



# 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>                         | 19.11.2020      |

Merseburg den 19.11.2020

# 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.

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

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

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.

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

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

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

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

### 3.1 Versuchsaufbau

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.

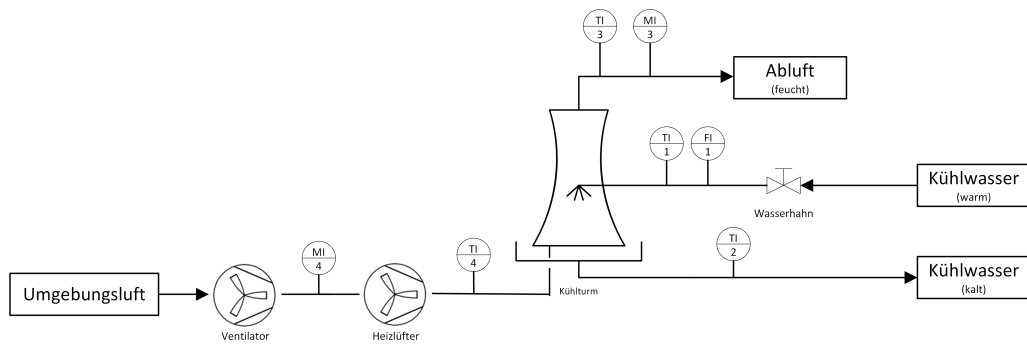


Abb. 1: Kennline von Ventilen

## 4 Ergebnisse

Tab. 1: Versuchsreihe 1

| Leitungsverluste           |  |              |      |      |           |        |        |             |        |        |               |                      |                                |
|----------------------------|--|--------------|------|------|-----------|--------|--------|-------------|--------|--------|---------------|----------------------|--------------------------------|
| Temperatur Eingang         | °C   | 29,2         |      |      |           |        |        |             |        |        |               | Dichte für T Ein     | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Temperatur Ausgang         | °C   | 28,3         |      |      |           |        |        |             |        |        |               | Volumenstrom         | $\frac{\text{L}}{\text{h}}$    |
| Temperatur Differenz       | °C   | 0,9          |      |      |           |        |        |             |        |        |               | 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        |      |      |           |        |        |             |        |        |               |                      | 109,6                          |
| -5 K, 0 K, +5 K            |  |              |      |      |           |        |        |             |        |        |               |                      |                                |
|                            |  | Luftfeingang |      |      | Mischluft |        |        | Luftausgang |        |        | Wassereingang |                      |                                |
| Temperatur                 | °C   | 21,9         | 22,1 | 22,3 | 26,3      | 32,0   | 36,80  | 23,62       | 25,18  | 26,44  | 30,9          | 30,6                 | 30,8                           |
| relative Luftfeuchte       | %  | 44           | 44,1 | 44,8 | 33,8      | 24,6   | 19,40  | 88,2        | 82,2   | 81,1   | -             | -                    | -                              |
| absolute Luftfeuchte       | $\frac{\text{g}}{\text{kg}}$                 | 7,2          | 7,3  | 7,5  | 7,2       | 7,3    | 7,50   | 16,2        | 16,6   | 26,44  | -             | -                    | -                              |
| Enthalpie                  | $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$                | 40,4         | 40,7 | 41,5 | 44,9      | 50,9   | 56,4   | 65,1        | 67,7   | 71,7   | -             | -                    | -                              |
| Temperaturdifferenz Wasser | K  | -            | -    | -    | -         | -      | -      | -           | -      | -      | 14,9          | 9,3                  | 8,4                            |
| Wärmekapazität             | $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ | -            | -    | -    | -         | -      | -      | -           | -      | -      | 4,18          | 4,18                 | 4,18                           |
| Wärmeabgabe Wasser         | W  | -            | -    | -    | -         | -      | -      | -           | -      | -      | 1303,4        | 1132,8               | 1023,2                         |
| Nutzwärme Wasser           | W  | -            | -    | -    | -         | -      | -      | -           | -      | -      | 1193,7        | 1023,2               | 913,6                          |
| Sättigungsdampfdruck       | Pa   | -            | -    | -    | 3413,3    | 4745,0 | 6197,2 | 2909,4      | 3194,1 | 3441,6 | -             | -                    | -                              |
| universelle Gaskonstante   | $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  | -            | -    | -    | 288,3     | 288,3  | 288,4  | 289,8       | 289,9  | 290,1  | -             | -                    | -                              |
| Dichte                     | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$               | -            | -    | -    | 1,17      | 1,15   | 1,13   | 1,18        | 1,17   | 1,17   | -             | -                    | -                              |
| Massenstrom                | $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$                 | 0,06         |      |      |           |        |        |             |        |        |               |                      |                                |
| Volumenstrom               | $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$                | -            | -    | -    | 181       | 190    | 190    | 181         | 187    | 184    | -             | -                    | -                              |

[illegible]

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