

## Protokoll Prozesstechnik

### Verdunstungskühlung am Kühlturm

#### Teilnehmer:

Maximilian Köhler Roman-Luca Zank

Protokollführer: Roman-Luca Zank

Datum der Versuchsdurchführung: 27.10.2020

**Abgabe:** 18.11.2020

## 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  $c_{P_{\rm H_2O}}$ , der Temperaturdifferenz des Wassers zwischen Eintritt  $T_{\alpha,{\rm H_2O},V}$  und Austritt  $T_{\omega,{\rm H_2O},V}$  des Bilanzraumes, sowie dem Massenstrom des Wassers.

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\alpha,\text{H}_2\text{O},V} - T_{\omega,\text{H}_2\text{O},V}) \tag{1}$$

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

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_{V} 
\dot{Q}_{Nutz} = \dot{Q}_{ges} - \dot{Q}_{V} 
= \dot{m}_{H_{2}O} \cdot c_{P_{H_{2}O}} \cdot (T_{\alpha,H_{2}O,1} - T_{\omega,H_{2}O,1}) - \dot{m} \cdot c_{P_{H_{2}O}} \cdot (T_{\alpha,H_{2}O,V} - T_{\omega,H_{2}O,V}) 
= \dot{m}_{H_{2}O} \cdot c_{P_{H_{2}O}} \cdot (T_{\alpha,H_{2}O,ges} - T_{\omega,H_{2}O,ges} - T_{\alpha,H_{2}O,V} + T_{\omega,H_{2}O,V})$$
(2)

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.

$$\dot{Q}_{L} = \dot{Q}_{\text{Nutz}} \dot{m}_{L} \cdot (h_{L2} - h_{L1}) = \dot{m}_{\text{H}_{2}\text{O}} \cdot (T_{\omega,\text{H}_{2}\text{O}} - T_{\alpha,\text{H}_{2}\text{O}})$$
(3)

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

$$\dot{m}_{L} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nutz}}}{(h_{L2} - h_{L1})}$$

$$= \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\omega,\text{H}_2\text{O}} - T_{\alpha,\text{H}_2\text{O}})}{(h_{L2} - h_{L1})}$$
(4)

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.

Mangusformel

$$E = 6.112 \cdot 10^2 \,\text{Pa} \cdot \exp^{\frac{17.62 \cdot T_L}{243.12 + T_L}} \tag{5}$$

T in °C

Gaskonstante

$$R_f = \frac{R_t}{1 - \varphi \cdot \frac{E}{p} \cdot \left(1 - \frac{R_t}{R_d}\right)} \tag{6}$$

p, Rt und Rd erklären Luftdichte

$$\rho_L = \frac{p}{R_f \cdot T_L} \tag{7}$$

T in K

https://rechneronline.de/barometer/saettigungsdampfdruck.php htt-ps://rechneronline.de/barometer/luftdichte.php

# 3 Versuchsdurchführung

# 4 Ergebnisse

Tab. 1: Versuchsreihe 1

							Leit	Leitungsverluste	luste							
Temperatur Eingang	O.		29,2											Dichte für T Ein	$\frac{kg}{m^3}$	995,9
Temperatur Ausgang	ွ		28,3											Volumenstrom	미묘	105,3
Temperatur Differenz	သ		6,0											Massestrom	kg s	0,029
Volumenstrom (für 15°C)	미교		105,0											Wärmeverlust Leitung	M	109,6
Dichte (für 15°C)	$\frac{kg}{m^3}$		999,1													
									<i>9</i> -	-5 K, 0 K, +5 K	+5 K					
		Lu	Lufteingang	1g	<b>V</b>	Mischluft		Lı	Luftausgang	18	Wa	Wassereingang	ng	Wasserausgang	gang	
Temperatur	သ့	21,9	22,1	22,3	26,3	32,0	36,80	23,62	25,18	26,44	30,9	30,0	30,8	20,2	21,3	22,4
relative Luftfeuchte	%	44	44,1	44,8	33,8	24,6	19,40	88,2	82,2	81,1	1	1	ı	1	1	1
absolute Luftfeuchte	m ਨੂੰ	7,2	7,3	7,5	7,2	7,3	7,50	16,2	16,6	26,44	1	1	1	1	1	1
Enthalpie	沼%	40,4	40,7	41,5	44,9	50,9	56,4	65,1	2,29	71,7	1	ı	ı	ı	ı	1
Temperaturdifferenz Wasser	X	ı	ı	,	1	1	1	1	1	ı	14,9	9,3	8,4	10,7	9,3	8,4
Wärmekapazität	kJ kg·K	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Wärmeabgabe Wasser	$\otimes$	1	1	,	1	1	ı	1	1	1	1303,4	1132,8	1023,2	1303,4	1132,8	1023,2
Nutzwärme Wasser	M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1193,7	1023,2	913,6	1193,7	1023,2	913,6
Sättigungsdampfdruck	Pa	1	ı		3413,3	4745,0	6197,2	2909,4	3194,1	3441,6	-	-	-	ı	-	1
universelle Gaskonstante	J kg·K	1	1	1	288,3	288,3	288,4	289,8	289,9	290,1	ı	ı	ı	ı	ı	1
Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	1	-	-	1,17	1,15	1,13	1,18	1,17	1,17				995,9		
Massenstrom	kg s					0,06								0,029		
Volumenstrom	$\frac{m^3}{p}$	-	1		181	190	190	181	187	184				105,3		

Tab. 2: Versuchsreihe 2

							Leitı	Leitungsverluste	luste							
Temperatur Eingang	ွ		8,22											Dichte für T Ein	kg m <sup>3</sup>	995,9
Temperatur Ausgang	ွ		36,7											Volumenstrom	니ㅁ	105,3
Temperatur Differenz	ပ္		1,1											Massestrom	s s	0,029
Volumenstrom (für 15°C)	기년		105,0											Wärmeverlust Leitung	M	134,0
Dichte (für 15°C)	m <sup>3</sup> g		999,1													
									-5	-5 K, 0 K, +5 K	+5 K					
		Luf	Lufteingang	ρύ	N	Mischluft		Lu	Luftausgang	ēΰ	Wa	Wassereingang	ng	Wasserausgang	ang	
Temperatur	သ့	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	1	1	1	ı	1	1
absolute Luftfeuchte	20 \frac{7}{2}	0,2	7,2	7,2	7,0	7,2	7,2	20,1	20,8	21,1	1	1	1	ı	1	1
Enthalpie	沼%	40,4	40,9	41,2	52,2	57,2	62,7	0,62	82,2	84,3	ı	ı	1	ı	1	ı
Temperaturdifferenz Wasser	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14,9	14,2	8,4	14,9	14,2	8,4
Wärmekapazität	kg · K	1	ı	,	1	1	1	1	1	1	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Wärmeabgabe Wasser	$\otimes$	1	ı	1	1	1	1	1	ı	1	1815,0	1729,7	1023,2	1815,0	1729,7	1023,2
Nutzwärme Wasser	M	1		-	1	-	1	1	1	1	1681,0	1595,7	889,2	1681,0	1595,7	889,2
Sättigungsdampfdruck	Pa	-	-	1	$5309,4$   $\epsilon$	6760,4	6197,2	3471,2	3948,3	3441,6	1	1	1	ı	1	1
universelle Gaskonstante	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}$	ı	1	1	288,3	288,3	288,4	290,5	290,6	290,1	1	1	1	1	1	ı
Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	1	ı	1	1,14	1,13	1,13	1,16	1,15	1,17				995,9		
Massenstrom	kg s	90,0	0,00	0,04	90,0	0,06	0,04	0,06	0,06	0,04				0,029		
Volumenstrom	$\frac{m^3}{h}$				197	204	131	195	199	127	ì	·	·	105,3		

Tab. 3: Versuchsreihe 3

							Leitu	Leitungsverluste	luste							
Temperatur Eingang	ွ		42,6											Dichte für T Ein	$\frac{kg}{m^3}$	995,9
Temperatur Ausgang	ပ္		40,6											Volumenstrom	미묘	105,3
Temperatur Differenz	ွ		2,0											Massestrom	kg s	0,029
Volumenstrom (für 15°C)	미므		105,0											Wärmeverlust Leitung	M	243,6
Dichte (für 15°C)	m <sup>3</sup>		999,1													
									-5	-5 K, 0 K, +5 K	+5 K					
		Lu	Lufteingang	lg.		Mischluft		L L	Luftausgang	18	Wa	Wassereingang	ng	Wasserausgang	gang	
Temperatur	သ့	22,3	22,4	8,22	38,8	44,0	48,9	30,1	31,6	32,4	34,1	42,0	41,9	24,7	25,2	27,6
relative Luftfeuchte	%	42,8	42,9	42,7	17,3	12,8	10,1	87,5	83,8	80,0	1	ı	ı		ı	ı
absolute Luftfeuchte	삐졌	7,4	7,2	7,3	7,4	7,2	7,3	23,8	24,8	24,8	1	1	ı	1	1	1
Enthalpie	괴찌	42,0	41,1	41,7	58,3	63,1	68,4	91,3	95,4	96,2	1	ı	ı	1	ı	1
Temperaturdifferenz Wasser	K	1	,	ı	1	1	1	1	1	1	18,4	8,91	14,3	18,4	16,8	14,3
Wärmekapazität	kJ kg·K	1	,	ı	1	1	1	1	1	1	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18
Wärmeabgabe Wasser	$\otimes$	1	,	ı	1	1	1	ı	ı	ı	2241,3	2046,4	1741,9	2241,3	2046,4	1741,9
Nutzwärme Wasser	M	ı	,	ı	1	1	1	1	1	1	1997,7	1802,8	1498,3	1997,7	1802,8	1498,3
Sättigungsdampfdruck	Pa	-	-	,	6,2069	9006,3	11683,9	4260,5	4630,8	4842,6	1	-	-	1	-	-
universelle Gaskonstante	kg·K	ı	1	'	288,3	288,7	288,3	291,1	291,2	291,3	ı	ı	ı	1	ı	ı
Dichte	kg m <sup>3</sup>	1	,	1	1,13	1,11	1,09	1,15	1,14	1,14				995,9		
Massenstrom	kg s	90,0	0,06	0,05	90,0	90,0	0,05	90,0	90,0	0,05				0,029		
Volumenstrom	m <sup>3</sup>	-	-	,	193	182	178	190	176	170				105,3		
					-					-						

- 5 Diskussion der Ergebnisse
- 6 Fehlerbetrachtung

#### Literatur

- [1] Berger, Andrea; Hartmann-Schreier, Jenny: Eugenol. Thieme Gruppe, 2017 https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-05-02145
- [2] Krammer, Gerhard: *Nelkenöle*. Thieme Gruppe, 2003 https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-14-00705
- [3] RÖMPP-REDAKTION: Caryophyllene. Thieme Gruppe, 2002 https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-03-00612
- [4] WIKIPEDIA (Hrsg.): Nelkenöl. Version: 2020. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nelkenöl&oldid=200175144, Abruf: 10.11.2020