

Gemeinsames Praktikum des Fachbereichs Bio- und Chemieingenieurwesen

Der Versuch gehört zum Praktikumsbereich: **Thermodynamik**

Prozessthermodynamik

Bestimmung des Betriebsverhaltens eines Kühlturms

Versuchsinhalt: Vermessung und Bilanzierung eines Kühlturms

Allgemeine Hinweise:

Während der Versuche müssen mindestens zwei Personen und ein Laborpersonal im Labor sein.

Bitte auf Anweisungen des Laborpersonals achten!

Es dürfen keine Lebensmittel mit in das Labor genommen werden.

Schwangere Studentinnen dürfen an dem Versuch nicht teilnehmen.

Bereits vor Beginn der Versuche ist das Sicherheitsdatenblatt bzw. die Betriebsanweisung zu lesen.

Schutzbrille benutzen!

Nach den Versuchen sind die Geräte, Werkzeuge und sonstige Utensilien sorgfältig zu reinigen.

Ziele des Praktikums:

Vertiefung der Vorlesungsinhalte

Darstellung und Auswertung von Versuchsergebnissen

Darstellung: Alle Ergebnisse sind in Form von Tabellen und Diagrammen übersichtlich darzustellen.

Messung des Luftvolumenstroms, der Temperaturen von Luft und Wasser sowie der Luftfeuchtigkeit - Zustandsänderungen der Luft im h,x-Diagramm - Bestimmung der Kühlleistung - Berechnung von Prozessparametern

1. Motivation und Ziel

In diesem Praktikumsversuch soll die Materie der feuchten Luft, welche in der Grundlagenvorlesung Thermodynamik 1 behandelt wird, erneut aufgegriffen werden und durch eine technische Anwendung vertieft werden. Die wichtigsten Begriffe und Definitionen sowie Bilanzen werden hier in einen praktischen und aus der Energiebranche kommenden technischen Bezug gestellt und dadurch gefestigt.

2. Grundlagen

2.1. Kühltürme

Kühlwasser dient in einem Kraftwerk zur Abfuhr der Verlustwärme, welche bei der Kondensation des Turbinendampfes im Kondensator, bei der Stromerzeugung im Generator und durch Reibung in den Lagern entsteht. Bei großen Kondensationskraftwerken mit Zwischenüberhitzung wird ca. die Hälfte der insgesamt aufgewandten Wärmemenge durch das durch den Kondensator strömende Kühlwasser abgegeben. Ein Anteil von ca. 10% der Brennstoffwärme geht mit dem Abgas verloren. Kraftwerkskühlsysteme bestehen grundsätzlich aus den folgenden 3 Komponenten:

- Wärmequelle (Kondensator, Lager, ...)
- Kühlwassersystem (Armaturen, Pumpen, Leitungen, ...)
- Wärmesenke (Fluss, stehende Gewässer, Kühltürme, ...).

Die **Wärmesenken** gliedern sich wie folgt:

- Frischwasserkühlung
- Rückkühlung
 - Nasskühlturm
 - Trockenkühlturm
 - Kühlteiche.



Abb. 1: Nasskühlturm AKW
Philippsburg (www.wikipedia.de)

Da Frischwasserkühltürme zu einer starken Erwärmung des Gewässers führen, werden aus ökologischen Gründen heute im Wesentlichen folgende drei Bauarten ausgeführt:

- Nasskühlturm
- Trockenkühlturm
- Hybridkühlturm (Kombination aus Nass- und Trockenkühlturm)

Weiter werden Kühltürme je nach Art der Luftströmung in

- Naturzugkühltürme und
- Ventilatorkühltürme (Gebläse saugend oder drückend)

unterschieden. Aufgrund ihrer Baugröße am bekanntesten und weit verbreiteten sind heute die **Nasskühltürme**.

In einem Nasskühlturm mit offenem Wasserkreislauf wird aufgrund des mit der Umgebungsluft stattfindenden **Stoff- und Wärmeaustausches** dem Kreislaufwasser Wärme entzogen. Je intensiver dieser Luft-Wasserkontakt ermöglicht wird, umso besser wird dieser Stoff-Wärmeaustausch durchgeführt. Der Kühlturm stellt somit eine besondere Form eines Wärmeübertragers dar.

Der Kühleffekt wird im Wesentlichen durch die **Verdunstung** von Wasser erzielt. Um Wasser von dem flüssigen in den dampfförmigen Zustand zu überführen, wird Energie benötigt. Diese Energie wird als **Verdampfungsenthalpie** bezeichnet und dem Wasser entzogen. Da die Umgebungsluft in der Regel ein Wasserdampf-Luft-Gemisch darstellt, ist die Luft schon zu einem gewissen Teil mit Wasser beladen. Das Vermögen der Luft, weiterhin Wasserdampf aufzunehmen, ist ein Maß für die Kühlung. So besteht folglich ein Punkt, an dem die maximale Aufnahmekapazität des Wasserdampfes in der Luft erreicht wird (Sättigung). Dieser Punkt wird bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% erreicht und definiert die Feuchtlufttemperatur.

Stellt der Verdunstungsvorgang auch den wesentlichen Bestandteil der Kühlung dar, so leistet der **konvektive Wärmeübergang** ebenfalls einen Beitrag zur Kühlwirkung. Dabei handelt es sich um einen reinen Wärmeübergang ohne jeglichen Stoffaustausch. Vergleichbar mit normalen Wärmetauschern ist dabei allein das treibende Temperaturgefälle zwischen den Austauschpartnern maßgebend. Es leuchtet somit ein, dass der konvektive Wärmeübergang im Kühlturmprozess im Winter in stärkerem Maße an der Kühlung beteiligt ist als im Sommer.

2.2. Grundlagen der feuchten Luft

Feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft und Wasser, wobei das Wasser sowohl dampfförmig, flüssig und fest (Eis) vorliegen kann. Der Gesamtdruck der feuchten Luft kann als konstant vorausgesetzt werden und ändert sich bei Zustandsänderungen nicht. Luft und Dampf werden als ideale Gase betrachtet. Bei der Betrachtung der feuchten Luft werden alle Größen auf den sich nicht ändernden Anteil der trockenen Luft bezogen. Nachfolgend werden die wichtigsten Größen der feuchten Luft kurz erörtert. Für weitergehende

Informationen wird auf die angegebene Literatur und Kapitel 8 des Skripts der Vorlesung „Thermodynamik 1“ verwiesen.

Wasserbeladung:

Da der Massenstrom bzw. die Masse an trockener Luft konstant ist, bezieht man alle Größen der feuchten Luft auf den Anteil der trockenen Luft. Die Wasserbeladung ist demzufolge der Quotient aus dem Wassermassenstrom bzw. der Wassermasse und dem Strom bzw. der Masse an trockener Luft.

$$X = \frac{m_W}{m_{L,\text{trocken}}} = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_{L,\text{trocken}}}$$

Partialdrücke:

Da feuchte Luft als ein Gemisch aus Luft und Wasserdampf betrachtet wird und beides als ideale Gase behandelt wird, gilt:

$$p_{\text{Ges}} = p_L + p_D$$

Die Gesamtmasse der feuchten Luft beträgt folglich:

$$m_{\text{Ges}} = m_L + m_D$$

mit

$$m_D = \frac{p_D \cdot V}{R_D \cdot T} \quad \text{bzw.} \quad m_L = \frac{p_L \cdot V}{R_L \cdot T}$$

relative Feuchte:

Die relative Feuchte ist das Verhältnis des tatsächlich vorhandenen Wasserdampf-Partialdrucks zum Phasengleichgewichtsdruck, auch Sättigungsdruck genannt, bei gleicher Temperatur T . Somit kann die relative Feuchte Werte zwischen Null (trockene Luft) und Eins (Gesättigte Luft mit beginnender Kondensatbildung) annehmen.

$$\varphi = \frac{p_W}{p_W^{\text{LV}}(\vartheta)}$$

Unter Verwendung der Definition der relativen Feuchte und der Partialdrücke folgt weiter

$$X = 0,62 \frac{\varphi \cdot p_W^{\text{LV}}}{p - \varphi \cdot p_W^{\text{LV}}}$$

Sättigungszustand:

Im Sättigungszustand ($\varphi = 1$) kann die trockene Luft kein Wasser mehr aufnehmen. D.h. der Partialdruck des Wassers entspricht dem Sättigungsdruck.

übersättigte Feuchte Luft:

Ist mehr Wasser vorhanden als die trockene Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann, so ist der übersättigte Zustand erreicht. Je nach Temperatur ist das ausfallende Wasser als Eisnebel ($\vartheta < 0^\circ\text{C}$) oder Nebel ($\vartheta > 0^\circ\text{C}$) mit dem Auge wahrzunehmen.

Enthalpie der Feuchten Luft:

Enthalpie der trockenen Luft: $h_L^V(\vartheta) = c_{p,L} \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$

Enthalpie der ungesättigten feuchten Luft:

$$h_{1+X}(\vartheta, X) = c_{pL}(\vartheta - \vartheta_0) + X \cdot [r_0 + c_{pW}(\vartheta - \vartheta_0)]$$

Enthalpie der gesättigten feuchten Luft:

$$h_{1+X}(\vartheta, X) = c_{pL}(\vartheta - \vartheta_0) + X^{LV} \cdot [r_0 + c_{pW}(\vartheta - \vartheta_0)] + (X - X^{LV}) \cdot c_{wW}(\vartheta - \vartheta_0)$$

Kühlgrenze - Kühlgrenztemperatur:

Die Kühlgrenztemperatur T_{KG} ist eine charakteristische Größe der strömenden feuchten Luft. Sie ist die niedrigste Temperatur, die bei einem vorgegebenen Zustand der zuströmenden Luft durch die sogenannte „Verdunstungskühlung“ erreicht werden kann. Rechnerisch ist diese Temperatur allerdings nur iterativ zu ermitteln, allerdings kann sie jedoch leicht im h_{1+X}, X -Diagramm bestimmt werden, indem man diejenige Nebelisotheorie, die - bei geradliniger Verlängerung ins ungesättigte Zustandsgebiet - durch den Zustandspunkt der zuströmenden feuchten Luft verläuft. Die Temperatur dieser Nebelisotheorien ist die gesuchte Kühlgrenztemperatur.

Abkühlungsgrad:

Der Abkühlungsgrad ist das Verhältnis von der sogenannten Kühlzonenbreite, d.h. der Temperaturdifferenz des Wassers zwischen Ein- und Austritt, und der Differenz von Wassertemperatur am Eintritt des Kühlturms und der Kühlgrenztemperatur.

$$\eta = \frac{T_{W,ein} - T_{W,aus}}{T_{W,ein} - T_{KG}}$$

Mollier-Diagramm:

Das Mollier- oder h_{1+X}, X -Diagramm dient zur graphischen Darstellung von Prozessen der feuchten Luft. Es können Erwärmung und Abkühlung, Trocknungen und Befeuchtungen, sowie Mischungen zweier Luftströme eingezeichnet und fehlende Zustandsgrößen graphisch ermittelt werden.

2.3. Volumenstromberechnung

Im Folgenden wird die im Rahmen der Auswertung benötigte Berechnung der zu ermittelnden Luftvolumenströme auf Basis des einzustellenden Druckverlusts $\Delta p = p_1 - p_2$ erläutert. Der Index 1 bezieht sich hierbei im Folgenden auf den Kanal- und der Index 2 auf den Blendenquerschnitt (sind den Apparateabmessungen zu entnehmen). Nach der Kontinuitätsgleichung gilt für den Volumenstrom die Beziehung

$$\dot{V}_L = w_1 A_1 = w_2 A_2.$$

Da die Geschwindigkeiten nicht bekannt sind, wird w_2 unter Zunahme der Bernoulli-Gleichung angenähert. Es gilt

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2.$$

Durch Kombination beider Gleichungen ergibt sich damit die Beziehung

$$w_2 = \sqrt{\frac{2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}.$$

Die Gleichung für den Luftdurchsatz lässt sich demnach umformen zu

$$\dot{V}_L = w_2 A_2 = \sqrt{\frac{2A_2^2}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = c \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}.$$

Hierbei ist c eine Konstante, da die Strömungsquerschnitte konstant bleiben. Diese Beziehung muss zur Kompensation der auftretenden Strömungseinschnürung jedoch noch um zwei Korrekturfaktoren ergänzt werden. Diese sind die Durchflusszahl α und die Expansionszahl ε . Beide Faktoren sind Funktionen des Öffnungsverhältnisses A_2/A_1 , der Reynolds-Zahl, sowie des Isentropenexponenten und werden nach DIN 1952 berechnet. Im Rahmen dieses Versuchs können α und ε den am Versuchsstand ausliegenden Tabellen entnommen werden. Für den tatsächlichen Volumenstrom ergibt sich somit letztendlich

$$\dot{V}_L = \alpha \cdot \varepsilon \cdot c \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}.$$

3. Versuchsaapparatur

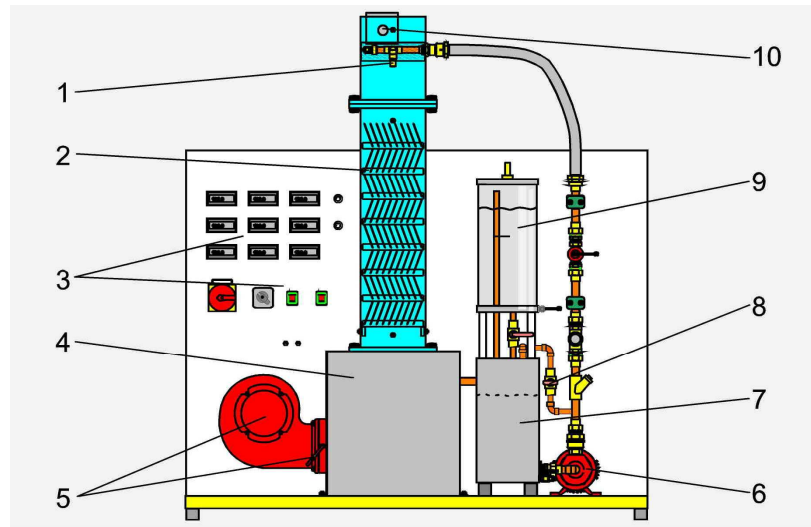


Abb. 2: Versuchsaufbau Kühlturm

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Einspritzdüse | 7. Behälter mit Heizung |
| 2. Kolonne | Regulierventil |
| 3. Anzeigen- und Bedienfeld | 8. Bypass mit Kugelhahn |
| 4. Luftkammer | 9. Vorratsbehälter |
| 5. Gebläse mit Drosselklappe | 10. kombinierter Temperatur-
/Feuchteaufnehmer |
| 6. Pumpe | |

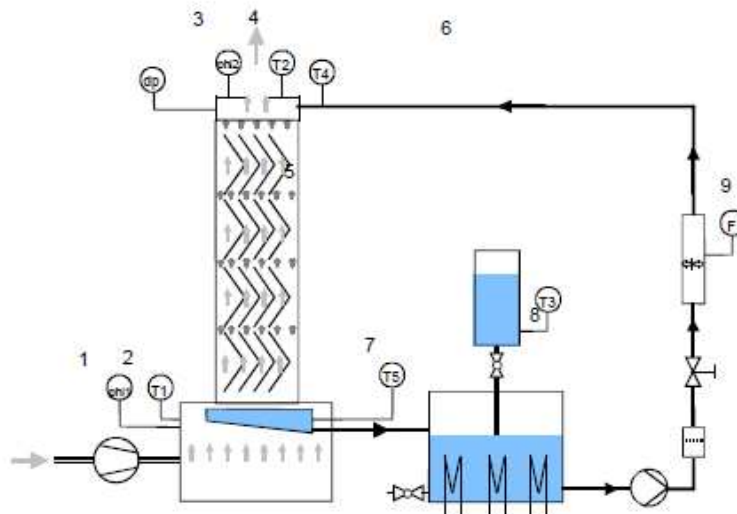


Abb. 3: Anlagenschema

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Feuchtesensor Lufteintritt | 6. Temperatursensor Wassereintritt |
| 2. Temperatursensor Lufteintritt | 7. Temperatursensor Wasseraustritt |
| 3. Feuchtesensor Luftaustritt | 8. Temperatursensor Tank |
| 4. Temperatursensor Luftaustritt | 9. Volumenstromsensor (Wasser) |
| 5. Differenzdrucksensor | |

4. Versuchsdurchführung

Die einzelnen Schritte zur Durchführung des Versuchs sind nachfolgend beschrieben:

1. Hauptschalter einschalten
2. Vorratstank prüfen, der Wasservorrat soll ständig zwischen 2 und 3 Litern betragen. Nur VE Wasser verwenden. Bleibt der Füllstand während des Versuchs lange konstant, ist dies dem Assistenten melden.
3. Der Versuchsstand darf nur bei laufender Pumpe und laufendem Gebläse betrieben werden. Den Heizer erst anschließend einschalten.
4. Die in der Tabelle aufgeführten Messpunkte anfahren. Dabei können die Drosselklappenstellung des Gebläses, der Wasservolumenstrom und die Heizstufe variiert werden. Nach Einstellen eines stationären Zustandes sind die Messdaten zu notieren.
5. Den gewünschten Wasserdurchfluss durch die beiden Ventile vor und hinter der Pumpe einstellen.
6. Als letzter Versuch soll die Kühlgrenztemperatur experimentell bestimmt werden.
7. Nach Beendigung der Versuche die Pumpe, den Heizer und das Gebläse ausschalten. Anschließend den Hauptschalter ausschalten.

Zu Beginn eines Semesters muss das Wasser komplett ausgetauscht und Verunreinigungen aufgewirbelt und entfernt werden.

Stoffdaten Kühlturm-Praktikum

1. Kinematische Viskosität von Luft: $\nu = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
2. Wärmekapazität Luft: $c_p = 1,007 \text{ kJ/kgK}$
3. Antoine-Gleichung:
$$\ln\left(\frac{p^{\text{LV}}}{p_0}\right) = 11,7 - \frac{3820 \text{ °C}}{(\vartheta + 227 \text{ °C})}$$

(p^{LV} in bar; $p_0 = 1 \text{ bar}$; ϑ in °C)
4. Ideale Gaskonstante Luft: $R_L = 287 \text{ J/kgK}$
5. Ideale Gaskonstante Wasser: $R_W = 462 \text{ J/kgK}$

5. Vorbereitung

Was man vor Beginn des Versuchs wissen sollte:

- Kraftwerksprozesse
 - Schema
 - im Diagramm
 - Bedeutung des Kondensators im Kraftwerksprozess
 - Bauformen von Kühltürmen
- Grundlagen der feuchten Luft
 - Zustandsgrößen
 - Bilanzen
 - h_{1+x}, x -Diagramm
 - Zustandänderungen im h_{1+x}, x -Diagramm
 - Bestimmung der Kühlgrenztemperatur
- Strömungsmechanik
 - Wie kann mit Hilfe der Kontinuitäts- und Bernoulligleichung die Strömungsgeschwindigkeit und der Luftvolumenstrom berechnet werden?
- Versuchsaufbau und Durchführung
 - Wie sieht der Versuchsstand aus?
 - Wie ist der Versuch durchzuführen?
 - Was ist Ziel des Versuchs?

6. Auswertung

Zur Auswertung sind die Messdaten in der beiliegenden Tabelle zu notieren und anschließend die charakteristischen Kenngrößen sowie die Leistung und der Wirkungsgrad des Kühlturms für die verschiedenen Betriebszustände zu ermitteln. Weiter sind alle Zustandspunkte in das beiliegende h_{1+x},x -Diagramm einzuzeichnen. Außerdem soll mit Hilfe der Versuche die Kühlgrenztemperatur bestimmt werden.

Zur Auswertung sollen vergleichend (Diagramme) dargestellt werden:

- Kühlleistung (Gesamt und anteilig in Verdampfung und Konvektion), Abkühlungsgrad, Wasserverlust als Funktion des Luft- und Wasservolumenstroms bei konstanter Heizerstufe (0 und 2)
- Kühlleistung (Gesamt und anteilig in Verdampfung und Konvektion), Abkühlungsgrad, Wasserverlust und relative Feuchte als Funktion des Luftvolumenstroms und der Heizerstufe bei konstantem Wasservolumenstrom

7. Literatur

- Sadowski:
Skript Thermodynamik 1
Lehrstuhl für Thermodynamik, TU Dortmund, Dortmund, 2008
- VDI Bericht:
Nasskühltürme
VDI-Berichte 298, VDI-Verl., 1977
- DIN EN ISO 5167-1
Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen
- DIN EN ISO 5167-2
Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt – Teil 2: Blenden

