



PROTOKOLL THERMISCHE ENERGIETECHNIK

Grundlagen des Wärmepumpenprozesses

Teilnehmer:

Carolyn Lohmann
Willy Messerschmidt
Marcus Willbrandt
Roman-Luca Zank

Protokollführer:	Roman-Luca Zank
Versuchsbetreuung:	Kathrin Stritzel
Datum der Versuchsdurchführung:	01.12.2020
Abgabe:	15.12.2020

Merseburg den 15.12.2020

Symbolverzeichnis

KM	...	Kältemittel
KW	...	Kühlwasser
P	...	Kompressorleistung (Messgerät)
P_{Dia}	...	Kompressorleistung (Diagramm)
\dot{m}_{KM}	...	Massenstrom des Kältemittels
\dot{m}_{KW}	...	Massenstrom des Kühlwassers
Δp_1	...	gemessener Verdampferdruck
p_1	...	absoluter Verdampferdruck
Δp_2	...	gemessener Kondensatordruck
p_2	...	absoluter Kondensatordruck
t_1	...	Verdampferaustrittstemperatur
t_2	...	Kondensatoreintrittstemperatur
t_3	...	Kondensatoraustrittstemperatur
t_4	...	Verdampfereintrittstemperatur
t_5	...	Eintrittstemperatur Kühlwasser (Kompressor)
t_6	...	Austrittstemperatur Kühlwasser (Kompressor)
t_7	...	Austrittstemperatur Kühlwasser (Kondensator)
t_8	...	Austrittstemperatur Kühlwasser (Verdampfer)
h_i	...	Kältemittelenthalpien am Punkt i
$t_{\text{Ü}}$...	Überhitzungstemperatur
t_{Kond}	...	Kondensationstemperatur bei p_2
\dot{V}_1	...	Volumenstrom durch den Kompressor
t_9	...	Eintrittstemperatur der Kühlluft

t_{10}	... Austrittstemperatur der Kühlluft
v_L	... Luftgeschwindigkeit am luftgekoppelten Verdampfer
p_u	... Umgebungsdruck
A	... Fläche des luftgekoppelten Verdampfers
$\dot{Q}_{W,\text{Verd}}$... Wärme im Verdampfer ausgehend vom Wasser
\dot{Q}_{4-1}	... Wärme im Verdampfer an das Kältemittel
\dot{Q}_{2-3}	... Wärme im Kondensator ausgehend vom Kältemittel
$\dot{Q}_{W,\text{kond}}$... Wärme im Kondensator an das Wasser
\dot{Q}_{1-2}	... Wärme im Kompressor ausgehend vom Kältemittel
$\dot{Q}_{W,5-6}$... Wärme im Kompressor an das Wasser
$\dot{Q}_{W,5-7}$... Gesamtwärmeübertragung an das Wasser
$\dot{Q}_{\ddot{U}}$... Überhitzungswärme
\dot{Q}_K	... Kondensationswärme
\dot{Q}_H	... Heizwärme
ε	... Leistungsziffer
π	... Druckverhältnis
ΔT	... Temperaturhub

1 Einleitung und Versuchsziel

Im folgenden Versuch werden die Grundlagen des Wärmepumpenprozesses an einer Beispielanlage untersucht und die Ergebnisse verschiedener Fahrweisen diskutiert. Es werden Kenntnisse zu linksläufigen Kreisprozessen, Arbeit mit einem $\lg p, h$ -Diagramm, sowie die energetische Bilanzierung der einzelnen Apparate und des Gesamtprozesses. In den folgenden Abbildungen 1, 2 und 3 sind zwei schematische Skizzen, sowie der technische Versuchsaufbau der zwei grundlegenden Fahrweisen dargestellt.

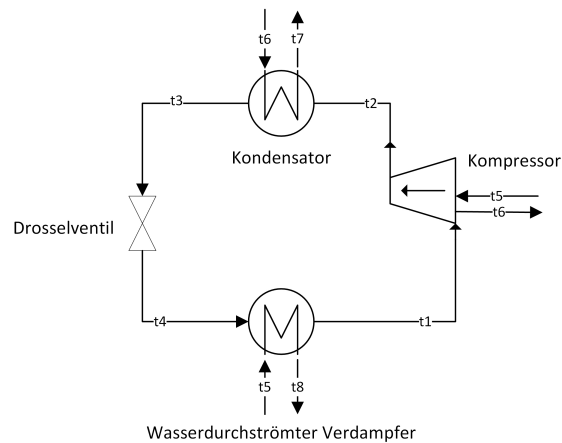


Abb. 1: Schematik des Versuchsaufbaus mit wasserdurchströmten Verdampfer

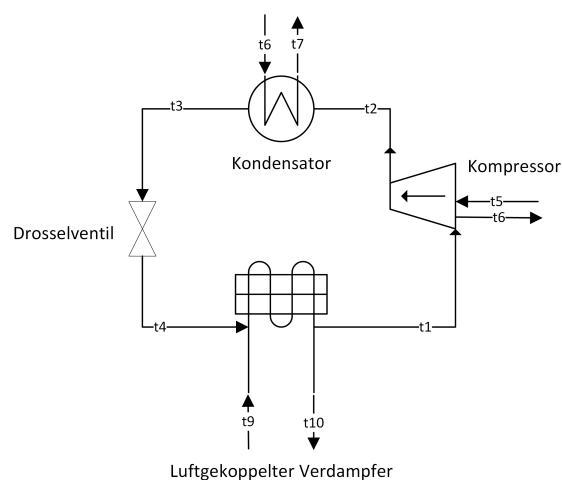


Abb. 2: Schematik des Versuchsaufbaus mit luftgekoppelten Verdampfer

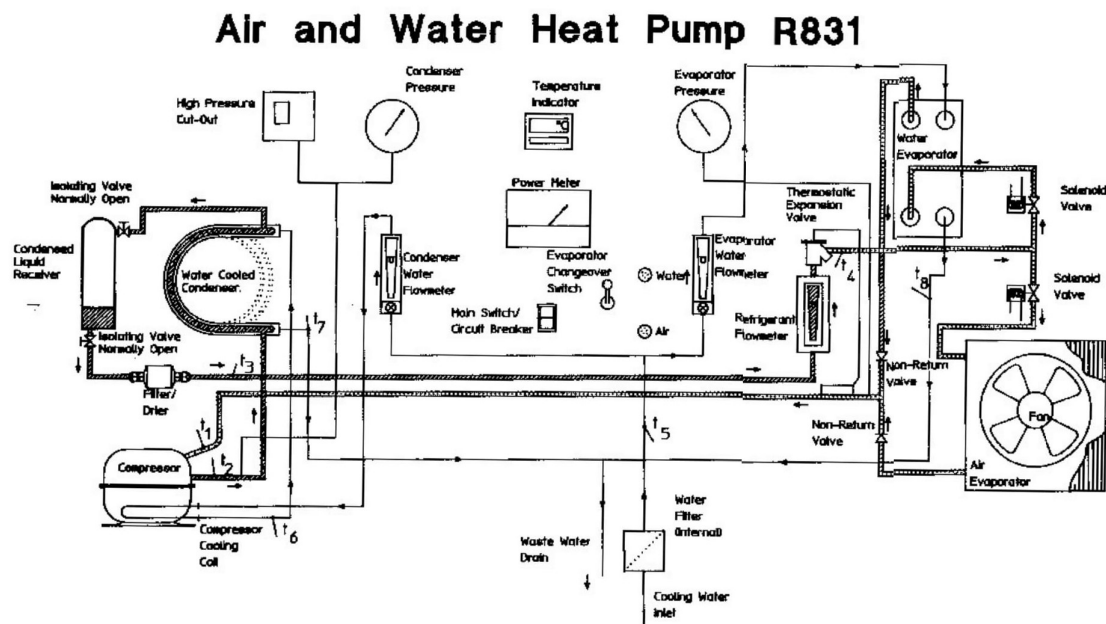


Abb. 3: Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus

2 Versuchsdurchführung

Die Anlage wurde durch Anstellen des Wasserkreislaufes, der Durchflussmessgeräte, sowie durch das Umlegen des Hauptschalters in Betrieb genommen.

Für die ersten fünf Messreihen wird der wasserdurchströmter Verdampfer genutzt, welcher durch einen Schalter aktiviert wird.

Für die ersten drei Messreihen wurde der Massenstrom des Kühlwassers durch den wasserdurchströmten Verdampfer konstant auf $50 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ gehalten und die Massenströme des Kühlwassers in den Kompressor bzw. Kondensator wurden auf $27 \frac{\text{g}}{\text{s}}$, $20 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ und $15 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ für die Messreihen 1 bis 3 eingestellt. Die Einstellung der Massenströme erfolgt analog über ein Einstellrad. Abgelesen wurde ebenfalls analog über die aufgebrachte Skala der Durchflussmesser.

Die darauffolgenden Messreihen 4 und 5 wurden mit konstantem Massenstrom des Kühlwassers von $15 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ durch Kompressor bzw. Kondensator und der Massenstrom des Kühlwassers durch den wasserdurchströmten Verdampfer mit $35 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ und $20 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ gefahren.

Für Messreihe 6 erfolgte ein Umschalten auf den luftgekoppelten Verdampfer. Bei dieser Messreihe wurde ein Massenstrom von $16 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ für das Kühlwasser des Kompressors bzw. Kondensators gefahren. Der Volumenstrom der Luft wurde durch punktuelle Messung der Luftgeschwindigkeit (siehe Abb. 4), der Temperatur und Abmessung des Luftaustrittsquerschnitts im Verdampfer berechnet.

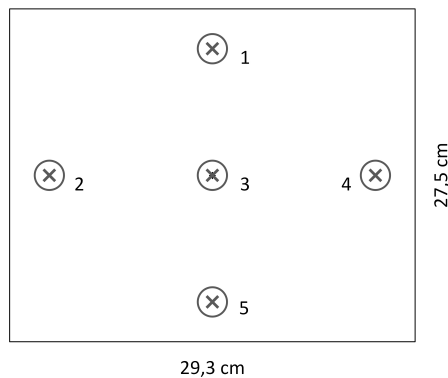


Abb. 4: Skizze zur Messung der Luftgeschwindigkeiten und Abmaße des luftgekoppelten Verdampfers

Ansonsten gilt für jede Messreihe, dass die entsprechenden Temperaturen der Ströme sensorisch gemessen und digital ausgegeben wurden. Die Kompressorleistung ließ sich dagegen für jede Messreihe analog mittels Zeiger des Drehpulsmeßwerkes ablesen. Die Drücke in Kompressor und Kondensator wurden mittels Manometer aufgenommen und ebenfalls analog abgelesen. Die Umgebungstemperatur, sowie der Umgebungsdruck wurden mit der bereitgestellten, anlagenunabhängigen Barometer-Thermometer-Einheit analog abgelesen.

3 Ergebnisse

Messdaten

Tab. 1: Messdaten

Messdaten	Messreihe		1	2	3	4	5	6
	Kompressorleistung	P [W]	360	380	410	400	380	400
	Umgebungsdruck	p_u [kPa]	101,7					
R134a	Massenstrom Kältemittel	\dot{m}_{KM} $\left[\frac{g}{s}\right]$	5,0	5,8	6,5	6,1	5,7	6,0
	gemessener Verdampferdruck	dp_1 [kPa]	115	140	180	155	120	160
	absoluter Verdampferdruck	p_1 [kPa]	216,7	241,7	281,7	256,7	221,7	261,7
	gemessener Kondensatordruck	dp_2 [kPa]	600	720	1900	870	800	160
	absoluter Kondensatordruck	p_2 [kPa]	701,7	821,7	2001,7	971,7	901,7	904,7
	Verdampferaustritts- temperatur	t_1 [°C]	8,4	8,1	7,8	7,8	10,2	14,4
	Kondensatoreintritts- temperatur	t_2 [°C]	60,0	64,3	67,7	67,8	56,4	65,2
	Kondensatoraustritts- temperatur	t_3 [°C]	21,9	26,0	34,0	33,2	30,6	32,8
	Verdampferintritts- temperatur	t_4 [°C]	-9,5	-6,1	-3,8	-4,8	-8,4	-2,7
Kompressor- kühlung	Massenstrom Kühlwasser	\dot{m}_{KW} $\left[\frac{g}{s}\right]$	27	20	15	15	15	16
	Eintrittstemperatur Kühlwasser	t_5 [°C]	7,7	7,6	7,8	7,7	7,8	8,3
	Austrittstemperatur Kühlwasser	t_6 [°C]	8,2	8,7	9,3	9,3	8,9	9,6
Kondensator- kühlung	Massenstrom Kühlwasser	\dot{m}_{KW} $\left[\frac{g}{s}\right]$	27	20	15	15	15	16
	Eintrittstemperatur Kühlwasser	t_6 [°C]	8,2	8,7	9,3	9,3	8,9	9,6
	Austrittstemperatur Kühlwasser	t_7 [°C]	19,8	26,5	34,0	32,1	29,7	32,6
wasser- durchströmter Verdampfer	Massenstrom Kühlwasser	\dot{m}_{KW} $\left[\frac{g}{s}\right]$	50	50	50	35	20	-
	Eintrittstemperatur Kühlwasser	t_5 [°C]	7,7	7,6	7,8	7,7	7,8	-
	Austrittstemperatur Kühlwasser	t_8 [°C]	3,1	3,0	2,6	1,0	0	-

Tab. 2: Messdaten zu Messreihe 6 - luftgekoppelter Verdampfer

Messpunkt		1	2	3	4	5	Mittelwert
Luftaustrittsfläche	A [m ²]	0,081					
Umgebungstemperatur	t_9 [°C]	22,7					
Luftaustrittstemperatur	t_{10} [°C]	5,3	9,2	4,9	9,4	16,2	9,0
Luftgeschwindigkeit	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	2,70	2,20	2,18	2,43	1,84	2,27

Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der aufgenommenen Messreihen beginnt bei Messreihe 6, da hier aufgrund des luftgekoppelten Verdampfers zusätzliche Auswertungsschritte notwendig sind.

Wie in Tabelle 3 festgehalten, wird angenommen, dass die Wärmekapazität, sowie die Dichte der Luft mit den dargestellten Werten als konstant angenommen werden.

Die Berechnung des Volumenstroms, sowie des Massenstrom der Luft sind in den Gleichungen 1 und 2 dargestellt.

Folgende Berechnungen, wie die der übertragenen Wärmen, werden sich auf die Mittelwerte und Annahmen dieser Tabelle 3 beziehen.

$$\begin{aligned}\dot{V}_L &= v_L \cdot A = 2,70 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,081 \text{ m}^2 \\ &= \underline{0,22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_L &= \dot{V}_L \cdot \rho_L = 0,22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= \underline{0,26 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}\end{aligned}\quad (2)$$

Tab. 3: zusätzliche Auswertung von Messreihe 6

Messpunkt		1	2	3	4	5	Mittelwert
Dichte der Luft	$\rho_L \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	1,2					
Wärmekapazität der Luft	$c_{pL} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	1,0					
Volumenstrom der Luft	$\dot{V}_L \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$	0,22	0,18	0,18	0,20	0,15	0,18
Massenstrom der Luft	$\dot{m}_L \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	0,26	0,22	0,22	0,24	0,18	0,22

Es folgen die Berechnungen zu Tab. 4 und Tab. 5. Innerhalb dieser Gleichungen sind ebenfalls die geforderten Lösungen der Aufgaben aufgeführt. Die maßgebliche Grundgleichung für die Berechnungen der Wärmen ist unter (3) zu finden.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot (h_i - h_j) \quad (3)$$

Berechnungen zu Tabelle 4

$$\begin{aligned} P_{\text{Dia}} &= \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1) = 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(446 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 408 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ &= \underline{190 \text{ W}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= v_1 \cdot \dot{m}_{KM} = 30 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ &= \underline{1,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \end{aligned} \quad (5)$$

→ entspricht Aufgabe 3 (Messreihe 1 bis 5):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{W, Verd}} &= \dot{m}_{KW, \text{Verdampfer}} \cdot c_{P, \text{H}_2\text{O}} \cdot (t_5 - t_8) \\ &= 50 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot (7,7 - 3,1) \text{ K} = \underline{961 \text{ W}} \end{aligned} \quad (6)$$

→ entspricht Aufgabe 3 (Messreihe 6):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{L, Verd}} &= \dot{m}_L \cdot c_{P, \text{Luft}} \cdot (t_9 - t_{10}) \\ &= 0,22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot (22,7 - 9,0) \text{ K} = \underline{3 \text{ W}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{4-1} &= \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_4) \\ &= 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(408 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 230 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) = \underline{890 \text{ W}} \end{aligned} \quad (8)$$

→ entspricht Aufgabe 2:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{2-3} &= \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_3) \\ &= 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(446 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 230 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) = \underline{1080 \text{ W}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{W, Kond}} &= \dot{m}_{KW, \text{Kondensator}} \cdot (t_7 - t_6) \\ &= 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,18 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (19,8 - 8,2) \text{ K} = \underline{1309 \text{ W}} \end{aligned} \quad (10)$$

→ entspricht Aufgabe 1:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{1-2} &= \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1) \\ &= 5,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(446 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 408 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) = \underline{190 \text{ W}}\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{W, 5-6} &= \dot{m}_{KW, \text{Kompressor}} \cdot (t_6 - t_5) \\ &= 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,18 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (8,2 - 7,7) \text{ K} = \underline{56 \text{ W}}\end{aligned}\quad (12)$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{W, 5-7} &= \dot{m}_{KW, \text{Kompressor/Kondensator}} \cdot (t_7 - t_5) \\ &= 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,18 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (19,8 - 7,7) \text{ K} = \underline{1366 \text{ W}}\end{aligned}\quad (13)$$

→ entspricht Aufgabe 4:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{W, \text{Kond}}}{P} = \frac{1309 \text{ W}}{360 \text{ W}} = \underline{3,6}\quad (14)$$

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{701,7 \text{ kPa}}{216,7 \text{ kPa}} = \underline{3,2}\quad (15)$$

Berechnungen zu Tabelle 5

→ entspricht Aufgabe 5:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{Kond+Komp}} &= \frac{\dot{Q}_{W, 5-7}}{P} = \frac{1366 \text{ W}}{360 \text{ W}} \\ &= \underline{3,8}\end{aligned}\quad (16)$$

→ entspricht Aufgabe 7:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{Kältemaschine}} &= \frac{\dot{Q}_{W/L, \text{Verd}}}{P} = \frac{961 \text{ W}}{360 \text{ W}} \\ &= \underline{2,7}\end{aligned}\quad (17)$$

Tab. 4: Ausgewertete Messdaten der Messreihe 1 bis 6

Messreihe		1	2	3	4	5	6
Kompressorleistung	P [W]	360	380	410	400	390	400
Kompressorleistung (Dia)	P_{Dia} [W]	190	220	163	336	114	264
Kältemittelenthalpien	h_1 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	408	407	405	405	410	405
	h_2 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	446	445	430	460	430	449
	h_3 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	230	233	248	249	243	249
	h_4 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	230	233	248	249	243	249
Verdampfungstemperatur	t_4 [$^{\circ}\text{C}$]	-9,5	-6,1	-3,8	-4,8	-8,4	-2,7
Kondensationstemperatur bei p_2	t_{Kond} [$^{\circ}\text{C}$]	27	35	68	38	36	36
spezifisches Volumen	v_1 $\left[\frac{\text{dm}^3}{\text{kg}}\right]$	30	25	9	21	23	78
Volumenstrom durch den Kompressor	$\dot{V}_1 \cdot 10^{-4}$ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	1,5	1,5	0,59	1,3	1,3	4,7
Kältemittelmassenstrom	$\dot{m}_{KM} \cdot 10^{-3}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	5,0	5,8	6,5	6,1	5,7	6,0e-3
Wärmeübertragung im Verdampfer <i>vom Wasser/Luft</i> <i>an das Kältemittel</i>	$\dot{Q}_{\text{W, Verd}}$ [W]	961	961	1087	980	652	3002
	\dot{Q}_{4-1} [W]	890	1009	1021	952	952	936
Wärmeübertragung im Kondensator <i>vom Kältemittel</i> <i>an das Wasser</i>	\dot{Q}_{2-3} [W]	1080	1230	1183	1287	1066	1200
	$\dot{Q}_{\text{W, kond}}$ [W]	1309	1488	1549	1492	1304	1538
Wärmeübertragung im Kompressor <i>vom Kältemittel</i> <i>an das Wasser</i>	\dot{Q}_{1-2} [W]	190	220	163	336	114	264
	$\dot{Q}_{\text{W, 5-6}}$ [W]	56	92	94	100	69	87
Gesamtwärmeübertragung an das Wasser	$\dot{Q}_{\text{W, 5-7}}$ [W]	1366	1580	1643	1593	1373	1625
Leistungsziffer	ε [—]	3,6	3,9	3,8	3,7	3,3	3,8
Druckverhältnis	π [—]	3,2	3,4	7,1	3,8	4,1	3,5

Tab. 5: Leistungsziffern: Kondensationswärme, Kondensations- und Kompressionswärme, Kältemaschine

Messreihe		1	2	3	4	5	6
Leistungsziffer	$\varepsilon_{\text{Kond}}$ [—]	3,6	3,9	3,8	3,7	3,3	3,8
Leistungsziffer	$\varepsilon_{\text{Kond+Komp}}$ [—]	3,8	4,2	4,0	4,0	3,5	4,1
Leistungsziffer	$\varepsilon_{\text{Kältemaschine}}$ [—]	2,7	2,5	2,7	2,5	1,7	7,5

Aufgabe 6

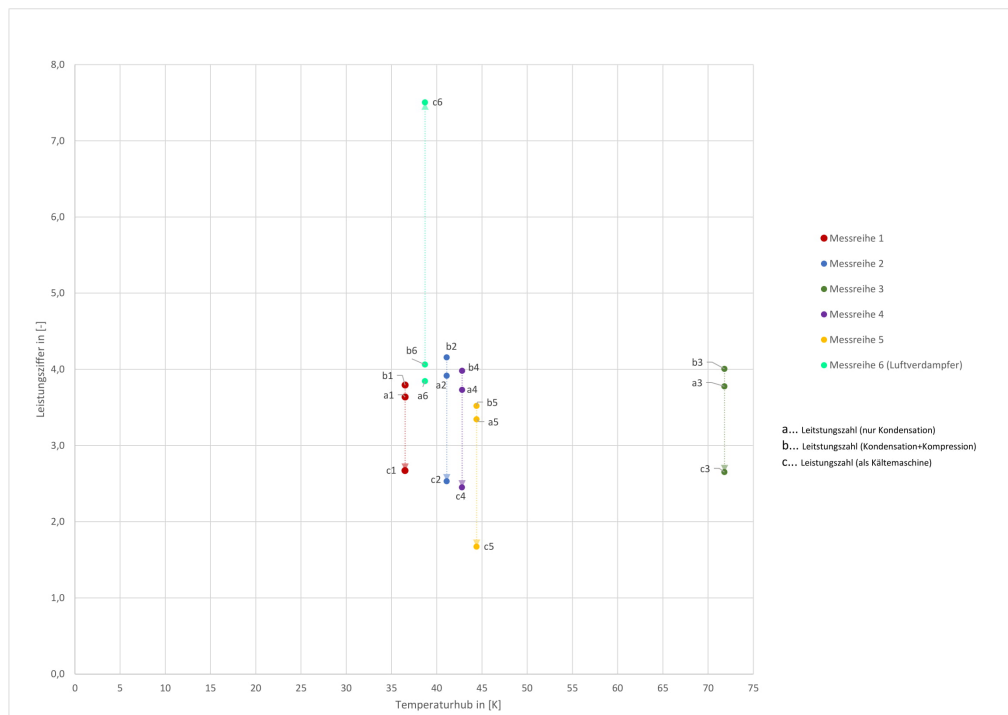


Abb. 5: Leistungsziffern in Abhängigkeit vom Temperaturhub

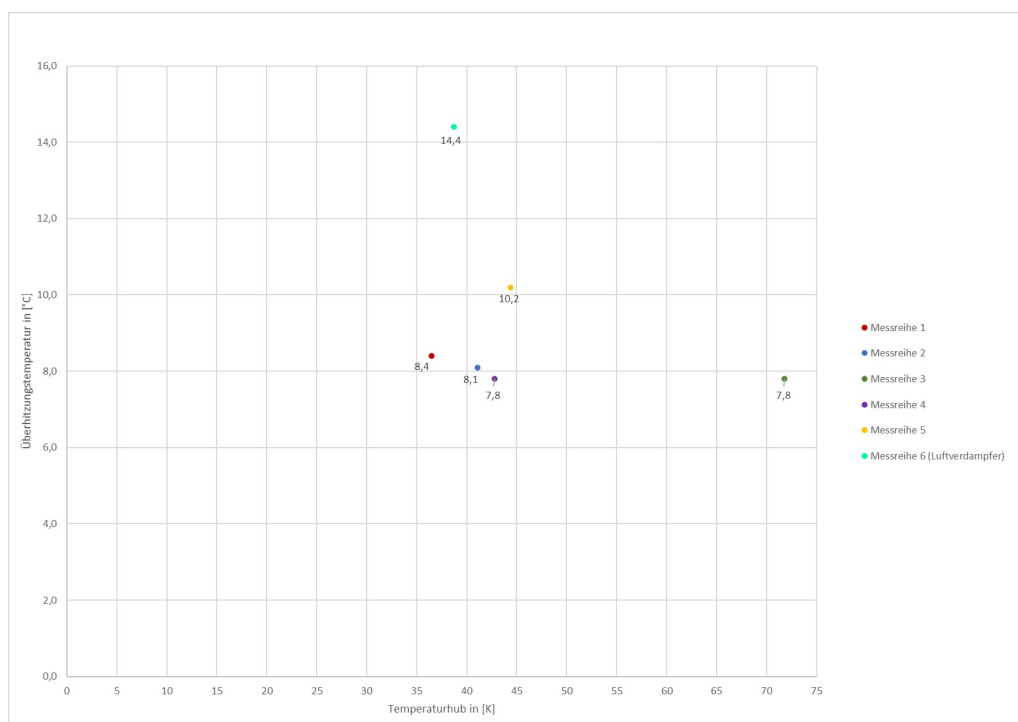


Abb. 6: Überhitzungstemperaturen in Abhängigkeit vom Temperaturhub

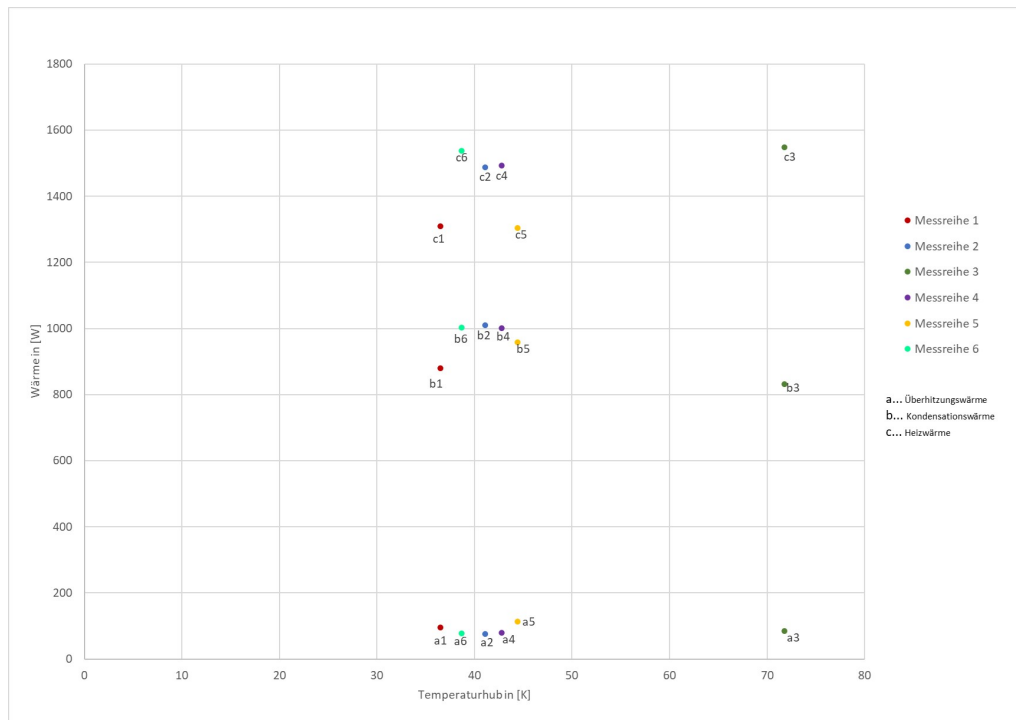


Abb. 7: Überhitzungs-, Kondensations- und Heizwärme in Abhängigkeit vom Temperaturhub

4 Diskussion der Ergebnisse

Literatur