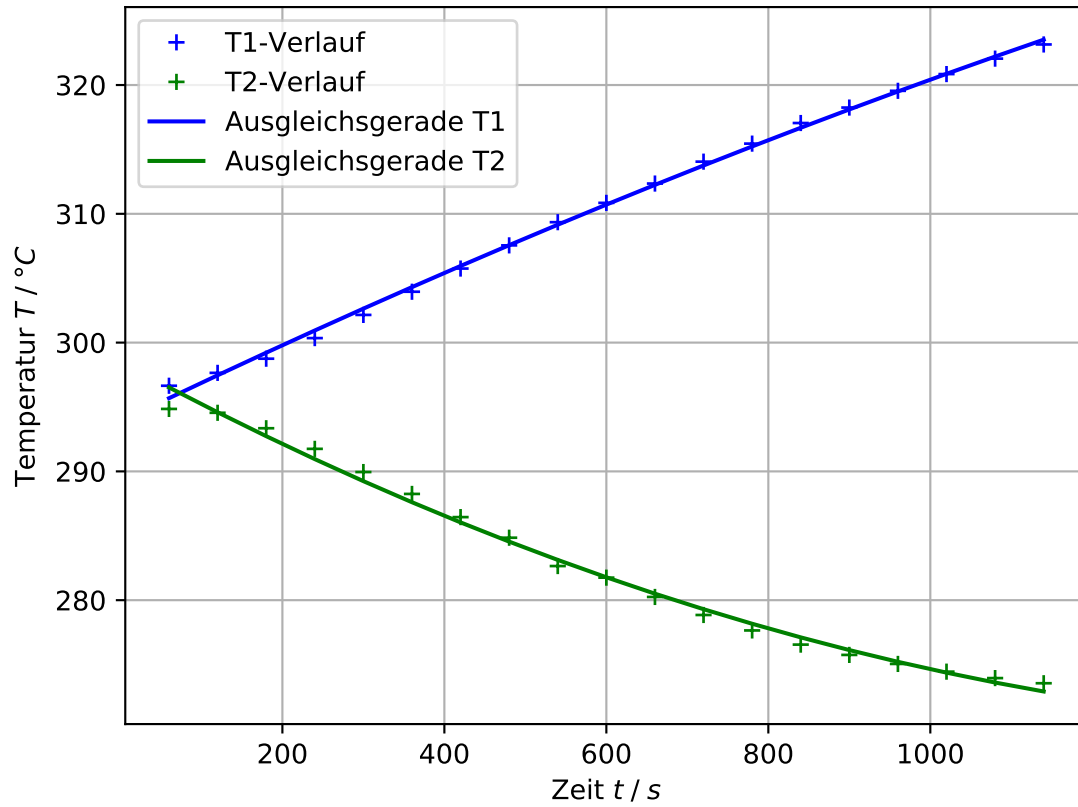


Abbildung 3: Temperaturverläufe

3.2 Nicht-lineare Ausgleichsrechnung

Mit der folgenden Näherung, werden nun die in 3 dargestellten Ausgleichsgeraden bestimmt[1]:

$$T(t) = At^2 + Bt + C \quad (8)$$

	T_1 / K	T_2 / K
$A / K/s^2$	$(-3,8 \pm 0,9) 10^{-6}$	$(1,01 \pm 0,16) 10^{-5}$
$B / K/s$	$0,0304 \pm 0,0012$	$-0,0339 \pm 0,0019$
C / K	$293,88 \pm 0,30$	$298,5 \pm 0,5$

3.3 Differentialquotienten

Exemplarisch werden für vier Messwerte der Differentialquotienten dT_1/dt und dT_2/dt berechnet. Für die Näherung von (8) folgt somit:

$$\frac{dT}{dt} = 2At + Bt \quad (9)$$

mit einem Fehler nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung.

Es ergeben sich die vier verschiedenen Differentialquotienten

Zeit T / s	T_1	dT_1/dt
240,0	300,35	$0,0285 \pm 0,0012$
480,0	307,55	$0,0267 \pm 0,0015$
840,0	317,045	$0,0239 \pm 0,0020$
1080,0	322,045	$0,0221 \pm 0,0023$
Mittelwert		0.0253 ± 0.0017

Tabelle 1: Differentialquotienten für T_1

Zeit T / s	T_2	dT_2/dt
240,0	291,75	-0,029
480,0	284,85	-0,024
840,0	276,55	-0,017
1080,0	273,95	-0,012
Mittelwert		-0,021

Tabelle 2: Differentialquotienten für T_2

3.4 Bestimmung der Güteziffer

Wie in Gleichung (4) dargestellt, lässt sich aus dem zuvor berechneten Differentialquotienten die Güteziffer ν bestimmen.

Für die Wärmekapazität von Wasser $m_1 c_w$ und von Kupfer $m_k c_k$ gilt gilt [6]:

$$m_1 c_w = 4190 \frac{J}{kg K} \Rightarrow 12570 \frac{J}{K}$$

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

Zeit t / s	Güteziffer v_{ideal}	Güteziffer v_{real}	Abweichung / %
120,0	96,02	$1,97 \pm 0,08$	97,9
480,0	24,77	$1,87 \pm 0,09$	92,43
840,0	7,83	$1,60 \pm 0,13$	79,6
1140,0	6,56	$1,45 \pm 0,16$	77,8

3.5 Massendurchsatz

Zuerst wird die Verdampfungswärme mithilfe einer linearen Regression wie in Versuch 203 bestimmt. Die Ausgleichskurve wird über den folgenden Zusammenhang gebildet.

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

$$\ln(p) = -\frac{L}{R} \frac{1}{T} + b$$

$$\Rightarrow \ln(p) = -a \frac{1}{T} + b$$

Über die Parameter

$$m = 2237 \pm 76 K$$

$$b = 8,06 \pm 0,25$$

lässt sich dann L bestimmen.

$$L = m \cdot R$$

Dividiere dies durch die molare Masse von $Cl_2F_2C = 120 \frac{g}{mol}$ so ergibt sich die Einheit $\frac{J}{g}$.

$$L = (154 \pm 5) \frac{J}{g}$$

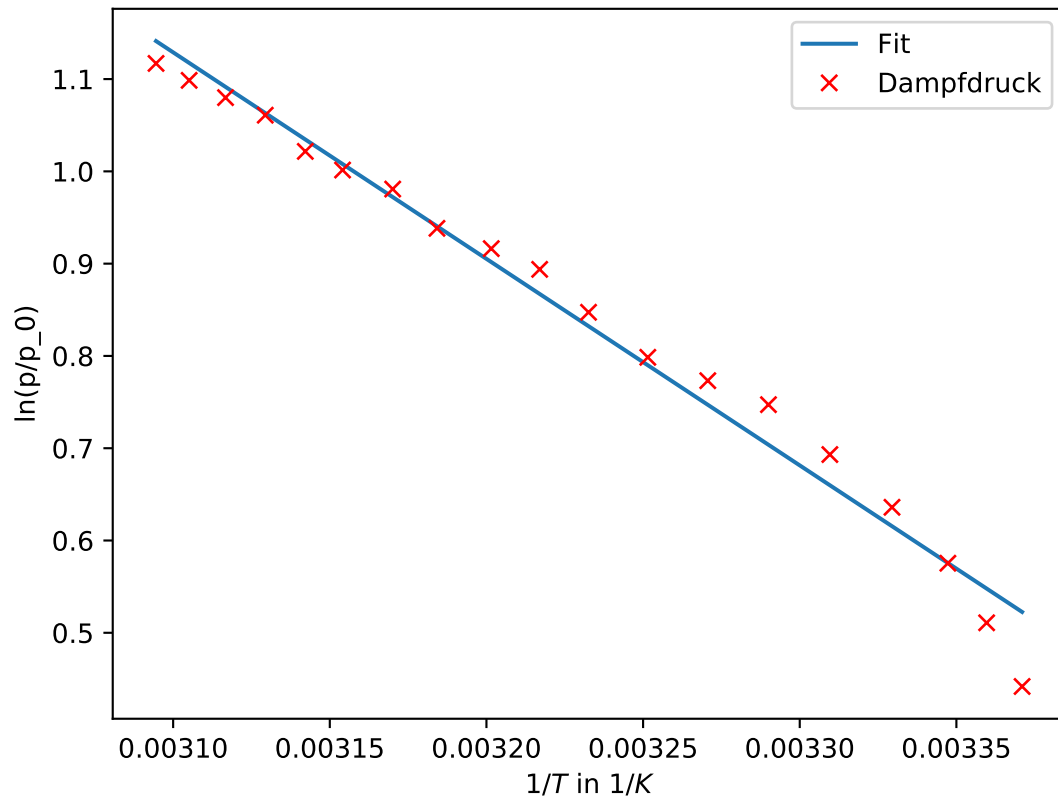


Abbildung 4: Dampfdruckkurve für P und T im warmen Reservoir.

Die Unsicherheit ergibt sich mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung. Mit dem so erhaltenen Wert für L wird nun der Massendurchsatz bestimmt.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\nu_{real} \cdot N}{L}$$

Der Massendurchsatz dm/dt an der jeweiligen Messstelle ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Zeit t / s	Massendurchsatz in $\frac{dm}{dt}$ / g/s
120.0	2.55 ± 0.13
480.0	2.43 ± 0.14
840.0	2.07 ± 0.18
1140.0	1.87 ± 0.22

Tabelle 3: Massendurchsatz

3.6 Mechanische Kompressionsleistung

Die mechanische Kompressionsleistung bestimmt sich über 7 Die Dichte des Mediums bei der vorliegenden Temperatur lässt sich aus der idealen Gasgleichung bestimmen.

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{pV}{T}$$

Es folgt:

$$\rho = \frac{p\rho_0 T_0}{p_0 T} \quad (10)$$

mit $\rho_0(Cl_2F_2C) = 5,51g/l$ und $\kappa = 1,14$ folgt:

Zeit t / s	ρ / kg/m^3	Kompressorleistung N_{mech} / W
120.0	3.01	2.18±0.11
480.0	3.56	2.11±0.12
840.0	4.62	1.84±0.16
1140.0	5.09	1.65±0.19

Tabelle 4: Kompressorleistung

4 Diskussion

Die reale Güterziffer weicht stark von der idealen Güterziffer ab.

Dies kann zum einen an der nicht perfekter Isolation der Apparatur liegen, zum anderen wird die Wärmeübertragung nicht vollständig reversibel sein.

Zudem sind die geringen Werte bei der berechneten mechanischen Leistung N_{mech} stark auffällig.

Obwohl einer deutlich kleineren Leistung angenommen werden kann, als am Kompressor selbst gemessen, sind die Werte aus 4 deutlich zu klein. Die berechneten Leistungen beschreiben einen idealen Kompressor, dieser ist allerdings nicht realisierbar. Verluste wie z. B. in Form von Wärme müssen hierbei beachtet werden.

Mit einem etwa halb so großen Leistung wie am Kompressor baglesen kann gerrechnet werden.

Versuch 206 - Wärmepumpe

Wärmekapazität Kupferedlung
750 $\frac{J}{K}$

$P_{10} = 4,25$

$P_{10} = 4,5$

Zeit min	P_1	T_1	P_2	T_2	Leistung
0	6			21,7	
1	6,5	23,5	1,65	21,7	175
2	6,5	24,5	1,8	21,4	180
3	7	25,6	2	20,2	190
4	7,5	27,2	2	18,6	200 195
5	8	29,0	2,2	16,8	200
6	8,5	30,8	2,2	15,1	200
7	8,75	32,6	2,2	13,3	200
8	9	34,4	2,2	11,7	205
9	9,5	36,2	2,2	10,2	205
10	10	37,2	2,2	8,6	205
11	10,5	39,2	2,2	7,1	210
12	10,5	40,9	2,2	5,7	210
13	11	42,3	2,2	4,5	210
14	11,25	43,9	2,2	3,4	210
15	11,5	45,1	2,2	2,6	205
16	12	46,4	2,2	1,9	210
17	12,25	47,2	2,2	1,3	210
18	12,5	48,9	2,2	0,8	210
19	12,75	50	2,2	0,4	210

$\Gamma - \Gamma$

Literatur

- [1] URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html (besucht am 10.12.2019).
- [2] 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/>.
- [3] Marcel Kebekus und Konstantin Mrozik. „Versuchsnummer 203, Verdampfungswärme“. In: (2019).
- [4] 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/>.
- [5] *Versuchsaneitung 206 - Wärmepumpe*. TU Dortmund, 2019.
- [6] *Wärmekapazität*. URL: <https://www.energie-lexikon.info/waermekapazitaet.html> (besucht am 10.12.2019).