

Die Wärmepumpe

Luis Adam
luis.adam@udo.edu

Fritz Agildere
fritz.agildere@udo.edu

Durchführung: 6. Dezember 2022
Abgabe: 13. Dezember 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	2
1.1	Prinzipielle Funktion der Wärmepumpe	2
1.2	Bestimmung der Kenngrößen einer realen Wärmepumpe	3
1.2.1	Güteziffer	3
1.2.2	Massendurchsatz	4
1.2.3	Mechanische Kompressorleistung	5
1.3	Fehlerrechnung	5
2	Aufgabe	6
3	Durchführung	6
4	Auswertung	6
4.1	Approximation der Temperaturverläufe	7
4.2	Güteziffer	8
4.3	Massendurchsatz	8
4.4	Verdampfungsenthalpie	9
4.5	Mechanische Kompressorleistung	10
5	Diskussion	12
	Literatur	13

1 Theorie

Im abgeschlossenen System fließt Wärme immer vom wärmeren zum kälteren Reservoir. Dieser Wärmefluss ist jedoch umkehrbar, indem äußere Energie zugeführt wird. Realisieren lässt sich dieser Prozess in der Wärmepumpe durch das Aufwenden mechanischer Arbeit.

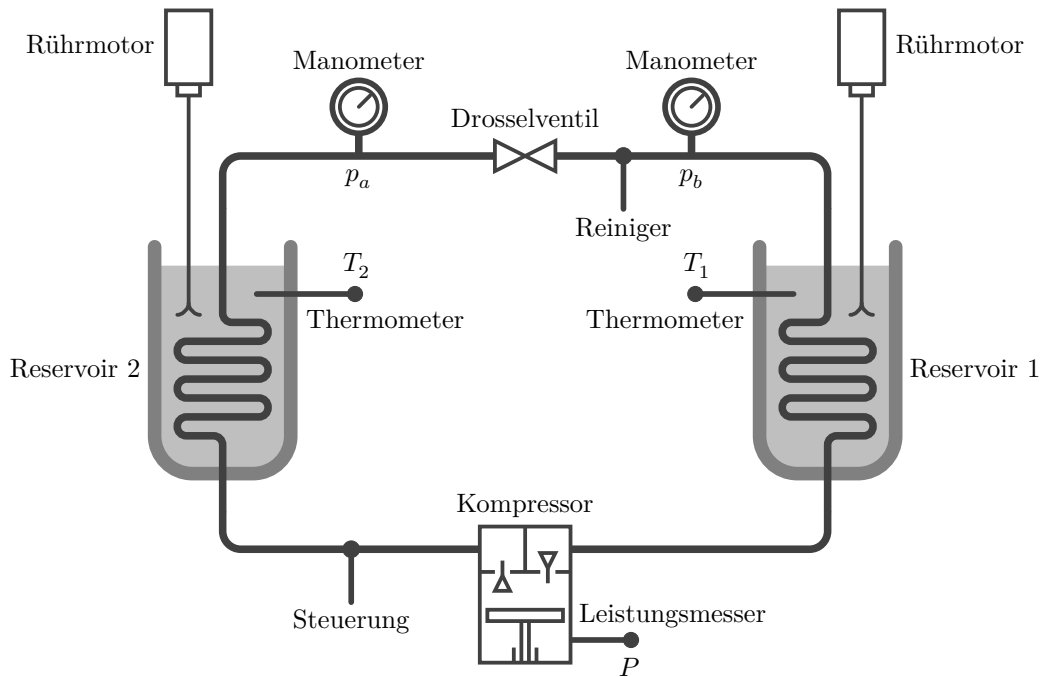


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Wärmepumpe.

1.1 Prinzipielle Funktion der Wärmepumpe

Die Wärmeübertragung erfolgt hier über die Phasenumwandlungsenergie eines geeigneten Transportmediums. Für den gerichteten Fluss dieses Stoffes sorgt der Kompressor. Am Drosselventil entsteht dabei durch dessen hohen Strömungswiderstand mit $p_b - p_a$ ein Druckgefälle. Die mit einem realen Gas gefüllte Apparatur ist nun so konzipiert, dass dieses bei der Temperatur T_1 und dem Druck p_b flüssig ist. Bei T_2 und p_a dagegen wird es gasförmig. Somit kommt es nach Durchströmen des Ventils zur Verdampfung. Dieser Vorgang entzieht dem Reservoir 2 Wärme proportional zur Verdampfungsenthalpie L und sorgt dabei für ein Abkühlen des Volumens. Anschließend wird das Transportgas am Kompressor annähernd adiabatisch komprimiert. Dies sorgt für einen simultanen Anstieg von Temperatur und Druck, sodass in Reservoir 1 ein Kondensationsprozess stattfindet. Die zuvor aufgenommene Wärmeenergie wird hier wieder abgegeben, L heißt dabei Kondensationsenthalpie. Es kommt zur Erhitzung des Volumens.

Weiter werden einige Komponenten benötigt, um den normalen Betrieb zu gewährleisten. Eine blasenfreie Flüssigkeitszufuhr am Drosselventil ist durch einen vorgebauten Reiniger garantiert. Zum Schutz des Kompressors ist außerdem eine Steuerungsvorrichtung für das Ventil notwendig, die durch Variation der Durchlässigkeit eine untere Temperaturdifferenz sichert. So wird verhindert, dass Flüssigkeitsreste den Kompressor beschädigen. Um eine effektivere Durchmischung des Reservoirmediums (Wasser) zu ermöglichen, sind die thermisch isolierten Behälter mit Rührmotoren ausgestattet. Zur Messaufnahme der Drücke p_a, p_b sind im Versuch Manometer verbaut. Die Temperaturen T_1, T_2 lassen sich entsprechend an digitalen Thermometern ablesen. Zuletzt dient ein Leistungsmesser in der Schaltung des Kompressors dazu, die elektische Leistungsaufnahme P anzuzeigen. Abbildung 1 erleichtert das Nachvollziehen des Aufbaus einer Wärmepumpe.

1.2 Bestimmung der Kenngrößen einer realen Wärmepumpe

1.2.1 Güteziffer

Die Güteziffer ν bezeichnet das Verhältnis der verrichteten Arbeit A_0 zur transportierten Wärmemenge. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik verlangt Energieerhaltung. Im idealisierten geschlossenen System muss daher immer

$$Q_1 = Q_2 + A_0 \quad (1)$$

gelten, wobei Q_1 die abgegebene und Q_2 die aufgenommene Wärmemenge beschreibt. Aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre folgt eine weitere Beziehung. Der Ausdruck

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

besagt, dass die Summe der reduzierten Wärmemengen verschwindet. Die Gültigkeit der Gleichung (2a) ist jedoch streng an die Reversibilität der Wärmeübertragung gekoppelt. Demnach müsste die über einen Zyklus aufgenommene Energie durch einen umgekehrt laufenden Prozess verlustfrei zurückgewonnen werden können. Diese Voraussetzung kann nie technologisch umgesetzt werden. Im irreversiblen Fall ist dann nur die Ungleichung

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

erfüllt. Durch Auflösen nach Q_2 und Einsetzen in Ausdruck (1) kann die Arbeit als

$$A_0 = Q_1 - \frac{T_2}{T_1} Q_1 \quad (3)$$

geschrieben werden. Daraus lässt sich nun die Güteziffer $\nu = \frac{Q_1}{A_0}$ bestimmen.

Mithilfe der Temperaturdifferenz $T_1 - T_2$ zwischen den Reservoiren stellt sich die Formel

$$\nu_{\text{ideal}} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4a)$$

zur Beschreibung des idealen Falles (2a) auf, während dem realen Fall (2b) mit

$$\nu_{\text{real}} < \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4b)$$

eine obere Schranke zugewiesen wird. Anhand der Terme (4a) und (4b) ist zu erkennen, dass die Effektivität der Apparatur für geringere Temperaturunterschiede zunimmt. Außerdem wird der Vorteil einer Wärmepumpe gegenüber anderen Verfahren deutlich, welche direkt mechanische in thermische Energie umwandeln:

Statt $Q_1 \leq A_0$ ist hier $Q_1 \leq A_0 \frac{T_1}{T_1 - T_2}$ gegeben.

Um die Gütezahl ν auch für reale Ausführungen explizit angeben zu können, wird der zeitliche Temperaturverlauf T_1 betrachtet. Der Wärmegewinn Q_1 lässt sich dann als

$$\frac{dQ_1}{dt} = (m_1 c_w + m_k c_k) \frac{dT_1}{dt} \quad (5)$$

ausdrücken. Mit den Wärmekapazitäten $m_1 c_w$ für die Wassermenge in Reservoir 1 sowie $m_k c_k$ für Kupferschlange und Behälter gibt der Zusammenhang

$$\nu_{\text{real}} = \frac{1}{P} \frac{dQ_1}{dt} \quad (6)$$

die reale Gütezahl an. Der Quotient P entspricht dabei der Leistung am Kompressor.

1.2.2 Massendurchsatz

Analog zum vorherigen Vorgehen lässt sich mit $m_2 c_w$ als Wärmekapazität des Wassers in Reservoir 2 aus dem zeitabhängigen Temperaturverlauf T_2 die Beziehung

$$\frac{dQ_2}{dt} = (m_2 c_w + m_k c_k) \frac{dT_2}{dt} \quad (7)$$

bestimmen. Die bei der Verdampfung entnommene Wärmemenge Q_2 entspricht dem Produkt aus Verdampfungsenthalpie L und Stoffmenge m , weshalb äquivalent

$$\frac{dQ_2}{dt} = L \frac{dm}{dt} \quad (8)$$

geschrieben werden kann. Darüber ist dann der Massendurchsatz $\frac{dm}{dt}$ definiert.

1.2.3 Mechanische Kompressorleistung

Allgemein wird vom Kompressor zum Reduzieren eines Gasvolumens V_a auf V_b die Arbeit

$$A_0 = - \int_{V_a}^{V_b} p \, dV \quad (9)$$

geleistet. Unter Annahme einer adiabatischen Kompression gibt die Poissongleichung

$$p_a V_a^\kappa = p_b V_b^\kappa = p V^\kappa \quad (10)$$

den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen wieder. Mit dem Exponenten $\kappa > 1$ wird das Verhältnis der Molwärmen c_p und c_v angegeben. Durch Umstellen nach p und Einsetzen in (9) ergibt sich der Ausdruck

$$A_0 = - p_a V_a^\kappa \int_{V_a}^{V_b} V^{-\kappa} \, dV = \frac{1}{\kappa - 1} p_a V_a^\kappa (V_b^{-\kappa+1} - V_a^{-\kappa+1}) = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b^\kappa \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) V_a \quad (11)$$

für die verrichtete Arbeit. Mit der Beziehung $m = \rho V$ folgt daraus schließlich

$$N = \frac{dA_0}{dt} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b^\kappa \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{dV_a}{dt} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b^\kappa \sqrt[\kappa]{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \rho^{-1} \frac{dm}{dt} \quad (12)$$

als mechanische Kompressorleistung in Abhängigkeit zum Massendurchsatz (8).

1.3 Fehlerrechnung

Um die Abweichung der Messgrößen zu untersuchen, werden noch einige weitere Formeln benötigt. Die Rechenvorschrift für den Mittelwert \bar{x} ist mit

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \quad (13)$$

gegeben. Zur Bestimmung der Standardabweichung $\Delta \bar{x}$ kann

$$(\Delta \bar{x})^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \quad (14)$$

verwendet werden. Durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$(\Delta f)^2 = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 (\Delta x_n)^2 \quad (15)$$

ist die Abweichung Δf für von fehlerbehafteten Werten x_n abhängige Größen f definiert.

2 Aufgabe

Ziel dieses Versuchs ist die Untersuchung der Funktionsweise einer realen Wärmepumpe zum Transport thermischer Energie entgegen dem Temperaturgradienten. Dazu wird eine einfache Messreihe an der Apparatur aufgenommen und anschließend zur Bestimmung der Kenngrößen ausgewertet.

3 Durchführung

Die Messapparatur ist nach dem Schema in Abbildung 1 aufgebaut. Zunächst werden die Röhrelemente aktiviert, um eine homogene Wassertemperatur in den thermisch isolierten Gefäßen zu gewährleisten. Anschließend wird der Kompressor eingeschaltet, direkt gefolgt vom Beginn der Messaufzeichnung. Es werden in Intervallen von 60 s zyklisch die Werte von Thermometern, Manometern und Leistungsmesser abgelesen und eingetragen. Die Messreihenfolge lautet dabei T_2 , p_a , p_b , T_1 , P . Durch die so definierte Abfolge ist eine genauere Auswertung der Daten möglich, da die beim Nachhalten auftretende Verzögerung nur in einer vergleichsweise geringen und annähernd konstanten zeitlichen Verschiebung der Daten zueinander resultiert. Beendet wird der Versuch, sobald 50 °C überschritten oder 0 °C unterschritten sind. Damit ist sichergestellt, dass einerseits ausreichend viele Messdaten aufgenommen werden und es andererseits nicht zur Beschädigung des Aufbaus kommt. Die nachfolgende Analyse baut auf den hier gewonnenen Daten auf.

4 Auswertung

Beide Reservoirs sind jeweils mit einer Wassermenge von 3 L gefüllt. Am Versuchsaufbau ist außerdem die Wärmekapazität von Kupferschlange und Behälter als $m_k c_k = 750 \text{ J K}^{-1}$ abzulesen. Bei der Aufnahme der Druckmessungen ist zu beachten, dass aufgrund der Apparatur eine Addition von genau 1 bar = 100 kPa als Korrektur vorgenommen wird. Nichtlineare Ausgleichsrechnungen werden mit den Bibliotheken NumPy [5] und SciPy [8] unter Python [7] durchgeführt. Zum Erstellen von Grafiken wird Matplotlib [6] verwendet.

4.1 Approximation der Temperaturverläufe

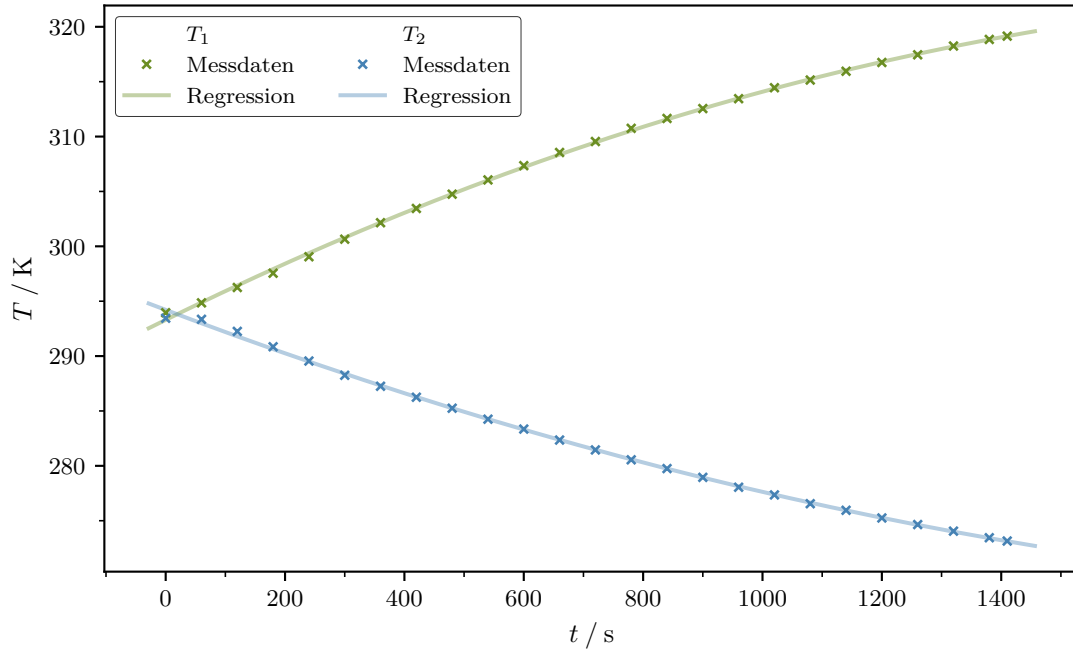


Abbildung 2: Temperaturverläufe nach Tabelle 4 mit analytischen Näherungskurven.

Entlang der in Abbildung 2 dargestellten Messungen soll eine nichtlineare Regression durchgeführt werden. Dazu wird angenommen, dass die Temperaturverläufe einfachen Funktionen der Form

$$T = At^2 + Bt + C \quad \frac{dT}{dt} = 2At + B \quad (16)$$

folgen. Da es sich um Polynome handelt, bietet sich dabei die Funktion `numpy.polyfit` an. Diese liefert die Koeffizienten

$$A_1 = (-5,99 \pm 0,24) \mu\text{K s}^{-2} \quad B_1 = (26,77 \pm 0,36) \text{mK s}^{-1} \quad C_1 = (293,30 \pm 0,11) \text{K}$$

$$A_2 = (3,98 \pm 0,26) \mu\text{K s}^{-2} \quad B_2 = (-20,56 \pm 0,39) \text{mK s}^{-1} \quad C_2 = (294,20 \pm 0,12) \text{K}$$

zur minimalen Abweichung zwischen Ausgleichskurve und Messreihe. Auch die Fehler zum Modellverlauf lassen sich aus der Kovarianzmatrix direkt als Quadratwurzeln ihrer Diagonalelemente berechnen. Nach der Fehlerfortpflanzung (15) ergibt sich noch

$$\Delta\left(\frac{dT}{dt}\right) = \sqrt{4t^2(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2} \quad (17)$$

als zeitabhängige Abweichung der Differentialquotienten.

4.2 Güteziffer

Aus den Gleichungen (5) und (6) ergibt sich der zusammengesetzte Ausdruck

$$\nu_{\text{real}} = \frac{1}{P} (m_1 c_w + m_k c_k) \frac{dT_1}{dt} \quad (18)$$

zur Berechnung der realen Güteziffer. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt $c_w = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [9] und liefert dann $m_1 c_w = 12,54 \text{ kJ K}^{-1}$ als einzusetzenden Wert. Mit $m_k c_k = 0,75 \text{ kJ K}^{-1}$ ist so $m_1 c_w + m_k c_k = 13,29 \text{ kJ K}^{-1}$ gegeben. Die ideale Güteziffer wird nach (4a) bestimmt. Um ν_{real} und ν_{ideal} zu berechnen, werden die Werte aus Tabelle 4 herangezogen. Die Differentialquotienten (16) sind nach (17) mit Fehlern behaftet. In Tabelle 1 werden sie in mK s^{-1} zu den Zeitpunkten t in s aufgezählt.

Tabelle 1: Differentialquotienten mit Vergleich von realer und idealer Güteziffer.

t	dT_1/dt	ν_{real}	ν_{ideal}	$\nu_{\text{real}}/\nu_{\text{ideal}}$
300	$23,18 \pm 0,39$	$2,46 \pm 0,04$	24,24	10,15 %
600	$19,58 \pm 0,46$	$2,10 \pm 0,05$	12,80	16,41 %
900	$15,99 \pm 0,56$	$1,85 \pm 0,06$	9,30	19,89 %
1200	$12,39 \pm 0,68$	$1,48 \pm 0,08$	7,62	19,42 %

4.3 Massendurchsatz

Wie zuvor in (18) können die Beziehungen (7) und (8) genutzt werden, um die Formel

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dQ_2}{dt} = \frac{1}{L} (m_2 c_w + m_k c_k) \frac{dT_2}{dt} \quad (19)$$

herzuleiten. Um daraus den Massendurchsatz zu berechnen, wird im nachfolgenden Abschnitt die lokal konstante Verdampfungsenthalpie $L = (20\,675,01 \pm 348,98) \text{ J mol}^{-1}$ bestimmt. Durch Division mit der molaren Masse $M = 120,91 \text{ g mol}^{-1}$ [3] von CCl_2F_2 ergibt sich $L = (171,00 \pm 2,89) \text{ J g}^{-1}$. Mit dem Faktor $m_2 c_w + m_k c_k = 13,29 \text{ kJ K}^{-1}$ lässt sich nun dm/dt ermitteln. Die fortgeführte Abweichung von (19) lautet hierbei

$$\Delta\left(\frac{dm}{dt}\right) = \sqrt{\left(\Delta\left(\frac{dT}{dt}\right)\right)^2 L^{-2} + \left(\left(\frac{dT}{dt}\right)\Delta L\right)^2 L^{-4}} \quad (20)$$

und entspricht damit der Rechenvorschrift (15) nach Gauß. Zusammen mit den passenden Differentialquotienten in mK s^{-1} kann der fehlerbehaftete Massendurchsatz in g s^{-1} für die Zeitpunkte t in s aus Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Differentialquotienten mit Massendurchsatz.

t	dT_2/dt	dm/dt
300	$-18,17 \pm 0,42$	$-1,41 \pm 0,04$
600	$-15,78 \pm 0,50$	$-1,23 \pm 0,04$
900	$-13,40 \pm 0,61$	$-1,04 \pm 0,05$
1200	$-11,01 \pm 0,74$	$-0,86 \pm 0,06$

4.4 Verdampfungsenthalpie

Zur Berechnung der Regressionskurve in Abbildung 3 wird das letzte Wertepaar T_1, p_b aus Tabelle 4 exkludiert, da es nach Ausschalten des Kompressors zu einem instantanen Sprung im Druck p_b kommt. Diese Wirkung tritt in der kontinuierlichen Temperaturmessung T_1 erst verzögert auf und verfälscht dadurch die untersuchte Beziehung.

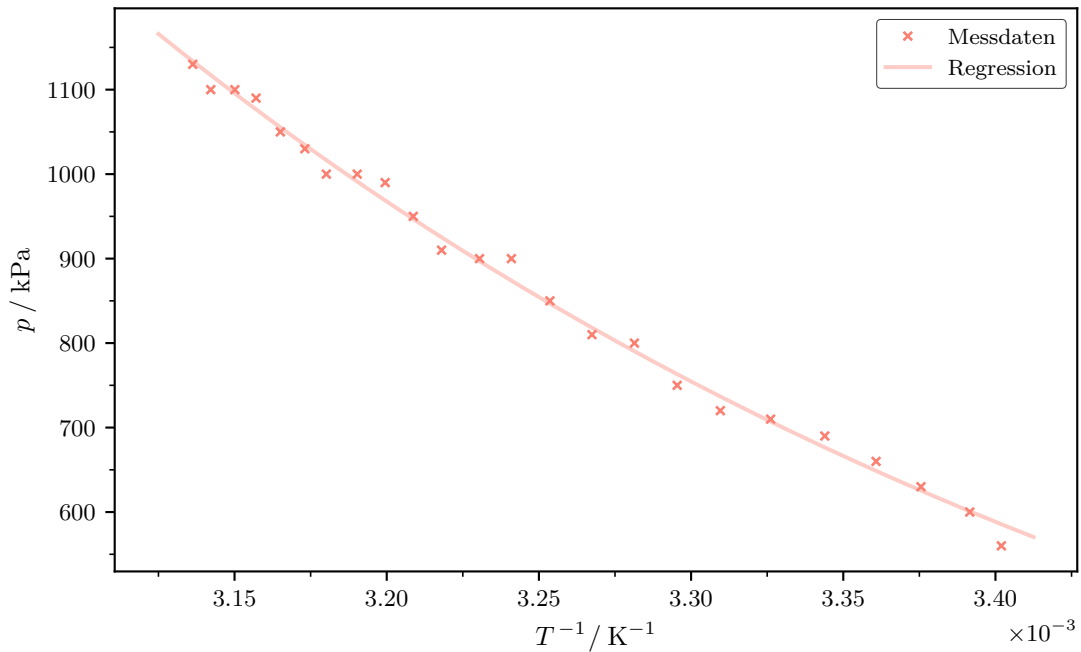


Abbildung 3: Dampfdruckkurve für CCl_2F_2 mit T_1, p_b als Fit-Daten.

Um die Dampfdruckkurve weit unterhalb der kritischen Temperatur zu beschreiben, wird hier in guter Näherung der Ausdruck

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{L}{R} \frac{1}{T}\right) \quad (21)$$

als vereinfachtes Integrationsergebnis aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung [1] verwendet.

Dabei ist die molare Gaskonstante mit $R = 8,314\,462\,618\,\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ [4] angegeben. Eine passende nichtlineare Ausgleichsrechnung mittels `scipy.optimize.curve_fit` liefert

$$p_0 = (2,76 \pm 0,37)\,\text{GPa} \quad \frac{L}{R} = (2486,63 \pm 41,97)\,\text{K}$$

als optimale Parameter zur Minimierung der Fehlerquadrate mit numerisch genäherter modellspezifischer Standardabweichung. Daraus ergibt sich die Verdampfungsenthalpie zu $L = (20\,675,01 \pm 348,98)\,\text{J mol}^{-1}$ für das Transportgas Dichlordifluormethan (CCl_2F_2).

4.5 Mechanische Kompressorleistung

Bevor der Ausdruck (12) zur Berechnung der mechanischen Leistung N verwendet werden kann, wird eine Beziehung für die Dichte ρ gesucht. Mit $m = \rho V$ erfolgt dies über

$$pV = \frac{pm}{\rho} = nRT \Leftrightarrow \frac{p}{\rho T} = \frac{nR}{m} \quad (22)$$

als Definition der idealen Gasgleichung. Unter der Annahme, dass nR sowie m erhalten bleiben, muss die Gleichheit

$$\frac{p_0}{\rho_0 T_0} = \frac{p}{\rho T} \quad (23)$$

für beliebige Zeitpunkte t erfüllt sein. Damit können schließlich $T_2 = T$ und $p_a = p$ als entsprechende veränderliche Messgrößen substituiert werden. Auflösen liefert

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0 p_a}{p_0 T_2} \quad (24)$$

für die auftretende Dichte. Der Term wird nun eingesetzt, um aus (12) die Vorschrift

$$N = \frac{1}{\kappa - 1} \left(p_b \sqrt{\frac{p_a}{p_b}} - p_a \right) \frac{p_0 T_2}{\rho_0 T_0 p_a} \frac{dm}{dt} \quad (25)$$

zu bilden. Mit den Normalgrößen $p_0 = 1\,\text{bar} = 100\,\text{kPa}$ und $T_0 = 0\,^\circ\text{C} = 273,15\,\text{K}$ sowie dem stoffspezifischen Literaturwert $\rho_0 = 5510\,\text{g m}^{-3}$ [2] berechnet sich die geforderte Kenngröße anhand der in Tabelle 4 geführten Messdaten. Aus Tabelle 3 kann dazu die mechanische Leistung N in W zu verschiedenen Zeiten t in s abgelesen werden.

Tabelle 3: Mechanische Leistung des Kompressors.

t	N	t	N
300	$-11,69 \pm 0,33$	900	$-20,50 \pm 0,99$
600	$-17,74 \pm 0,64$	1200	$-19,73 \pm 1,36$

Tabelle 4: Messdaten aus Temperatur T , Druck \tilde{p} , korrigiertem Druck p und Kompressorleistung P zum Zeitpunkt t . Zyklische Datenaufnahme erfolgt beginnend bei t in der Reihenfolge $T_2, \tilde{p}_a, \tilde{p}_b, T_1, P$ über einen Zeitraum von (20 ± 10) s.

t / min	$T_1 / ^\circ\text{C}$	T_1 / K	$T_2 / ^\circ\text{C}$	T_2 / K	\tilde{p}_a / bar	p_a / kPa	\tilde{p}_b / bar	p_b / kPa	P / W
0,0	20,8	293,9	20,3	293,4	3,4	440	4,6	560	120
1,0	21,7	294,8	20,2	293,3	3,0	400	5,0	600	115
2,0	23,1	296,2	19,1	292,2	3,2	420	5,3	630	120
3,0	24,4	297,5	17,7	290,8	3,4	440	5,6	660	123
4,0	25,9	299,0	16,4	289,5	3,4	440	5,9	690	125
5,0	27,5	300,6	15,1	288,2	3,4	440	6,1	710	125
6,0	29,0	302,1	14,1	287,2	3,3	430	6,2	720	125
7,0	30,3	303,4	13,1	286,2	3,0	400	6,5	750	125
8,0	31,6	304,8	12,1	285,2	3,0	400	7,0	800	125
9,0	32,9	306,0	11,1	284,2	2,8	380	7,1	810	123
10,0	34,2	307,3	10,2	283,3	2,7	370	7,5	850	124
11,0	35,4	308,5	9,2	282,3	2,6	360	8,0	900	125
12,0	36,4	309,5	8,3	281,4	2,5	350	8,0	900	124
13,0	37,6	310,8	7,4	280,5	2,4	340	8,1	910	126
14,0	38,5	311,6	6,6	279,8	2,4	340	8,5	950	125
15,0	39,4	312,5	5,8	278,9	2,2	320	8,9	990	115
16,0	40,3	313,4	4,9	278,0	2,2	320	9,0	1000	115
17,0	41,3	314,4	4,2	277,3	2,1	310	9,0	1000	113
18,0	42,0	315,1	3,4	276,5	2,0	300	9,3	1030	111
19,0	42,8	315,9	2,8	275,9	2,0	300	9,5	1050	111
20,0	43,6	316,8	2,1	275,2	1,9	290	9,9	1090	111
21,0	44,3	317,4	1,5	274,6	1,9	290	10,0	1100	111
22,0	45,1	318,2	0,9	274,0	1,8	280	10,0	1100	111
23,0	45,7	318,8	0,3	273,4	1,8	280	10,3	1130	110
23,5	46,0	319,1	0,0	273,1	1,9	290	9,5	1050	0

5 Diskussion

Alle betrachteten Kenngrößen der Wärmepumpe liegen innerhalb des Erwartungsbereichs. Die graphische Darstellung der Näherungskurven in Abbildung 2 und 3 erlaubt den Schluss, dass diese ebenfalls eine gute Deckung mit den Messdaten aufweisen. Auch die berechnete Verdampfungsenthalpie $L = (20\,675,01 \pm 348,98) \text{ J mol}^{-1}$ stimmt mit den Literaturwerten für ähnliche Temperaturbereiche [3] überein. Auffällig ist die Abweichung der Güteziffern, welche besonders für geringe Temperaturdifferenzen stark ansteigt. Laut Theorie (4a) könnten hier eigentlich beliebig hohe Faktoren erzielt werden. Real wirken allerdings Verluste an den Wärmetauschern durch eventuell undichte Isolationselemente limitierend auf die Effektivität des Aufbaus. Zusätzlich verliert die Apparatur auch durch mechanische Reibungsprozesse Energie. Abschließend darf noch ungenaues Ablesen an den vergleichsweise groben Skalen nicht als Fehlerquelle vernachlässigt werden.

Alle theoretischen Grundlagen werden der Versuchsanleitung [2] entnommen. Auch das Schema einer Wärmepumpe ist an die darin enthaltenen Grafiken angelehnt.

Literatur

- [1] *Anleitung zu Versuch 203, Verdampfungswärme und Dampfdruckkurve.*
TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] *Anleitung zu Versuch 206, Die Wärmepumpe.*
TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [3] *Dichlorodifluoromethane.*
National Institute of Standards and Technology.
2021.
URL: [https://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/CCl2F2/c2-1\(3%2C4\)5](https://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/CCl2F2/c2-1(3%2C4)5).
- [4] *Fundamental Physical Constants.*
National Institute of Standards and Technology.
2018.
URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt>.
- [5] Charles R. Harris u. a.
„Array programming with NumPy“.
In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362.
DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [6] John D. Hunter.
„Matplotlib: A 2D Graphics Environment“.
Version 1.4.3.
In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95.
DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
URL: <http://matplotlib.org/>.
Current version 3.6.2, DOI: 10.5281/zenodo.7275322.
- [7] *Python.*
Version 3.11.0.
24. Okt. 2022.
URL: <https://www.python.org>.
- [8] Pauli Virtanen u. a.
„SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“.
Version 1.9.3.
In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272.
DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [9] *Water.*
National Institute of Standards and Technology.
2021.
URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/H2O/h1H2>.