

Es gelten folgende Kennwerte:

$$Z = \frac{K_W \cdot I_v^* \cdot H_{KE} \cdot b}{C_{p,W} \cdot r} \quad (5)$$

$$X = \frac{K_W \cdot T_{KE}}{l} \quad (6)$$

$$\Theta = b (t_{w,20} - t_{w,1}) \quad (7)$$

$$I = \frac{h}{I_v^*} \quad (8)$$

Durch die Anwendung dieser dimensionslosen Größen auf das Gleichungssystem (1) bis (4) erhält man dieses in dimensionsloser Form.

Es gilt die Beziehung

$$-\left(\frac{\partial \Theta}{\partial Z}\right) = e^\Theta - I = \left(\frac{\partial I}{\partial X}\right) \quad (9)$$

mit den Randbedingungen

$$\Theta = 0 \quad \text{für} \quad Z = 0 \quad (10)$$

und

$$I = IE = \frac{h_1}{I_v^*} \quad \text{für} \quad X = 0 \quad (11)$$

Aus den letzten Ausführungen ist ersichtlich, daß durch die dimensionslose Darstellung der Parameter IE als alleiniger Parameter auftritt. Der Parameter hat folgende Form:

$$IE = \frac{f(t_{e,2}, \varphi_1)}{f(t_{e,1})} \quad (12)$$

Die Berechnung kann als eine Funktion der Eingangsgrößen der Arbeitsmedien Luft und Wasser in den Querstrom-Kühlturmeinbau angesehen werden.

Zur Realisierung der praktischen Rechnungen benötigt man für die Sättigungsenthalpie der Luft einen Ausdruck in der Form

$$I_s^* = h^* = e^{a+b \cdot t} \quad (13)$$

Die Beschränkung auf einen linearen Exponentenausdruck liegt im Faktor b , der als Umrechnungsfaktor in die Gleichungen (5) und (7) eingeht. Die Genauig-

keit dieses Ausdruckes muß aus besagten Gründen möglichst hoch sein.

3. Berechnung der Luftenthalpie

Mikypálka und Reinisch [4] verwendeten in ihren Rechnungen die Funktion

$$I_s^* = e^{1,620 + 0,0555 t} \quad (14)$$

Für die Genauigkeit der gesuchten Funktion kann der Temperaturbereich 10 °C bis 40 °C als wichtig angesehen werden, da innerhalb dieses Bereiches die häufigsten Anwendungsfälle liegen. Die Gleichung (14) konnte durch eine andere Funktion ersetzt werden, deren Genauigkeit höher liegt. Diese Gleichung lautet:

$$I_s^* = e^{1,4852 + 0,05665 t} \quad (15)$$

Der Verlauf der Sättigungsenthalpie und der Vergleich der Fehler können den Bildern 2 und 3 entnommen werden.

4. Berechnungsverfahren

Nach Gleichung (9) gilt nun mit dem Übergang zu Differenzgleichungen:

$$-\frac{\partial \Theta}{\partial Z} = e^\Theta - I, \quad (16a)$$

$$\frac{\partial I}{\partial X} = e^\Theta - I. \quad (16b)$$

Die Anwendung der Differenzgleichungen ist nur möglich, wenn ΔZ und ΔX genügend klein gewählt werden. Nach Bild 4 kann man die Differenzen wie folgt definieren:

$$\Delta \Theta = \Theta_{m+1, n+1} - \Theta_{m+1, n}, \quad (17)$$

$$\Delta I = I_{m+1, n+1} - I_{m+1, n}. \quad (18)$$

Für die Gleichungen (16a) und (16b) gilt

$$\frac{\Theta_{m+1, n+1} - \Theta_{m+1, n}}{\Delta Z} = \frac{e^{\Theta_{m+1, n+1}} + e^{\Theta_{m+1, n}}}{2} - \frac{I_{m+1, n+1} + I_{m+1, n}}{2} \quad (19)$$

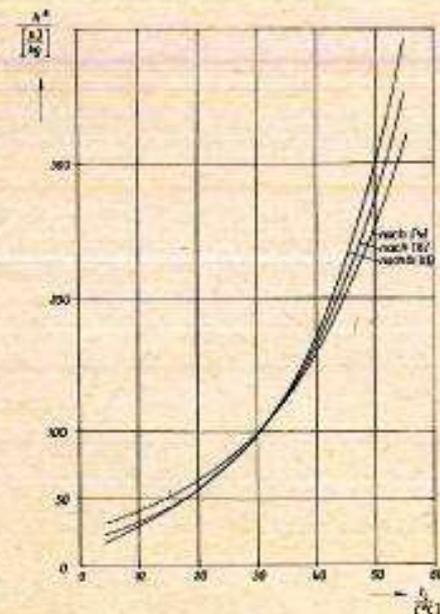


Bild 2. (links) h^* , t -Diagramm der gesättigten Luft

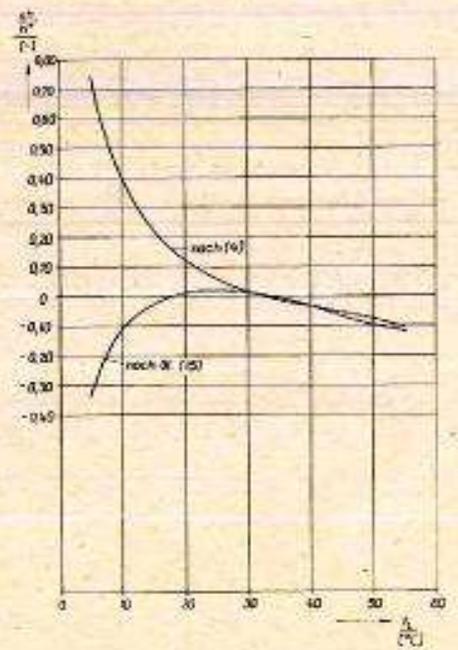


Bild 3. (rechts) Fehleruntersuchung

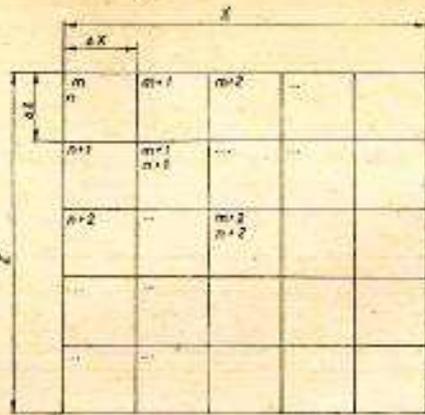


Bild 4. Kühlturmeinbau in dimensionsloser Form

und

$$\frac{I_{m+1,n+1} - I_{m,n+1}}{\Delta X} = \frac{e^{\Theta_{m+1,n+1}} + e^{\Theta_{m,n+1}}}{2} - \frac{I_{m+1,n+1} + I_{m,n+1}}{2} \quad (20)$$

4.1. Berechnung der Randfunktion für $X = 0$ und $Z = 0$
 Für $X = 0$ wird die Randbedingung (11) wirksam. Nach Bild 4 gilt:

$$IE = I_{w,n} = I_{w,n-1} = I_{w,n-2} = \dots \quad (21)$$

Im Anfangspunkt $P(m, n)$ ist $\Theta = 0$. Die Auflösung der Gleichung (19) nach $\Theta_{m,n+1}$ ist nicht möglich. Als Grenze der notwendigen iterativen Annäherung wurde 10^{-4} Prozent gewählt.

Für $Z = 0$ gilt die Randbedingung (10), und es muß im Anfangsschritt $I_{m-1,n}$ ermittelt werden. Durch Auflösung von Gleichung (20) erhält man

$$I_{m+1,n} = \frac{2 \cdot \Delta X}{2 + \Delta X} \cdot \frac{\Delta X - 2}{2 + \Delta X} \cdot I_{m,n} \quad (22)$$

4.2. Berechnung der inneren Gitterpunkte

Nach Bild 4 kann für den Anfangsschritt folgendes festgehalten werden:

$m = 0$
 $n = 0$

Punkt (m, n) : $I = IE$
 $\Theta = 0, 0$

Punkt $(m+1, n)$: $I = I_{w-1,n}$, nach Gleichung (22)
 $\Theta = 0, 0$

Punkt $(m, n+1)$: $I = IE$
 $\Theta = \Theta_{m,n+1}$, nach Gleichung (19)

Im Punkt $P(m+1, n+1)$ sind die Werte für Θ und I unbekannt. Aus den Gleichungen (19) und (20) wird ein Iterationsverfahren entwickelt, indem man für $I_{m+1,n+1}^{(0)}$ und $\Theta_{m+1,n+1}^{(0)}$ einen Anfangswert annimmt und bei einer Annäherung beider Ausdrücke auf 10^{-4} Prozent das Iterationsverfahren abbricht.

Die Iterationsgleichungen lauten:

$$\Theta_{m+1,n+1}^{(j)} = \Theta_{m+1,n}^{(j-1)} - \Delta Z$$

$$\left[\frac{e^{\Theta_{m+1,n+1}^{(j-1)}} + e^{\Theta_{m+1,n}^{(j-1)}}}{2} \cdot I_{m+1,n+1}^{(j-1)} + I_{m,n+1} \right] \quad (23)$$

$$I_{m+1,n+1}^{(j)} = I_{m,n+1}^{(j-1)} + \Delta X$$

$$\left[\frac{e^{\Theta_{m+1,n+1}^{(j-1)}} + e^{\Theta_{m,n+1}^{(j-1)}}}{2} \cdot I_{m+1,n+1}^{(j-1)} + I_{m,n+1} \right] \quad (24)$$

5. Ergebnisse

Da nach Gleichung (12) nur der Eingangszustand von Wasser und Luft charakteristisch ist, kann für jede mögliche Variante des Eintrittszustandes ein Diagramm aufgestellt werden (Bilder 5, 6 und 7).

Mit den Werten dieser Diagramme werden für Konstrukteure zwei Anwendungsvarianten interessant.

1. Methode

Wahl von X und Z [nach Gleichung (5) und (6)] und des Parameters IE . Ermittlung von Θ und I aus dem entsprechenden Diagramm und Bestimmung von

$$t_{w2w} = t_{w1} + \frac{\Theta}{b} \quad (25)$$

und

$$h_2 = I \cdot I_0^4 \quad (26)$$

2. Methode

Wahl von IE , t_{w2w} und h_2 und Ermittlung von X und Z . Hier kann dann die optimale Bauweise des Querstrom-Kühleinbaues bestimmt werden. Einflüsse von Umwelt und praktischem Betrieb auf den Kühleinbau können verfolgt werden.

Für einen Kühlturmeinbau nach Bild 1 ergibt sich für

$$r = \frac{m_W}{A_W} = \frac{m_W}{\pi \cdot T_{KK} (D_3 + T_{KK})} \quad (27)$$

und

$$l = \frac{m_L}{A_L} = \frac{m_L}{\pi \cdot D_3 \cdot H_{KK}} \quad (28)$$

Setzt man die Gleichungen (27) und (28) in die Gleichungen (5) und (6) ein, erhält man nachfolgende Ausdrücke:

$$\frac{H_{KK} \cdot T_{KK} (D_3 + T_{KK})}{m_W} \cdot K_W = \frac{C_F \dot{V}}{b \cdot \pi \cdot I_0^4} \cdot Z, \quad (29)$$

$$\frac{H_{KK} \cdot T_{KK} \cdot D_3}{m_L} \cdot K_W = \frac{X}{\pi} \quad (30)$$

Gleichung (29) wurde im Bild 8 dargestellt. Es gibt je

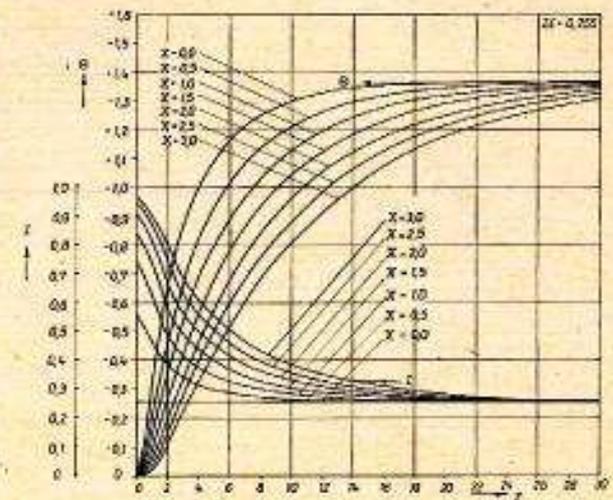


Bild 5. Diagramm für $IE = 0,355$

$z, B_1: t_{L1} = -15^\circ C$
 $\phi_0 = 70\%$
 $t_{w1} = 35^\circ C$
 $\Delta t_w = 10 K$

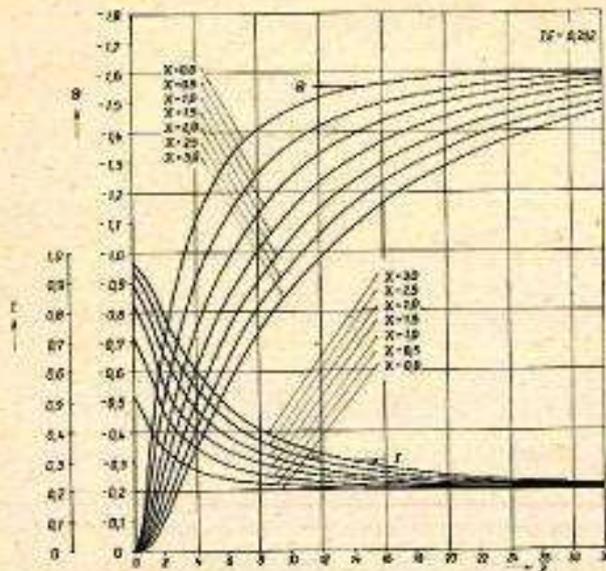


Bild 6. Diagramm für $IE = 0,202$

Z. B.: $t_{L,1} = 3,6^\circ\text{C}$
 $\phi_1 = 93\%$
 $t_{W,1} = 32,2^\circ\text{C}$
 $\Delta t_W = 9,2\text{ K}$

Parameter IE demzufolge ein Bild entsprechend den Bildern 5 bis 7 und dem Bild 8.

6. Zusammenfassung

Die vorgestellte Berechnungsmethode ist durch die dimensionslose Darstellung für jedes Maßsystem geeignet. Bei einer Anwendung muß man die getroffenen Voraussetzungen mit dem konkreten Fall vergleichen und eventuelle Abweichungen überprüfen. Nach Vorlage einer größeren Anzahl von Diagrammen kann man einfache Auslegungsvarianten aufstellen, das Betriebsverhalten verfolgen und die Leistungsmessung von Kühltürmen auswerten. Das Verfahren bietet durch Ergänzungsmöglichkeiten Diagramme an, die für allgemeine wie auch konkrete Anwendungsfälle verwendbar sind.

Verwendete Formelzeichen

α	Teilexponent,
A_L	Eintrittsfläche für Luft,
A_W	Eintrittsfläche für Wasser,
b	Teilexponent,
$C_{p,w}$	spezifische Wärme für Wasser bei konstantem Druck,
D_2	Durchmesser,
h	Enthalpie der Luft,
h_1	Enthalpie der Luft am Eintritt,
h_2	Enthalpie der Luft am Austritt,
h^*	Sättigungsenthalpie der Luft,
H_{kkt}	Höhe des Kühlturmeinbaues,
I	Enthalpie, dimensionslos,
IE	Diagrammparameter, dimensionslos,
I_s^*	Sättigungsenthalpie der Luft, dimensionslos,
K_{GZ}	Gesamtübertragungsfaktor des Stoffaustausches,
l	Luftdurchsatzzahl,
m	Koordinatenpunkt in X-Richtung,
m_W	Mengenstrom des Wassers,
m_L	Mengenstrom der Luft,
n	Koordinatenpunkt in Z-Richtung,
r	Regendichte,
t_L	Lufttemperatur,
$t_{L,1}$	Lufttemperatur am Eintritt,
t_W	Wassertemperatur,
$t_{W,1}$	Wassereintrittstemperatur,
$t_{W,m}$	mittlere Kaltwassertemperatur,
X	Kennwert, dimensionslos,

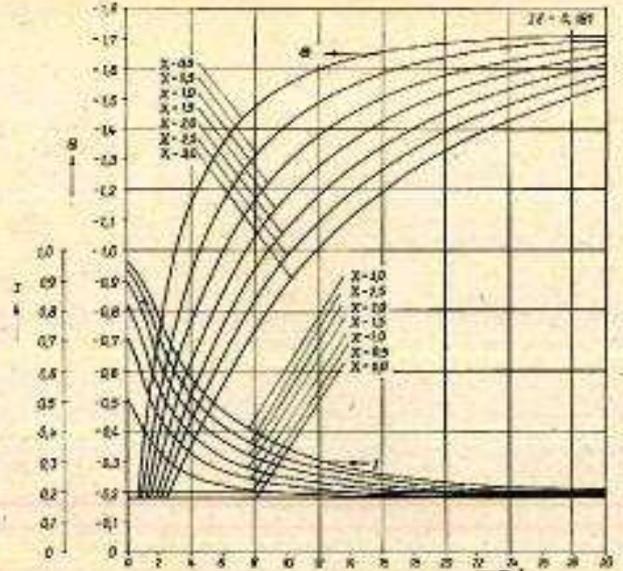


Bild 7. Diagramm für $IE = 0,181$

Z. B.: $t_{L,1} = 6,8^\circ\text{C}$
 $\phi_1 = 80\%$
 $t_{W,1} = 34,2^\circ\text{C}$
 $\Delta t_W = 9,2\text{ K}$

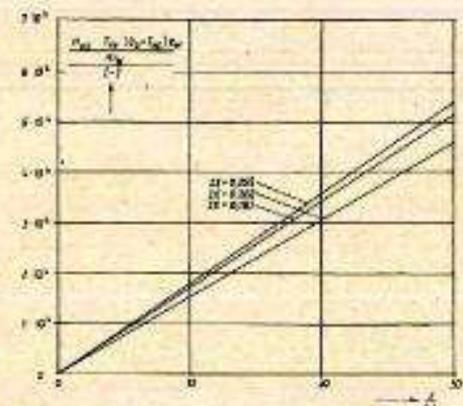


Bild 8. Darstellung der Gleichung (25) als Funktion von Z und Parameter IE

Z	Kennwert, dimensionslos,
ΔX	Schrittweite in X-Richtung,
ΔZ	Schrittweite in Z-Richtung,
ϕ	Kennwert, dimensionslos,
ϕ_1	Luftfeuchtigkeit im Eintrittszustand.

Literatur

- [1] Bartzack, H.: Untersuchungen zur Anwendung des Querstromprinzips für Verdunstungskühltürme. Ing.-Praktikums-Beleg Nr. 44, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1972
- [2] Bartzack, H.: Untersuchungen zur Berechnung von Querstrom-Verdunstungskühltürmen, WPS-Arbeit Nr. 14, TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1973
- [3] Lopenes, S.: Beitrag zur Berechnung von Querstrom-Verdunstungskühltürmen. Dissertation, TU Dresden, 1973
- [4] Mikyska, L., und Reintsch, R.: Kühlturmberechnung mit einer elektron. Rechenmaschine. Brennstoff-Wärme-Kraft 17 (1955) S. 61-63
- [5] Schochter, R. S., und Kong, T. L.: Design Considerations in Cross-Flow Air-Water Contactors. Ind. and Engin. Chemistry 52 (1960) 11, S. 1373-1376
- [6] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampftafel bis 910°C und bis 1980 at. Springer-Verlag, 1963, 7. Auflage
- [7] Zitel, S. M., und Brand, B. B.: An Analysis to the Cross-Flow Cooling Tower. Refrig. Eng. 64 (1956) 8, S. 31

Manuskripteingang am 8.3.1976 ENA 414