

# Praktikum - Wärmepumpe

[chris@university-material.de](mailto:chris@university-material.de), Arthur Halama

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>2</b>
2.1	Prinzip . . . . .	2
2.2	Messung . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
3.1	Teil A . . . . .	4
3.1.1	Temperaturverläufe . . . . .	4
3.1.2	Ausgetauschte Wärmemengen . . . . .	4
3.1.3	Leistungszahl und Arbeit zu verschiedenen Zeiten . . . . .	6
3.2	Teil B . . . . .	8
3.2.1	Leistungszahl . . . . .	8
3.2.2	Liefergrad . . . . .	8
3.3	Fehlerbetrachtung . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Abschlussbetrachtung</b>	<b>11</b>

# 1 Theorie

In diesem Versuch soll das Verständnis eines Kreisprozesses vertieft und experimentell ausgewertet werden.

Grundsätzlich ist ein Kreisprozess nichts anderes als eine festgelegte Abfolge von Zustandsänderungen, an dessen Ende der Stoff den selben Zustand hat wie am Anfang. In diesem Versuch sind vor allem folgende Zustandsänderungen wichtig:

- verdichten
- Ausdehnen
- Erwärmen
- Abkühlen

Während das Arbeitsmittel diese Zustandsänderungen vollzieht, ändern sich Größen wie die Temperatur oder der Druck. Bei Gasen kann man diese Änderungen mit dieser Gleichung nachvollziehen:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Wenn man nun die Arbeit berechnen möchte, die verrichtet wurde, muss man sich den *Druck-Temperatur* Verlauf in einem p-V Diagramm anschauen und über das Volumen integrieren.

Einige Zustandsänderungen haben zudem besondere Eigenschaften und sind deshalb speziell benannt:

isobar	isochor	isotherm
$p = \text{const}$	$V = \text{const}$	$T = \text{const}$
$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1}$

Das sind allerdings nur Berechnungsmöglichkeiten für ideale Gase, die wir in der Realität nie vorliegen haben. Für reale Gase nutzt man wesentlich komplexere Integrale (*kalorische Zustandsgleichung*), auf die wir im Rahmen des Versuchs aber nicht eingehen.

## 2 Durchführung

### 2.1 Prinzip

Konkret geht es in diesem Versuch um die Funktionsweise einer Wärmepumpe. Das Grundprinzip einer Wärmepumpe besteht darin, thermische Energie von einem niedrigeren Energieniveau in ein höheres zu bewegen. Das geschieht unter der Aufwendung von mechanischer Arbeit.

Der Aufbau unserer Aperatur ist wie auf Abbildung 1 zu sehen.

Wir betrachten nun folgenden Prozess:

- 1 der Kompressor verdichtet das gasförmige Arbeitsmittel. Dabei wird die mechanische Energie  $W$  aufgenommen
- 2 der Kondensator entzieht dem Arbeitsmittel die Wärmemenge  $Q$ . Dabei wird es verflüssigt
- 3 das Expansionsventil entspannt das Arbeitsmittel (es kühlt weiter ab)
- 4 im Verdampfer nimmt das Arbeitsmittel wiederum die Wärmemenge  $Q'$  auf und wird gasförmig

Wichtig ist hier, dass die aufgenommene mechanische Energie vollständig als Wärme abgegeben wird. Es geht also keine Energie verloren.

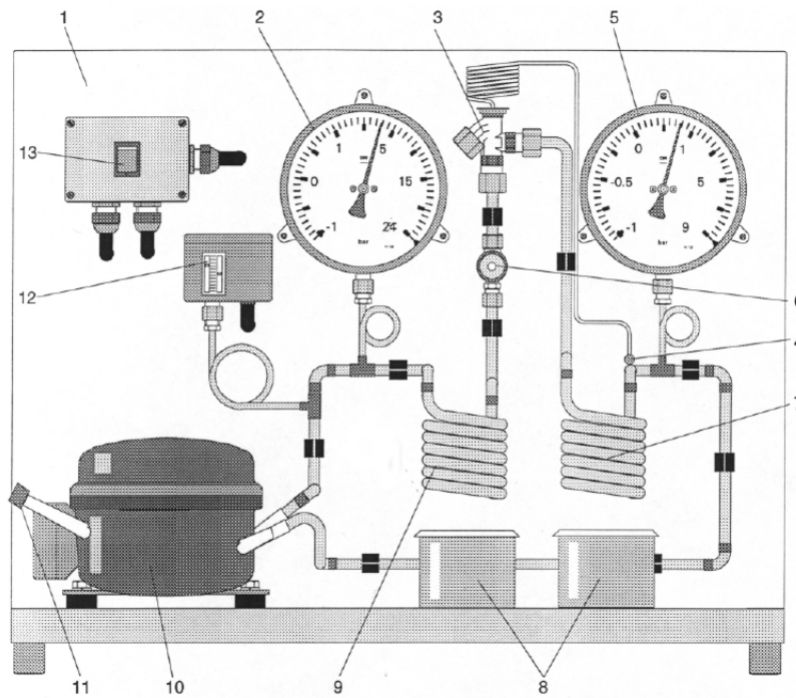


Abbildung 1:

- |                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| 2. Druck am Kondensator | 8. Behältnisse für Flüssigkeit |
| 3. Entspannungsventil   | 9. Kondensator                 |
| 5. Druck am Verdampfer  | 10. Kompressor                 |
| 7. Verdampfer           |                                |

## 2.2 Messung

Während der Versuchsdauer von  $t = 30$  min messen wir alle 2 min folgende Werte:

$p_1$  Druck am Kondensator

$T_{HD}$  Temperatur des zu erwärmenden Wassers

$\theta_{Ke}$  Temp. am Eingang des Kondensators

$\theta_{Ka}$  Temp. am Ausgang des Kondensators

$p_2$  Druck am Verdampfer

$T_{ND}$  Temperatur Energie liefernden Wassers

$\theta_{Ve}$  Temp. am Eingang des Verdampfer

$\theta_{Va}$  Temp. am Ausgang des Verdampfer

Mit diesen Werten können wir verschiedene Kennwerte der Wärmepumpe wie z.B. die Leistungszahl, Liefergrad oder die ausgetauschten Wärmemengen ermitteln. Genaueres dazu steht im Teil 3.

### 3 Auswertung

Für die nun folgende Auswertung stützen wir uns auf die Messdaten aus Tabelle 1.

Tabelle 1: Messdaten

t/s	$p_1/\text{bar}$	$p_2/\text{bar}$	$T_{HD}/^\circ\text{C}$	$T_{ND}/^\circ\text{C}$	$K_e/^\circ\text{C}$	$V_e/^\circ\text{C}$	$K_a/^\circ\text{C}$	$V_a/^\circ\text{C}$	$P/\text{kW}$
0	2,7	2,75	36	27,9	30,7	28,2	31,3	28	0,1
120	8,5	0,9	36	27,8	37,7	22,6	37,9	27,7	0,1
240	9	1	36,3	27	40,2	0	40,2	26,3	0,11
360	9,6	1,2	37,4	26,4	42,2	-4	42,2	25,1	0,11
480	10,3	1,3	39	25,6	44,4	-2,6	44,4	24,3	0,12
600	11	1,5	40,8	24,4	46,7	-0,8	46,7	23,4	0,12
720	11,5	1,6	42,6	23,3	48,6	0,1	48,5	22,6	0,12
840	12	1,7	44,6	22,8	51,3	1	50,3	21,9	0,12
960	12,6	1,76	46,4	21,6	53,5	1,7	51,9	21,3	0,12
1080	13,2	1,8	47,9	20,7	55,8	2,3	53,3	20,9	0,13
1200	13,6	1,96	49,6	19,7	58	3,3	54,8	20,4	0,13
1320	14,2	2	51	19,1	59,9	3,8	56	20,1	0,13
1440	14,6	2	52,4	19,4	61,6	4,3	57,2	19,9	0,13
1560	15	2,1	53,6	18,3	63,2	4,8	58,2	19,6	0,13
1680	15,4	2,2	54,7	17,7	64,5	5,4	59,1	19,3	0,13
1800	15,7	2,2	55,8	17,3	65,6	5,8	60	19,2	0,13

In beiden Gefäßen befanden sich zudem 2.3 l Wasser, was 2.3 kg entspricht.

Wir schätzen die Fehler der gemessenen Größen folgendermaßen ab:

- alle Temperaturen haben eine Unsicherheit von  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$
- alle Drücke haben eine Unsicherheit von  $0.5\text{ bar}$
- die Wassermenge hat eine Unsicherheit von  $0.05\text{ l}$
- die Leistung hat eine Unsicherheit von  $0.01\text{ kW}$

Wir haben die Rechnung bzw. das Prinzip einmal für den Fehler von  $Q_w$  durchgeführt, aber sonst die komplette Formel weggelassen, da diese Platz kostet und das Protokoll dadurch unübersichtlicher wird.

#### 3.1 Teil A

##### 3.1.1 Temperaturverläufe

Die Temperaturverläufe des Wassers beim Kondensator und beim Verdampfer sind in Abbildung 2 zu sehen.

##### 3.1.2 Ausgetauschte Wärmemengen

Die ausgetauschten Wärmemengen berechnen sich indem man in die gegebenen Formel folgenden Input macht:

$$\begin{aligned}
 T_{HD1} &= 36\text{ }^\circ\text{C} & T_{HD2} &= 55.8\text{ }^\circ\text{C} \\
 T_{ND1} &= 27.9\text{ }^\circ\text{C} & T_{ND2} &= 17.3\text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

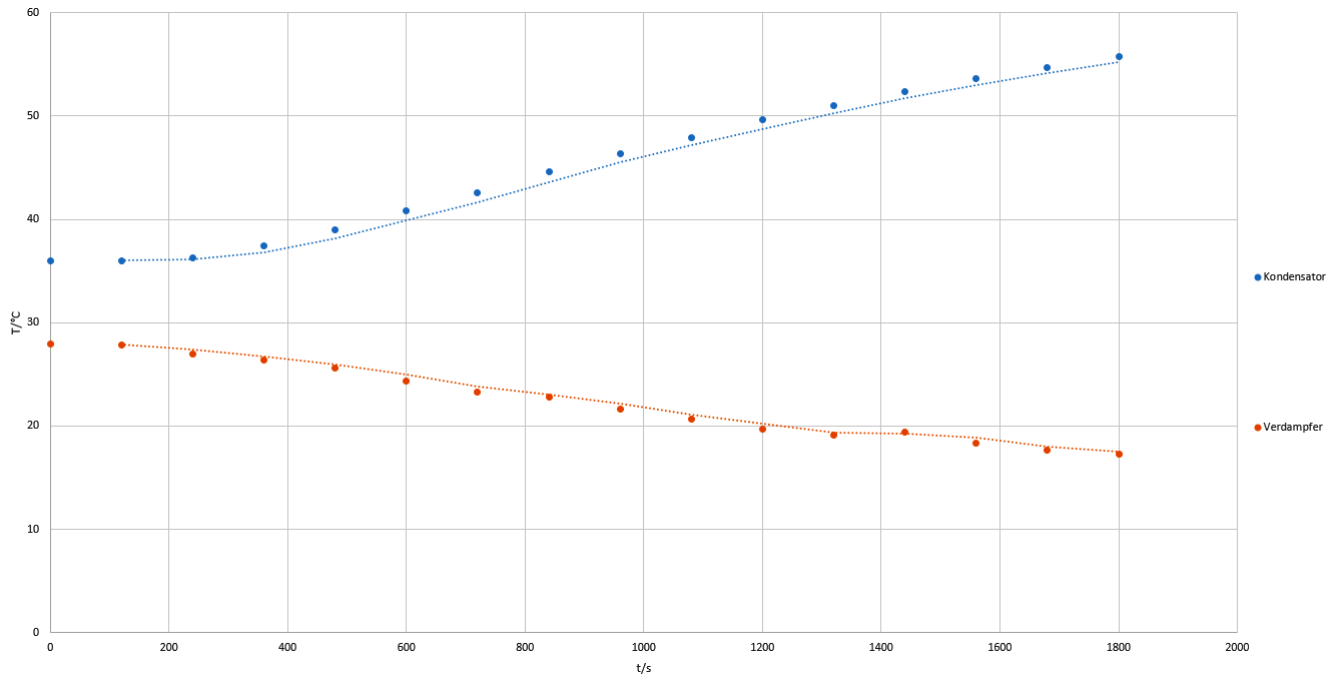


Abbildung 2: Temperaturverlauf der beiden Flüssigkeiten

Der Fehler berechnet sich dann so:

$$\Delta Q_w = \sqrt{(4,19 \cdot (55,8 - 36) \cdot 0,05)^2 + (4,19 \cdot 2,3 \cdot 0,2)^2} = 4,57 \text{ kJ}$$

Daraus ergeben sich diese Werte für die entzogene bzw hinzugefügte Wärmemenge:

$$Q_K = 190,81 \pm 4,57 \text{ kJ}$$

$$Q_V = -102,15 \pm 2,94 \text{ kJ}$$

Die Werte sind natürlich nicht gleich, da hier die aufgewendete mechanische Arbeit nicht berücksichtigt ist.

### 3.1.3 Leistungszahl und Arbeit zu verschiedenen Zeiten

Wir haben für jedes Messintervall sowohl die aufzuwendende Arbeit als auch die daraus resultierende geförderte Wärmemenge berechnet und dies zusammen mit der jeweiligen Leistungszahl in Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 2: Messwerte zu 3.1.3			
t/s	Leistungszahl	geförderte Wärmemenge/kJ	aufgewendete Arbeit/kW
0	/	/	/
120	4,39 ±0.23	0	0 ±0.002
240	3,9 ±0.23	2,89	0,58 ±0.0023
360	3,4 ±0.2	10,60	2,40 ±0.0025
480	2,91 ±0.17	15,41	3,94 ±0.0029
600	2,48 ±0.14	17,36	4,97 ±0.0032
720	2,20 ±0.12	17,34	5,40 ±0.004
840	2,04 ±0.10	19,27	6,32 ±0.004
960	1,87 ±0.09	17,34	6,04 ±0.0037
1080	1,76 ±0.08	14,45	5,23 ±0.0039
1200	1,65 ±0.08	16,38	6,16 ±0.004
1320	1,59 ±0.07	13,49	5,19 ±0.005
1440	1,58 ±0.07	13,49	5,21 ±0.005
1560	1,51 ±0.06	11,56	4,59 ±0.005
1680	1,47 ±0.06	10,60	4,27 ±0.005
1800	1,44 ±0.06	10,60	4,32 ±0.005

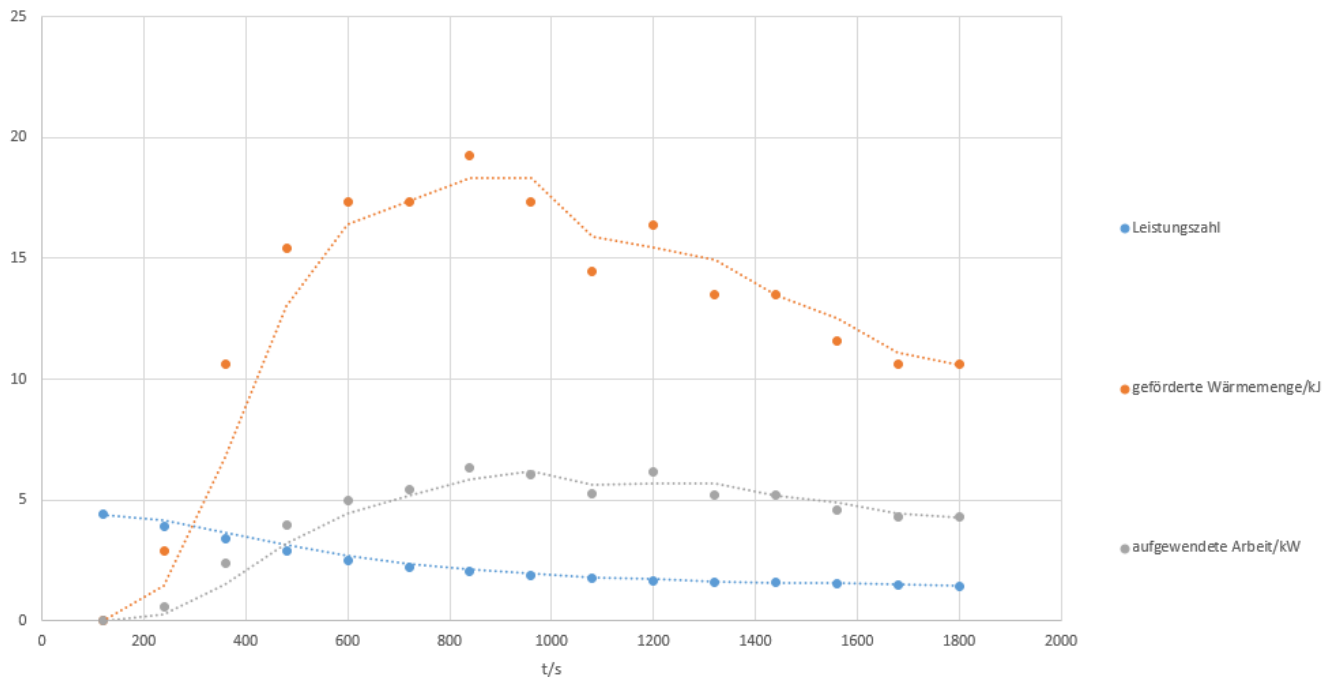


Abbildung 3:

Für die geförderte Wärmemenge ist kein Fehler angegeben, da dieser auf Grund der Temperaturungenauigkeit das zehnfache des eigentlichen Wertes betragen würde.

Man kann in der Graphik sehr gut erkennen, dass die Leistungszahl mit der Zeit auf knapp 30% des Startwertes absinkt. Das lässt auf eine stark sinkende Effizienz der Wärmepumpe schließen.

Wenn man sich nun die geförderte Wärmemenge und die dazu aufgewendete Leistung anschaut, erkennt

man, dass sich die Kurven synchron zueinander verhalten. Allerdings erkennt man auch bei diesen beiden Kurven die mit der Zeit sinkende Effizienz der Wärmepumpe. Schon nach  $t = 800$  s ist die maximale pro 2 min geförderte Wärmemenge erreicht und die Kurve sinkt rapide auf ca 55% der Maximalförderung ab.

Wenn man sich dagegen den Verlauf der aufgewendeten Leistung anguckt, dann sehen wir, dass hier die maximale Leistung zwar auch bei  $t = 800$  s erreicht wird, aber sie sinkt nicht so stark wie die geförderte Wärme. Wir beobachten hier lediglich einen Abfall um ca 30%. Es muss also eine im Verhältnis höhere Arbeit geleistet werden, um die gleiche Wärmemenge zu fördern  $\Rightarrow$  die Effizienz sinkt.

## 3.2 Teil B

### 3.2.1 Leistungszahl

Mit Hilfe der Formel 5.1 haben wir die Wärmeströme berechnet:

t/s	$\dot{Q}_K/kW$	$\dot{Q}_V/kW$
0	0 ±0.4	-0,008 ±0.0016
120	0,024 ±0.005	-0,064 ±0.012
240	0,088 ±0.017	-0,0481±0.009
360	0,128 ±0.025	-0,0642±0.012
480	0,144±0.029	-0,0963±0.019
600	0,144±0.029	-0,0883±0.017
720	0,16 ±0.04	-0,0401±0.009
840	0,144±0.029	-0,0963±0.019
960	0,12 ±0.024	-0,0722±0.014
1080	0,136 ±0.027	-0,0803±0.016
1200	0,112 ±0.022	-0,0481±0.01
1320	0,112 ±0.022	0,024±0.004
1440	0,096±0.019	-0,088±0.017
1560	0,088±0.017	-0,04±0.01
1680	0,088 ±0.017	-0,032 ±0.007

Nun nehmen wir die Werte bei  $t = 1800s$  und  $t = 0s$ :

$$\dot{Q}_K = 0.106 \pm 0.0011 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_V = -0.056 \pm 0.0011 \text{ kW}$$

Für die Leistung des Kompressors haben wir einen Mittelwert gebildet:

$$P = 0.11 \pm 0.01 \text{ kW}$$

Daraus ergibt sich die Leistungszahl:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_K}{P} = \frac{0.106}{0.12} = 0.96 \pm 0.1$$

Uns fällt auf, dass die Leistungszahl unterhalb von 1 liegt. Das ist normalerweise nicht der Fall, da die geförderte Wärmemenge immer die in den Kompressor gesteckte Leistung übertreffen müsste.

Uns fällt dazu folgende Erklärung ein:

Wenn wir uns die Leistung, die der Kompressor aufwendet im Verlauf der Zeit ansehen, bemerken wir einen Anstieg von 0.1 kW auf 0.13 kW. Eigentlich sollte dieser Wert konstant sein. Wenn wir die Berechnung mit den Anfangswerten durchführen, kommen wir auch auf eine Leistungszahl  $> 1$ .

Wir erklären uns die steigende Leistung damit, dass sich der Kompressor im Laufe des Versuchs erwärmt hat und dadurch das Arbeitsmittel nicht mehr so effizient komprimieren konnte.

### 3.2.2 Liefergrad

Wir haben folgende Daten für  $t = 30 \text{ min}$ :

$$p_K = 15.7 \text{ bar} \quad T_K = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_V = 2.2 \text{ bar} \quad T_V = 19.2 \text{ }^\circ\text{C}$$



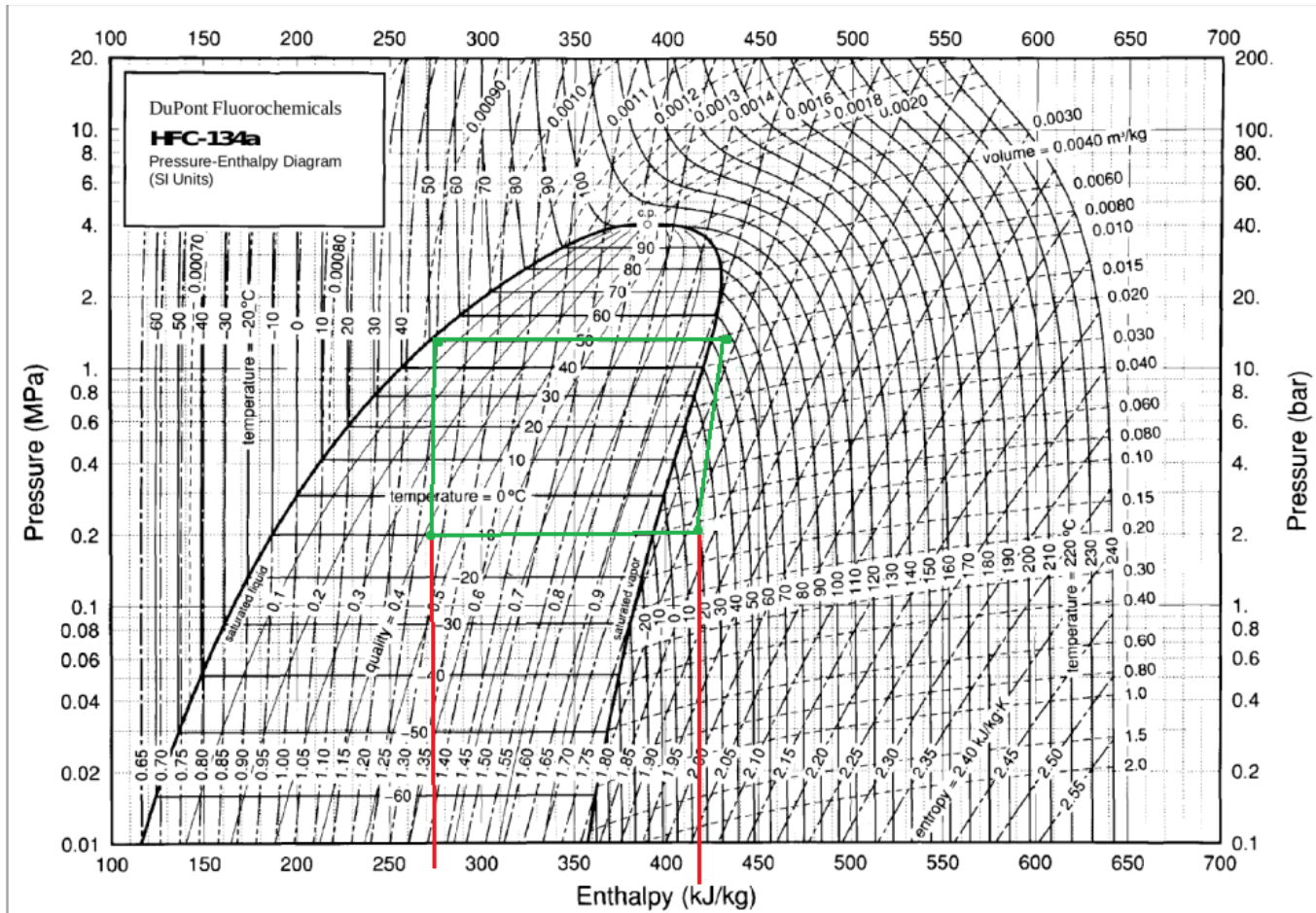


Abbildung 4:

Daraus können wir mit Hilfe der Abbildung 4 die Werte für  $h_1$  und  $h_3$  ermitteln

Es ergeben sich:

$$h_1 = 415 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{und} \quad h_3 = 280 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{und} \quad v = 0.12 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Nun berechnen wir den Volumenstrom:

$$\dot{V} = v \cdot \frac{\dot{Q}_v}{h_1 - h_3} = 0.12 \cdot \frac{0.056}{415 - 280} = 49.777 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Mit den gegebenen Daten für  $V_g$  und  $f$  können wir nun den geometrischen Volumenstrom berechnen:

$$\dot{V}_g = V_g \cdot \frac{f}{60} = 3.13 \text{ cm}^3 \cdot \frac{2800 \text{ 1/min}}{60 \text{ s}} = 150.24 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Daraus ergibt sich der Liefergrad:

$$\lambda = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_g} = \frac{49.77}{150.24} = 33.13 \%$$

Der Liefergrad ist eine folgendermaßen definierte Größe:

$$\lambda = \frac{\text{eingeströmtes Volumen}}{\text{Größe des Kolbens}}$$

Der Liefergrad ist also ein Maß dafür wie gut der Kompressionsvorgang verläuft. In unserem Fall ist der Kompressionsvorgang eher schlecht. Das wird ein weiterer Grund für unsere suboptimale Leistungszahl sein.

### 3.3 Fehlerbetrachtung

Eine Fehlerquelle hat mit der Art des Ablesens zu tun. Da wir nicht alle Werte gleichzeitig ablesen und aufschreiben können, sind die jeweiligen Werte nicht auf einer Orthogonalen zum Zeitstrahl angeordnet. Wie sich dieser Fehler auf unsere Messung auswirkt, ist schwer abzusehen und auch nicht rauszurechnen. Deshalb haben wir diesen Fehler nicht berücksichtigen können und auch nicht ins Diagramm eingetragen.

Diesen Fehler könnte man mit einer Computergestützten Messung umgehen.

Eine zweite Fehlerquelle sind die Ablesinstrumente selber. Temperatur- und Druckfühler sind nicht unendlich genau (was nebenbei diversen physikalischen Gesetzen widersprechen würde), sondern haben einen Fehler. Leider waren bei diesem Versuch weder im Handbuch noch auf den Instrumenten an sich diese Fehler angegeben. Hier haben wir mit geschätzten Fehlerwerten und mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung einen Fehler bei unseren Werten ermittelt.

Eine dritte Fehlerquelle ist ganz speziell in Teil B anzutreffen. Hier mussten wir ein vorgegebenes Diagramm zur Eintragung unserer Werte nutzen und anschließend neue Werte daraus ablesen. Hier kommt es natürlich zu Eintrage- und Ablesefehlern. Auf Grund der teilweise doch eher schlecht abzulesenden Skala wären hier die Fehler so groß, dass unsere Ergebnisse nicht mehr sinnvoll zu verwenden wären. Deshalb haben wir uns entschieden diesen Fehler beiseite zu lassen.

## **4 Abschlussbetrachtung**

Abschließend betrachtet lief unsere Messung gut. Unsere Auswertung ergab, dass die verwendete Wärmepumpe wohl nicht besonders gut arbeitet, was sich in der schlechten Leistungszahl und dem schlechten Wirkungsgrad des Kompressors wiedergibt.