

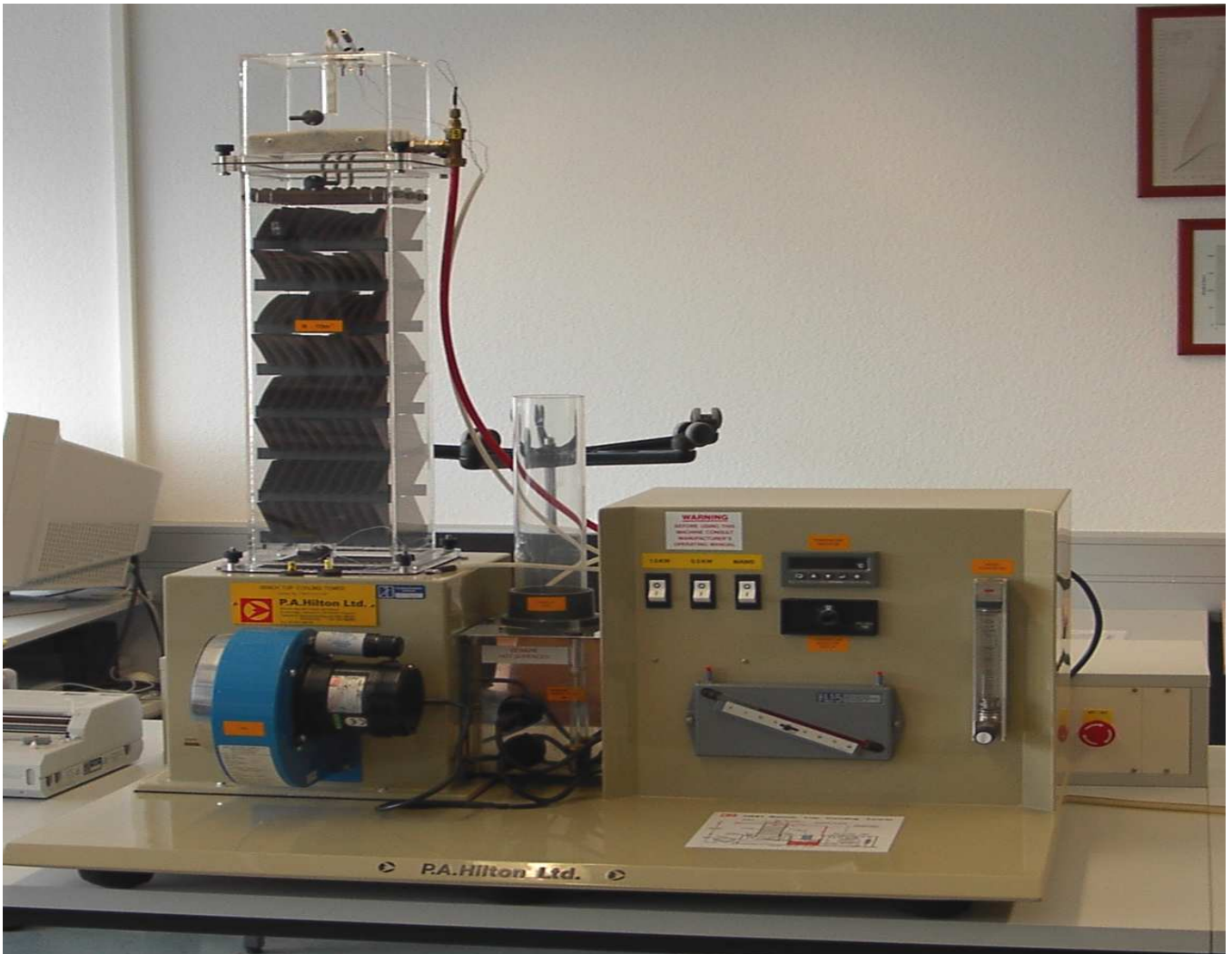


## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einführung	2
2. Beschreibung	4
2.1. Wasserkreislauf	5
2.2. Luftkreislauf	5
3. Vorsichtsmaßnahmen und Warnungen	5
4. Vorbereitungen zur Benutzung	6
5. Zusammenfassung der Experimente unter Anwendung des Tisch- Kühlturms	6
6. Beobachtung der Vorgänge innerhalb eines Druckzug-Kühlturms	7
7. Auswirkung von Kühllast auf die Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ )	8
8. Berechnung der Kühlturmleistung und des Wärmeverlustes	12
Anhang:	18
Psychrometrisches Diagramm (basiert auf barometrischem Druck von 1013,25 mbar)	
Literaturhinweise	



## 1. Einführung



Der Hilton Tisch-Kühlturm H890 wurde besonders konstruiert, um Studenten ein Verständnis des Aufbaus, der Konstruktion und der Betriebseigenschaften eines modernen Verdampfungs-Kühlsystems zu geben. Die Einheit ist auch ein ausgezeichnetes Beispiel eines „offenen Systems“, durch welches zwei Flüssigkeitsströmungen geführt werden (Wasser und Luft) und bei dem ein Massenübergang von einer zur anderen Strömung stattfindet.

Der Tisch-Kühlturm ist völlig eigenständig und enthält sowohl die simulierte Heizlast wie auch den Unterwind, weist die gleichen Eigenschaften wie reale Kühltürme auf und stabilisiert sich schnell.

Typische Energie- und Massenbilanzen lassen sich rasch simulieren. Die Studenten können schnell die Auswirkung der untenstehenden Parameter auf die Leistung eines Kühlturms untersuchen:

Luftmengenfluss, Lufttemperatur, Wassertemperatur, Kühllast und Packungsdichte.



## Symbole und Einheiten

<u>Symbol</u>	<u>Größe</u>	<u>Grundeinheit</u>
$c_p$	spezifische Wärmeaufnahmefähigkeit $\frac{dh}{dt}$	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$h$	spezifische Enthalpie	$\text{J kg}^{-1}$
$H$	Enthalpie	J
$\dot{H}$	Enthalpiesatz	W
kE	kinetische Energie	J
$m$	Masse	kg
$\dot{m}$	Massenrate	$\text{kg s}^{-1}$
M	Molekularmasse	$\text{kg (kg mol)}^{-1}$
p	Druck	$\text{N m}^{-2}$
P	Leistung	W
q	Wärmeübertragung pro Masseneinheit	$\text{J kg}^{-1}$
$\dot{Q}$	Wärmeübertragungsrate	W
R	spezifische Gaskonstante	$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$R_0$	universelle Gaskonstante	$\text{J (kg mol)}^{-1}\text{K}^{-1}$
t	Temperatur (normal)	°C
T	Temperatur (absolut)	K
v	spezifisches Volumen	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
y	Zeitabstand	s
$\chi$	Blenden-Differentialwert	mm WS
$\omega$	spezifische Feuchtigkeit	$\text{kg kg}^{-1}$
$\phi$	relative Feuchtigkeit	1
$\Delta$	integrale Änderung einer Größe	-

## Indizes

A	Luft am Einlass zur Säulenunterseite
B	Luft am Auslass von der Säulenoberseite
C	Wasser am Einlass zur Säulenoberseite
D	Wasser am Auslass von der Wanne
E	Wasser im Nachfülltank
d	Trockenthermometer
w	Feuchtigkeitsthermometer
W	Wasserdampf
L	Luft (trocken)
t	Gesamtgröße
f	gesättigte Flüssigkeit





## **2.1. Wasserkreislauf**

Warmes Wasser wird vom Lasttank durch das Regelventil und den Wasserdurchflussmesser zur Säulenhaube gepumpt. Nach Temperaturmessung wird Wasser gleichmäßig über den obersten Packungsboden verteilt. Durch Ausbreitung über die Plattenböden wird eine große, dünne Wasserschicht der von unten nach oben strömende Luftströmung ausgesetzt. Beim Herunterfließen durch die Packung wird das Wasser gekühlt, größtenteils durch Verdampfung eines kleinen Teils der gesamten Durchflussmenge.

Das gekühlte Wasser fällt vom untersten Packungsboden in die Wanne, wo seine Temperatur wiederum gemessen wird und geht dann in den Lasttank, wo es vor dem Wiederauftrieb erneut erwärmt wird.

Der Wasserpegel im Lasttank sinkt infolge der Verdampfung. Dadurch öffnet sich das schwimmerbetätigte Nadelventil, so dass das Wasser vom Nachfülltank in den Lasttank fließt. Im Gleichgewichtszustand ist die Wasserabflussgeschwindigkeit vom Nachfülltank gleich der Verdampfungsrate und eventuell kleiner im Luftabfluss schwebender Tröpfchen.

## **2.2. Luftkreislauf**

Atmosphärische Luft tritt in das Gebläse mit einer Mengenflussrate (maximaler Luftmassenfluss von  $0,06 \text{ kg s}^{-1}$ ) ein, die durch die Einstellung des Einlasszugreglers bestimmt wird. Das Gebläse befördert die Luft in die Verteilerkammer. Die Luft strömt vor Eintritt in die Packungssäule an den Feuchtigkeitssensoren vorbei. Beim Durchströmen durch die Packung erhöht sich der Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Das Wasser wird gekühlt. Beim Verlassen der Säulenhaube strömt die Luft durch einen Tropfenfänger, der den größten Teil der mitgerissenen Tröpfchen zurückhält und diese zur Packung zurückleitet. Die Luft wird dann über die Luftmessblende und weitere Feuchtigkeitssensoren in die Atmosphäre abgelassen.

Die Strömung durch die Säule lässt sich durch das transparente Gehäuse beobachten. Abmessung der Säule: 150 mm Breite x 150 mm Tiefe x 600 mm Höhe.

## **3. Vorsichtsmaßnahmen und Warnungen**

1. Wenn möglich, sollten destilliertes oder entmineralisiertes Wasser zum Füllen oder Nachfüllen dieses Geräts benutzt werden. Hierdurch sollen Probleme mit Kesselstein und hässliche, aus Unreinheiten des Wassers resultierende Flecken vermieden werden.
2. Die Temperatur des Wassers und der Luftströmung darf nicht  $50 \text{ °C}$  übersteigen.
3. Der Nachfülltank muss immer aufgefüllt werden, bevor der Wasserpegel unter 50 mm fällt.
4. Wenn das Gerät für mehr als zwei Stunden außer Betrieb ist, soll der Nachfülltank auf ungefähr 50 mm entleert werden. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass ein Leck hinter dem Schwimmerventil nicht zu einem Überlaufen vom Lasttank führt.
5. Nach ca. 20 Betriebsstunden oder falls das Gerät für mehrere Tage außer Betrieb steht, ist das System völlig zu entleeren und mit frischem Wasser nachzufüllen. Dadurch wird Algenwachstum sowie Schlammabsetzung vermieden.
6. Die Pumpe darf nicht eingeschaltet werden, solange das System nicht mit Wasser gefüllt ist.
7. Die Gefäße des Psychrometer-Feuchtkolbens sind mit destilliertem Wasser zu füllen.



8. Wenn der Wasserpegel im Lasttank unter die vom Pfeil markierte Stelle fällt, müssen die Heizkörper sofort ausgeschaltet und die Ursache untersucht werden.

#### 4. Vorbereitungen zur Benutzung

Folgende Checkliste sollte zur Vermeidung von Schäden und zur Sicherstellung eines erfolgreichen Experiments vor der Benutzung abgearbeitet werden:

##### A. Beim Einschalten

1. Sicherstellen, dass das Ablassventil geschlossen ist, dass alle Schalter ausgeschaltet sind und dass das Durchflussregelventil vollständig geöffnet ist.
2. Kontrollieren, ob das Gerät horizontal steht.
3. Die Säule entfernen, dann vorsichtig 3 Liter destilliertes Wasser durch die quadratische Öffnung in die Wanne gießen.
4. Die Säule wiederanbringen und die Rändelmuttern leicht anziehen.
5. Das Gerät einschalten. Beträgt der Wassermengenfluss weniger als 40 g/s oder ist die Umwälzpumpe sehr laut, schalten sie die Anlage wieder aus. Wahrscheinlich befindet sich Luft in der Pumpe. Um diese zu entfernen, heben sie die Linke Seite des Gerätes 30 Sekunden lang bis zu 500 mm an. Diesen Vorgang wiederholen, bis der Mengenfluss angemessen ist.
6. Den Nachfülltank bis zur Messmarkierung mit Wasser füllen.
7. Die Stopfen vom Manometer entfernen und den Fluid-Stand überprüfen. Den Blendendruckmesspunkt in der Haube mit linken Anschluss am Manometer verbinden.
8. Den Anlass-Zugregler am Gebläse vollständig öffnen und kontrollieren, ob das Manometer vorschriftsmäßig funktioniert. Der Differenzdruck sollte ungefähr 18 mm Wassersäule betragen.
9. Das Gerät einige Minuten laufen lassen, um dem Schwimmerventil das Einstellen des Pegels im Wassertank zu ermöglichen. Den Nachfülltank nach Bedarf auffüllen.
10. Die Pegel in den Feuchtigkeitsthermometer-Reservoirs überprüfen.
11. Das Gerät ist jetzt betriebsbereit und kann auf die gewünschten Zustände eingestellt werden.

##### B. Beim Abschalten

1. Den Wasserstand im Nachfüllbehälter durch normalen Betrieb auf ungefähr 50 mm reduzieren. Beim Versagen des Nadelventils kann nun das restliche Wasser aus dem Nachfüllbehälter in den Wassertank abfließen ohne dass dieser überläuft.
2. Beide Heizgeräte ausschalten.
3. Nach ca. 2 Minuten den Hauptschalter ausschalten.

#### 5. Zusammenfassung der Experimente unter Anwendung des Tisch-Kühlturms

1. Beobachtung der Vorgänge innerhalb eines Druckzug-Kühlturms.
2. Untersuchen der Auswirkung von Kühllast auf die Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ ).
3. Berechnung der Kühlturmleistung und des Wärmeverlustes.



## 6. Beobachtung der Vorgänge innerhalb eines Druckzug-Kühlturms

Der Tisch-Kühlturm ist zum Betrieb mit mäßiger Luft- und Wasserströmung und mit einer Kühllast von entweder 1,0 oder 1,5 kW einzustellen.

Nach Erreichen des Ruhezustands lässt sich folgendes beobachten:

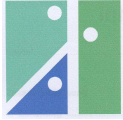
### Wassersystem

- (1) Warmwasser tritt oben in den Turm ein und wird in Rinnen gefördert, von welchen es über Kerben auf die Packungen fließt. Die Rinnen sind derart konstruiert, dass das Wasser bei geringsten Spritzern gleichmäßig über die Packungen verteilt wird.
- (2) Die Packungen weisen eine leicht benetzbare Oberfläche auf, und das Wasser breitet sich über diese aus, um der Luftströmung eine große Fläche zu bieten.
- (3) Das gekühlte Wasser fällt von der untersten Packung in die Wanne und wird über einer elektrisch beheizten Wärmeüberträger (Heizlast) gepumpt.
- (4) Aufgrund der Verdampfung vom Wasser muss Nachfüllwasser vorgesehen werden, um die Wassermenge im Kühlsystem aufrechtzuerhalten. Der sinkende Pegel im Lasttank kann beobachtet werden.
- (5) Wassertröpfchen (z.B. durch Spritzer verursacht) können von der Luftströmung mitgerissen und daher aus dem System verloren gehen. Dieser Verlust trägt nichts zum Kühlen bei, muss jedoch durch Nachfüllen wiedergutmacht werden. Um diesen Verlust gering zu halten, ist ein Tröpfchenfänger am Turmauslass angebracht. Dieses Bauteil bewirkt Zusammenfließen der Tröpfchen, welche dann Tropfen bilden, die zu groß sind, um mitgerissen zu werden und daher wieder in die Packungen zurückfallen.

### Luftsystem

- (6) Durch die Gebläsewirkung wird Luft nach oben durch die benetzten Packungen getrieben. Dabei zeigt sich, dass die Änderung der Trockenthermometer-Temperatur geringer als die Änderung der Feuchtigkeitsthermometer-Temperatur ausfällt ( $t_3 - t_1 < t_4 - t_2$ ) und dass der Unterschied zwischen Trocken- und Feuchtigkeitsthermometer-Temperaturen am Luftauslass nur gering ist ( $t_3 - t_4 < t_1 - t_2$ ). Dieses deutet darauf hin, dass die geförderte Luft beinahe gesättigt ist, d.h. die relative Feuchtigkeit bei 100% liegt. Diese Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts der Luft beruht auf der Umwandlung von Wasser zu Wasserdampf. Die entsprechende „aufzuwendende Wärme“ ist für den größten Teil der Kühlwirkung verantwortlich.
- (7) Wird die Kühllast jetzt abgeschaltet und der Gleichgewichtszustand des Geräts abgewartet, erweist sich, dass die Temperatur des aus der Wanne abfließenden Wassers nahe der Feuchtigkeitsthermometer-Temperatur der einfließenden Luft liegt. Entsprechend den örtlichen atmosphärischen Zuständen kann diese mehrere Grade unter der Temperatur der einfließenden Luft (Trockenthermometer) liegen.

Ohne Belastung würde das Wasser auf die Einlasstemperatur des Feuchtigkeitsthermometers gekühlt werden. Dieser Zustand lässt sich jedoch nicht erreichen, da die Pumpe ca. 100 W auf das Wasser überträgt.



**7. Auswirkung von Kühllast auf die Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ )**

Der Tisch-Kühlturm ist entsprechend den untenstehenden empfohlenen Bedingungen vorzubereiten und in Betrieb zu nehmen. Anschließend ist Erreichen des Gleichgewichtszustands abzuwarten:

Wassermengenfluss	40 g s <sup>-1</sup>
Luftströmung- Manometerdifferentialdruck	16 mm WS
Kühllast	0

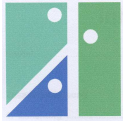
Die auf Seite 9 aufgeführten Messwerte sind aufzunehmen.

Bei konstantgehaltener Wasser- und Luftströmung ist die Last von 0 kW auf 0,5 kW zu erhöhen, und nach Erreichen des Gleichgewichtszustands sind die Beobachtungen zu wiederholen.

Ähnliche Tests sind mit Kühllasten von 1,0 und 1,5 kW auszuführen.

Die vier Tests können (aber sollen nicht) mit einer anderen konstanten Luftströmung wiederholt werden.





Hilton Tisch-Kühlturm

Protokoll

Datum:

Untersuchung:

Atmosphärischer Druck:

Test Nr.	1	2	3	4	5	6
Eingebaute Packung	B	B	B	B		
Packungsdichte $\rho_p$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	110	110	110	110		
Temperatur der Trockenluft am Eintritt in Säulenunterseite $t_1$ [°C]						
Temperatur der Feuchtluft am Eintritt in Säulenunterseite ( $t_{AW}$ ) $t_2$ [°C]						
Temperatur der Luft am Austritt aus Säulenoberseite $t_3$ [°C]						
Temperatur der Feuchtluft am Austritt aus Säulenoberseite $t_4$ [°C]						
Wassertemperatur bei Austritt aus der Säulenunterseite ( $t_D$ ) $t_6$ [°C]						
Blenden-Differentialdruck $\chi$ [mm H <sub>2</sub> O]	16	16	16	16		
Wassermengenfluss $\dot{m}_w$ [g s <sup>-1</sup> ]	40	40	40	40		
Kühlleistung $\dot{Q}$ [kW]	0	0,5	1,0	1,5		



Rechenmuster

Die Pumpe überträgt ca. 100 W in das Wasser. Dieser Wert ist der auf die Wärmelast im Tank hinzuzufügen.

Beispiel bei Test Nr. 3:

$$\begin{aligned} \text{gesamte Kühllast} &= \text{aufgegebene Last} + \text{Pumpeneingangsleistung} \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ )

$$\begin{aligned} \Delta t_{DAW} &= t_D - t_{AW} \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

spezifisches Volumen am Ausgang (typisch)  $v_B =$

$$\begin{aligned} \dot{m}_L &= 0,0137 \sqrt{\frac{\chi}{v_B}} \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Querschnittsfläche der Säule (A)} &= \\ &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luftmengenfluss pro Flächeneinheit} &= \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Wassermengenfluss pro Flächeneinheit} &= \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

abgeleitete Ergebnisse	1	2	3	4
Packungsdichte $\rho_p$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]				
Luftmengenfluss pro Flächeneinheit $\dot{m}_{LF}$ [kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]				
gesamte Kühllast $\dot{Q}$ [kW]				
Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ ): $\Delta t_{DAW}$ [K]				

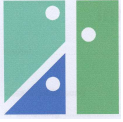


Diagramm der Annäherung der Wassertemperatur bei Austritt aus der Säuleunterseite ( $t_6$ ) an Temperatur der Feuchtluft bei Eintritt in die Säulenunterseite ( $t_2$ )  
oder  
Diagramm der Annäherung an Feuchtigkeitsthermometer.



## 8. Berechnung der Kühlturmleistung und des Wärmeverlustes.

Der Tisch-Kühlturm ist entsprechend den untenstehenden Empfehlungen vorzubereiten, in Betrieb zu nehmen und auf den Gleichgewichtszustand zu bringen:

Blenden-Differentialdruck	16 mm WS
Wassermengenfluss	40 g s <sup>-1</sup>
Kühllast	1,0 kW
Luftvorwärmung	0

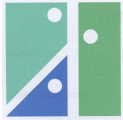
Der Gleichgewichtszustand ist erreicht, sobald keine weitere wesentliche Änderung der Temperatur bzw. des Mengenflusses auftritt.

In regelmäßigen Abständen über eine gemessene Zeitspanne, z.B. 10 Minuten, sind alle Temperaturen und Mengenflusswerte zu notieren und die mittleren Werte sind in ein Protokoll einzutragen.

Bei Beginn dieser Zeitspanne ist der Nachfülltank bis zur Messmarkierung mit destilliertem Wasser aufzufüllen. Am Ende dieser Zeitspanne ist der Tank mit einer einem Messbecher entnommenen bekannten Menge destillierten Wassers aufzufüllen. Durch Berechnen des Differenzwerts ist die Nachfüllmenge zu bestimmen, die während der Zeitspanne zugefüllt wurde.

**Diese Beobachtung kann (aber soll nicht) bei anderen Wasser- bzw. Luftmengenflüssen und mit einer anderen Belastung wiederholt werden.**

Für diese Arbeit benutzen sie die folgende Protokoll- und Rechnungsmuster und das psychrometrische Diagramm.



Hilton Tisch-Kühlturm

Protokoll

Datum:

Untersuchung:

Atmosphärischer Druck:

Test Nr.	1	2	3	4	5	6
Eingebaute Packung	B					
Packungsdichte $\rho_p$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	110					
Temperatur der Trockenluft am Eintritt in Säulenunterseite $t_1$ [°C]						
Temperatur der Feuchtluft am Eintritt in Säulenunterseite $t_2$ [°C]						
Temperatur der Luft am Austritt aus Säulenoberseite $t_3$ [°C]						
Temperatur der Feuchtluft am Austritt aus Säulenoberseite $t_4$ [°C]						
Wassertemperatur bei Eintritt in die Säulenoberseite $t_5$ [°C]						
Wassertemperatur bei Austritt aus der Säulenunterseite $t_6$ [°C]						
Nachfüllwassertemperatur = (Umgebungstrockentemperatur $t_1$ ) $t_7$ [°C]						
Blenden-Differentialdruck $\chi$ [mm H <sub>2</sub> O]	16					
Wassermengenfluss $\dot{m}_w$ [g s <sup>-1</sup> ]	40					
Kühlleistung $\dot{Q}$ [kW]	1,0					
Luftvorwärmung $\dot{Q}_L$ [kW]	0					
Nachfüllmenge $m_E$ [kg]						
Zeitabstand $\gamma$ [s]						



### Rechenmuster

Vor der Anwendung der Gleichung muss das System mit dazugehörigen Systemgrenzen definiert werden.

#### a) Berechnung der Leistung

Im System A wird Wärmestrom  $\dot{Q}$  im Wassertank übertragen. Zusätzlich wird Leistung  $P$  durch die Umwälzpumpe zugeführt. Luft mit geringerem Feuchtigkeitsgehalt tritt bei A ein und verlässt das System mit höherem Feuchtigkeitsgehalt bei B. Nachfüllwasser mit Umgebungstemperatur tritt bei E ein.

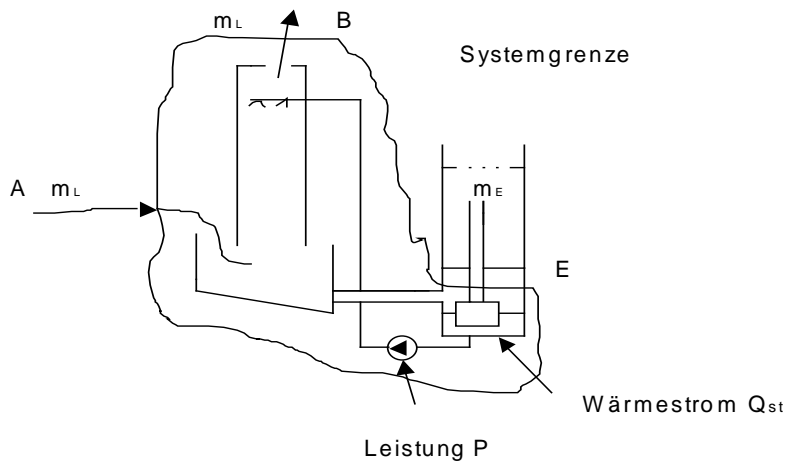


Abbildung 1: System A

Unter Anwendung der Trockenthermometer- und Feuchtigkeitsthermometer-Temperaturen können die Punkte A und B auf dem Psychrometer-Diagramm aufgetragen werden, wobei sich die folgenden Werte ablesen lassen:

$$h_A =$$

$$\omega_A =$$

$$h_B =$$

$$\omega_B =$$

$$v_{LB} =$$

Aus der Blendeneichung erhält man:

$$\dot{m}_L = 0,0137 \sqrt{\frac{\chi}{v_B}} = 0,0137 \sqrt{\frac{\chi}{(1 + \omega_B) v_{LB}}}$$

=



$$\dot{m}_L =$$

Nachfüllmengenfluss

$$\begin{aligned}\dot{m}_E &= \frac{m_E}{y} \\ &= \\ \dot{m}_E &= \end{aligned}$$

spezifische Enthalpie der Nachfüllmenge ( $h_f$  bei  $t_1$ )

$$h_E =$$

Anwendung der Kontinuitätsgleichung auf das angedeutete System (**System A**) ergibt:

$$\dot{Q} - P = \Delta\dot{H} + \Delta\dot{KE}$$

Die kinetische Energiestrom  $\Delta\dot{KE}$  wird hier vernachlässigt.

Daher,

$$\begin{aligned}\dot{Q} - P &= \\ &= \end{aligned}$$

(Die Pumpenleistung beträgt ca. 100 W, und geht negativ in die Bilanz ein)

$$\begin{aligned}\Delta\dot{H} &= \dot{H}_{\text{Auslaß}} - \dot{H}_{\text{Einlaß}} \\ &= \dot{m}_L h_B - \dot{m}_L h_A - \dot{m}_E h_E \\ &= \dot{m}_L (h_B - h_A) - \dot{m}_E h_E \\ &= \\ &= \\ &= \end{aligned}$$

Geringe Abweichungen können auf Messfehler sowie auf die nicht berücksichtigte Wärmeübertragung zu und von der Umgebung und auf Herstellungstoleranzen in den Nennwerten der Heizelemente zurückgeführt werden.



**b) Rechnung des Wärmeverlustes**

Im System B befinden sich die Pumpe und die Heizelemente außerhalb der Systemgrenze. Warmes Wasser tritt bei C in das System ein und kühles Wasser verlässt es in D. In beiden Punkten wird die Temperatur messtechnisch erfasst.

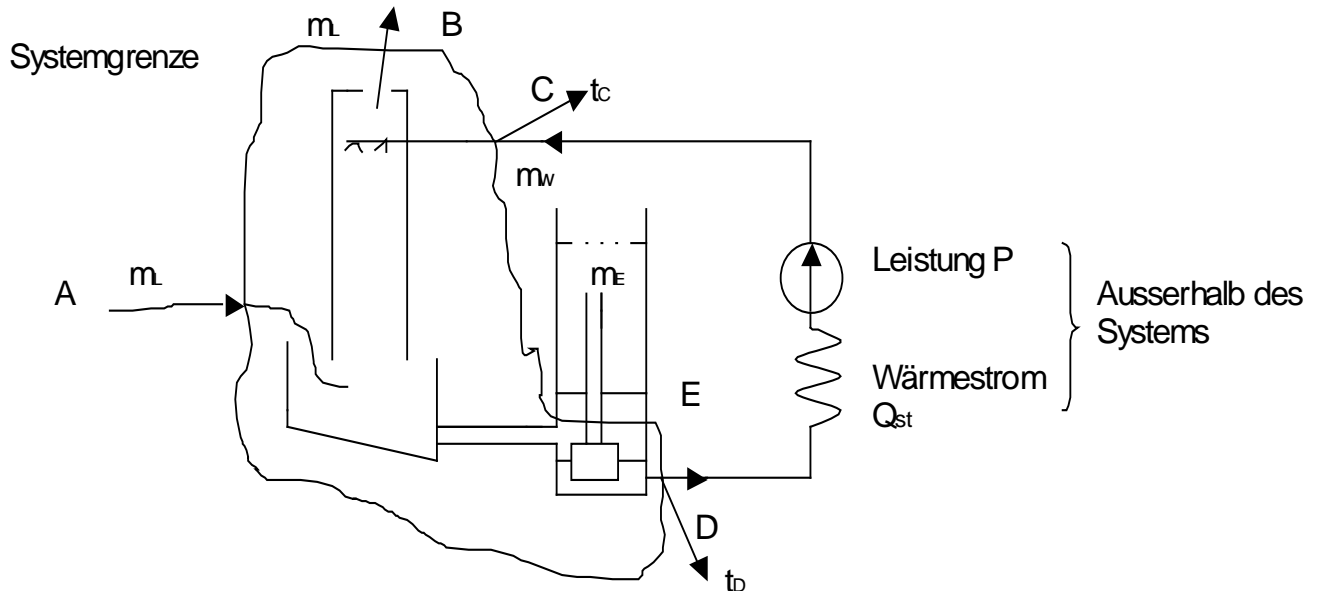


Abbildung 2: System B

Es folgt:

$$\dot{Q}_{\text{Verl}} - P = \Delta\dot{H} - \Delta\dot{KE}$$

Die Pumpenleistung ist hier  $P = 0$  und die kinetische Energie bleibt vernachlässigt.

Im Idealfall müsste der Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Verl}}$ , der die Systemgrenze überschreitet, gleich Null sein. Da jedoch ein geringer Teil der Wärme durch Strahlung und Wärmeübertragung nach Außen dringt, kann  $\dot{Q}_{\text{Verl}}$  einen kleinen Wert aufweisen.

Die Gleichung lautet:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{H} &= \dot{H}_{\text{Auslass}} - \dot{H}_{\text{Einlass}} \\ &= (\dot{m}_L h_B + \dot{m}_W h_D) - (\dot{m}_L h_A + \dot{m}_W h_C + \dot{m}_E h_E) \\ &= \dot{m}_L (h_B - h_A) + \dot{m}_W (h_D - h_C) - \dot{m}_E h_E \\ &= \dot{m}_L (h_B - h_A) + \dot{m}_W c_{pW} (t_D - t_C) - \dot{m}_E h_E \\ &= \\ &= \end{aligned}$$





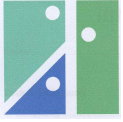
Abweichungen können auf Messfehler sowie auf die nicht berücksichtigte Wärmeübertragung zu und von der Umgebung und auf Herstellungstoleranzen in den Nennwerten der Heizelemente zurückgeführt werden.

### Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltungssatz)

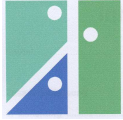
Durch die Kontinuitätsgleichung muss der Massenstrom der Trockenluft und des Wassers (als Flüssigkeit oder Dampf) am Einlass und Auslass eines beliebigen Systems gleich sein. Daher gilt:

$$\begin{aligned}\dot{m}_E &= \dot{m}_{WB} - \dot{m}_{WA} \\ \dot{m}_E &= \dot{m}_L(\omega_B - \omega_A) \\ \dot{m}_E &= \\ &= \end{aligned}$$

Abweichungen können durch Mitschleppung von Wassertröpfchen aus dem Kühlturm in die Luft verursacht werden.



Psychrometrisches Diagramm



**LITERATURHINWEISE**

<u>Verfasser</u>	<u>Titel</u>	<u>Verlag</u>
1. W. Stanford and G.B. Hill	Cooling Towers – Principles and Practice	Carter Thermal Engg. Hay Mills, Birmingham 25
2. J.D. Gurney	Cooling Towers	MacLaren Press
3. Rogers and Mayhew	Thermodynamic & Transport Properties of Fluids (S.I.)	Basil Blackwell
4. Rogers and Mayhew	Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer.	Longman
5. T. Eastop and McCorkey	Applied Thermodynamics for Engineering Technologists.	Longman
6. Meteorological office	Hygrometric Tables. Pt.II (°C) Pt.III	H.M.S.O., York House, Kingsway, London WC2
7. -	Psychrometric Charts for Pressures from 700 to 1100 mbar In increments of 25 mbar. (S.I. Units)	Troup Publications Ltd., 76 Oxford Street, London W1N OHN