



# PROTOKOLL PROZESSTECHNIK

## Verdunstungskühlung am Kühlturm

### Teilnehmer:

Maximilian Köhler  
Roman-Luca Zank

<b>Protokollführer:</b>	Roman-Luca Zank
<b>Datum der Versuchsdurchführung:</b>	27.10.2020
<b>Abgabe:</b>	25.11.2020

Merseburg den 25.11.2020

# 1 Einleitung und Versuchsziel

Im folgenden Versuch wird die Verdunstungskühlung von Wasser anhand eines Kühlturms untersucht. Der Versuchsstand stellt dabei die Kühlung von Kühlwasser mittels warmer Sommerluft dar. Ziel ist es hierbei den Massen- bzw. den Volumenstrom der zu geführten, warmen Luft über Wärme- und Stoffbilanzen zu bestimmen, sowie die Dokumentation der Messwerte in ein MOLLIER-Diagramm. Zusätzlich werden ein Fließbild der Anlage und eine Einschätzung über die Effektivität des Prozesses zu gefordert.

## 2 Theoretische Grundlagen

Grundlage für den Versuch am Kühlturm stellt die Kopplung von Wärme- und Stoffübergang zwischen warmen Kühlwasser und der zugeführten warmen Luft dar.

Zu Beginn des Versuches sind dabei die Wärmeverluste durch die Leitung des Kühlwassers ohne Luftstrom zu betrachten. Die Berechnung der Verlustwärme  $\dot{Q}_V$  erfolgt in diesem Versuch über die Wärmekapazität des Wassers  $c_{P_{H_2O}}$ , der Temperaturdifferenz des Wassers zwischen Eintritt  $T_{\alpha,H_2O,V}$  und Austritt  $T_{\omega,H_2O,V}$  des Bilanzraumes, sowie dem Massenstrom des Wassers.

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{P_{H_2O}} \cdot (T_{\alpha,H_2O,V} - T_{\omega,H_2O,V}) \quad (1)$$

Nach Ermittlung der Verlustwärme kann nun mit der Gesamtwärme  $\dot{Q}_{ges}$  des jeweiligen laufenden Prozesses mit warmer Luft, die nutzbare Wärme  $\dot{Q}_{Nutz}$  berechnet werden. Wichtig ist dabei, dass die Wassertemperatur und der Massenstrom des Wassers nahezu konstant gehalten werden mussten.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ges} &= \dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_V \\ \dot{Q}_{Nutz} &= \dot{Q}_{ges} - \dot{Q}_V \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_{\text{Nutz}} &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, \text{ges}}) - \dot{m} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, V} - T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, V}) \\
&= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, V} + T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, V}) \\
&= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, V}) \quad (3)
\end{aligned}$$

Ausgehend von der MERKEL'schen Hauptgleichung lässt sich nun eine vereinfachte Energiebilanz zwischen dem Kühlwasser und der warmen Luft aufstellen. Diese vereinfachte Form gilt unter der Annahme, dass die Verdunstungsmenge an Wasser im Vergleich zur Kühlwassermenge vernachlässigbar ist.

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_L &= \dot{Q}_{\text{Nutz}} \\
\dot{m}_L \cdot (h_{L2} - h_{L1}) &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\omega, \text{H}_2\text{O}} - T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}}) \\
\dot{m}_L \cdot (h_{L2} - h_{L1}) &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, V}) \quad (4)
\end{aligned}$$

Umgeformt führt diese Gleichung zum Massenstrom der Luft. Die benötigten spezifischen Enthalpien der feuchten Luft lassen sich mit dem MOLLIER-Diagramm bestimmen.

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{h_{L2} - h_{L1}} = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, V})}{h_{L2} - h_{L1}} \quad (5)$$

Um den geforderten Volumenstrom zu bestimmen ist zusätzlich eine Berechnung der Dichte für die entsprechenden Messreihen notwendig. In diesem Fall erfolgt die Bestimmung über den Sättigungsdampfdruck über Wasser durch die MAGNUS-Formel und der Gaskonstante für feuchte Luft.

**Magnus-Formel:**

$$E [\text{Pa}] = 6,112 \cdot 10^2 \text{ Pa} \cdot \exp^{\frac{17,62 \cdot T_L [^\circ\text{C}]}{243,12 \text{ } ^\circ\text{C} + T_L [^\circ\text{C}]}} \quad (6)$$

### Allgemeine Gaskonstante der feuchten Luft:

$$R_f \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] = \frac{R_t}{1 - \varphi \cdot \frac{E}{p} \cdot \left( 1 - \frac{R_t}{R_d} \right)} \quad (7)$$

$p \dots$  Luftdruck der Umgebung

$R_t \dots$  allgemeine Gaskonstante der trockenen Luft  $R_t = 287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$R_d \dots$  allgemeine Gaskonstante von Wasserdampf  $R_d = 461,523 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

### Ideale Gasgleichung für Luftdichte:

$$\begin{aligned} p \cdot V_L &= m_L \cdot R_f \cdot T_L [\text{K}] & (\rho &= \frac{m}{V}) \\ \rho_L &= \frac{p}{R_f \cdot T_L [\text{K}]} & (8) \end{aligned}$$

Mit der berechneten Luftdichte und dem Massenstrom lässt sich nun berechnen welchen Volumenstrom die durch den Kühlturm strömende Luft hat:

$$\dot{V}_L = \dot{m} \cdot \rho_L \quad (9)$$

# 3 Versuchsdurchführung

## Aufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 1 als Verfahrensfliessbild dargestellt. Zu beachten ist, dass die Regelung für den Heizlüfter in dieser Darstellung nicht aufgeführt ist.

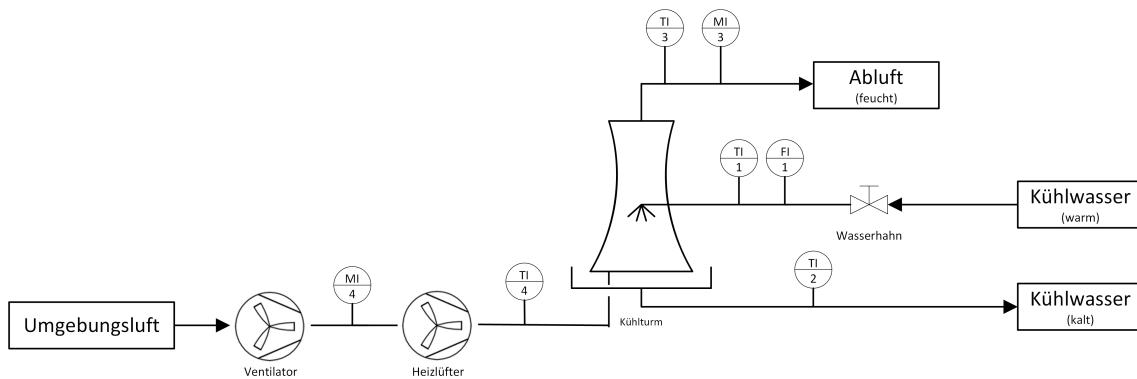


Abb. 1: Verfahrensfliessbild des Versuchsaufbaus

## Durchführung

Der Versuch gliederte sich in drei Teilversuche, welche sich hauptsächlich in den Betriebsparametern des Versuchsstandes unterscheiden.

Begonnen wurde jeweils mit der Bestimmung des Wärmeverlustes des Kühlwassers über die Leitungen. Dafür wurde geprüft, dass die simulierte Luftströmung durch das Gebläse, sowie der Heizlüfter abgeschaltet waren und lediglich das Kühlwasser den Kühlturm passierte. Dieser Verlustwärmestrom wird für jeden Teilversuch einmal bestimmt in dem Volumenstrom, Wassereintritts - sowie Wasseraustrittstemperatur gemessen wurden. Innerhalb eines Teilversuches wurde die Wassereingangstemperatur, sowie der Volumenstrom möglichst konstant gehalten.

Nun folgten die Messungen der simulierten sommerlichen-Luftströmung im Kühlturm mit dem im Gegenstrom fahrenden warmen Kühlwasser. Es wurde die relative Luftfeuchte nach dem Gebläse und die Temperatur nach dem Heizlüfter der eintretenden Luft gemessen. Beim Austritt aus dem Kühlturm wurde die Luft ebenfalls einer Messung auf relativer Luftfeuchte und Temperatur unterzogen.

Um nun unterschiedliche Betriebsparameter zu überprüfen, wurde die eintretende Luft mittels Heizlüfter bei Temperaturen  $-5\text{ K}$ ,  $\pm 0\text{ K}$  und  $+5\text{ K}$  der Wassereintrittstemperatur eingestellt. Für eine Wassereintrittstemperatur von  $35\text{ °C}$  hätten Lufteingangstemperaturen von  $30\text{ °C}$ ,  $35\text{ °C}$  und  $40\text{ °C}$  eingestellt werden müssen.

Die Messwerte für Temperatur und relative Feuchte an den verschiedenen Messstellen erfolgten, nach dem schätzungsweise konstante Temperatur über einem Zeitraum von ca. 1 min an einem externen Computer zu beobachten waren. Es wurde davon ausgegangen, dass ab diesem Punkt das System stationär fuhr.

Für den gesamten Versuch wurde diese Prozedur für Wassereintrittstemperaturen von rund  $29\text{ °C}$ ,  $38\text{ °C}$  und  $43\text{ °C}$  durchgeführt.

## 4 Ergebnisse

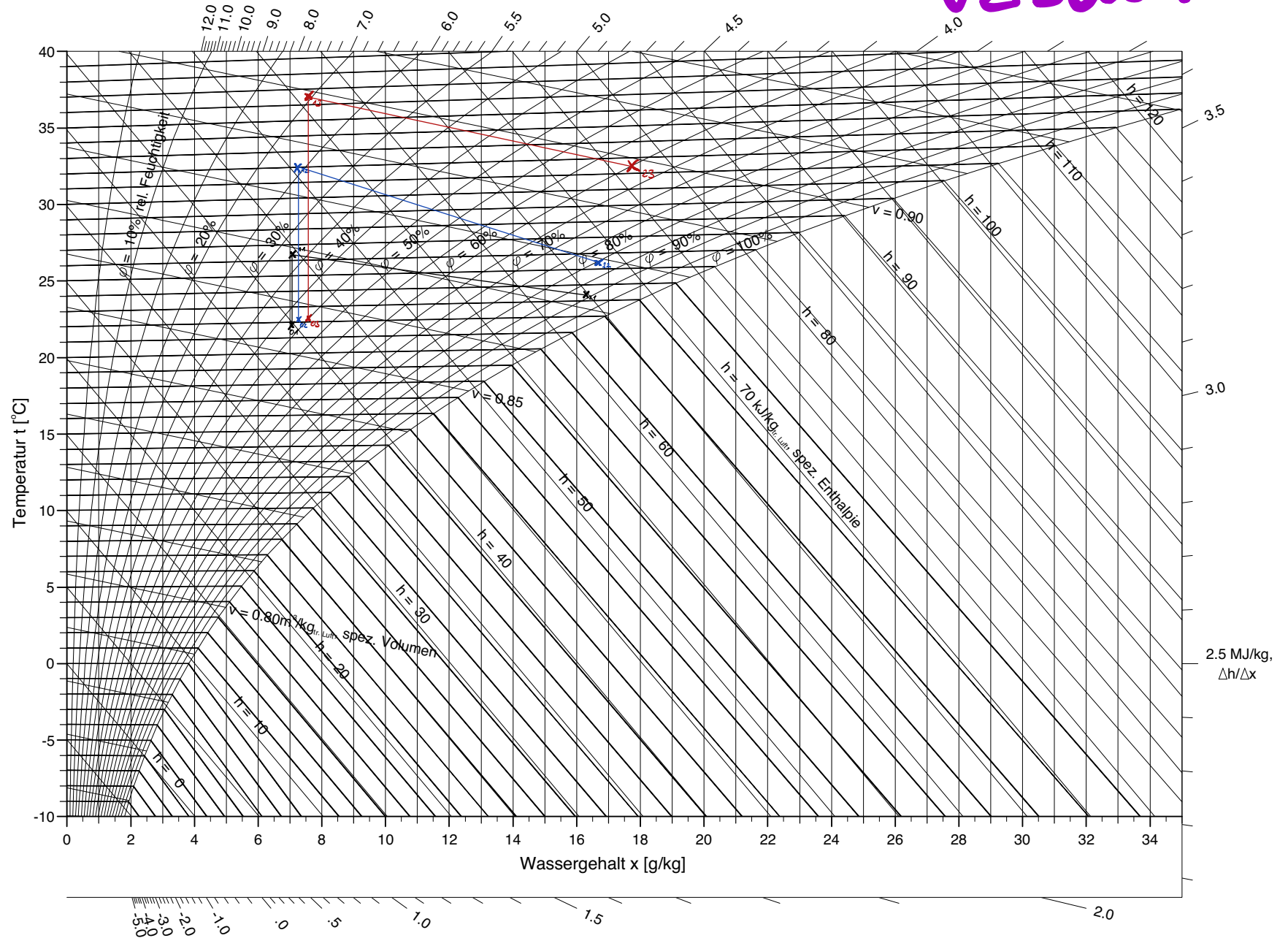
Nachfolgend sind die aufgenommenen Messwerte für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit zur Veranschaulichung in h-x-Diagrammen eingetragen.

Werte, die aus dem Diagramm abzulesen sind, wie Enthalpie oder absoluter Wassergehalt wurden jedoch mittels frei verfügbaren Excel-Sheet des INSTITUTES FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK GEMEINNÜTZIGE GESELLSCHAFT MBH mit dem Namen „Prozessdarstellung im hx-Diagramm“ berechnet [1]. Diese berechneten Daten decken sich mit den abzulesenden Werten und ermöglichen auch eine Bestimmung von Enthalpie und absoluter Luftfeuchte, welche außerhalb des gegebenen Diagrammbereiches liegen.

29°C

Versuch 1

-5k  
±0k  
+5k



## Versuch 2

[illegible]



## Versuch 3

## Beispielrechnung eines Datensatzes

Im folgenden Abschnitt wird eine Berechnung des Volumenstroms für eine Datenreihe mit Hilfe der Theorie aus Abschnitt 2 durchgeführt.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_V &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, V} - T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, V}) \\&= \dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}, 15^\circ\text{C}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha, \text{H}_2\text{O}, V} - T_{\omega, \text{H}_2\text{O}, V}) \\&= 0,105 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot (302,7^\circ\text{C} - 301,8^\circ\text{C}) \text{K} \\&= 394,7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 0,1096 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\&= \underline{109,6 \text{ W}}\end{aligned}\tag{10}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{Nutz}} &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{ges}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, V}) \\ \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, \text{ges}} &= 304,4 \text{ K} - 293,7 \text{ K} = 10,7 \text{ K} \\ \Delta T_{\text{H}_2\text{O}, V} &= 302,7 \text{ K} - 301,8 \text{ K} = 0,9 \text{ K} \\ \dot{Q}_{\text{Nutz}} &= 0,105 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \cdot (10,7 - 0,9) \text{ K} \\&= 4297,3 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 1,1937 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\&= \underline{1193,7 \text{ W}}\end{aligned}\tag{11}$$

Tab. 1: Versuchsreihe 1

Leitungsverluste																
Temperatur Eingang	°C															995,9
Temperatur Ausgang	°C	29,2														105,3
Temperatur Differenz	°C	28,3														0,029
Volumenstrom (für 15°C)	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$	0,9														109,6
Dichte (für 15°C)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	105,0														
		999,1														
-5 K, 0 K, +5 K																

Leitungsverluste																
Temperatur Eingang	°C	37,8											Dichte für T Ein Volumenstrom Massstrom Wärmeverlust Leitung	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\frac{\text{l}}{\text{h}}$ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ W	995,9 105,3 0,029 134,0	
Temperatur Ausgang	°C	36,7														
Temperatur Differenz	°C	1,1														
Volumenstrom (für 15°C)	$\frac{\text{l}}{\text{h}}$	105,0														
Dichte (für 15°C)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	999,1														
<i>-5 K, 0 K, +5 K</i>																
		Lufteingang			Mischluft			Luftausgang			Wassereingang			Wasserausgang		
Temperatur	°C	22,5	22,4	22,6	34,0	38,4	43,6	27,5	28,8	29,9	37,8	37,5	36,8	22,9	23,3	24,1
relative Luftfeuchte	%	41,3	42,5	42,5	21,1	17,0	13,1	86,0	82,9	78,8	-	-	-	-	-	-
absolute Luftfeuchte	$\frac{\text{g}}{\text{kg}}$	7,0	7,2	7,2	7,0	7,2	7,2	20,1	20,8	21,1	-	-	-	-	-	-
Enthalpie	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	40,4	40,9	41,2	52,2	57,2	62,7	79,0	82,2	84,3	-	-	-	-	-	-
Temperaturdifferenz Wasser	K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,9	14,2	8,4	14,9	14,2	8,4
Wärmekapazität	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Wärmeabgabe Wasser	W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1815,0	1729,7	1023,2	1815,0	1729,7	1023,2
Nutzwärme Wasser	W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1681,0	1595,7	889,2	1681,0	1595,7	889,2
Sättigungsdampfdruck universelle Gaskonstante	Pa	-	-	-	5309,4	6760,4	6197,2	3471,2	3948,3	3441,6	-	-	-	-	-	-
Dichte	$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	-	-	-	288,3	288,3	288,4	290,5	290,6	290,1	-	-	-	-	-	-
Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-	-	-	1,14	1,13	1,13	1,16	1,15	1,17				995,9		
Volumenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06	0,04				0,029		
	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	-	-	-	197	204	131	195	199	127				105,3		

Tab. 3: Versuchsreihe 3

Leitungsverluste													
Temperatur Eingang	°C	42,6										Dichte für T Ein	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Temperatur Ausgang	°C	40,6										Volumenstrom	$\frac{\text{L}}{\text{h}}$
Temperatur Differenz	°C	2,0										Massestrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Volumenstrom (für 15°C)	$\frac{\text{L}}{\text{h}}$	105,0										Wärmeverlust Leitung	W
Dichte (für 15°C)	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	999,1											
-5 K, 0 K, +5 K													
		Lufteingang			Mischluft			Luftausgang			Wassereingang		
Temperatur	°C	22,3	22,4	22,8	38,8	44,0	48,9	30,1	31,6	32,4	34,1	42,0	41,9
relative Luftfeuchte	%	42,8	42,9	42,7	17,3	12,8	10,1	87,5	83,8	80,0	-	-	-
absolute Luftfeuchte	$\frac{\text{g}}{\text{kg}}$	7,4	7,2	7,3	7,4	7,2	7,3	23,8	24,8	24,8	-	-	-
Enthalpie	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	42,0	41,1	41,7	58,3	63,1	68,4	91,3	95,4	96,2	-	-	-
Temperaturdifferenz Wasser	K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,4	16,8	14,3
Wärmekapazität	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,18	4,18	4,18
Wärmeabgabe Wasser	W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2241,3	2046,4	1741,9
Nutzwärme Wasser	W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1997,7	1802,8	1498,3
Sättigungsdampfdruck	Pa	-	-	-	6907,9	9096,3	11683,9	4260,5	4630,8	4842,6	-	-	-
universelle Gaskonstante	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	-	-	-	288,3	288,7	288,3	291,1	291,2	291,3	-	-	-
Dichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-	-	-	1,13	1,11	1,09	1,15	1,14	1,14			995,9
Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05			0,029
Volumenstrom	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	-	-	-	193	182	178	190	176	170			105,3

## **5 Diskussion der Ergebnisse**

## **6 Fehlerbetrachtung**

# Literatur

- [1] FALKO ZILLER: *Mollier  $h$ - $x$ -Diagramm*. [https://www.ilkdresden.de/fileadmin/user\\_upload/Artikel/2008/hx/ILK\\_hx-Diagramm\\_01.xls](https://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/Artikel/2008/hx/ILK_hx-Diagramm_01.xls). Version: 2020, Abruf: 2020-11-19