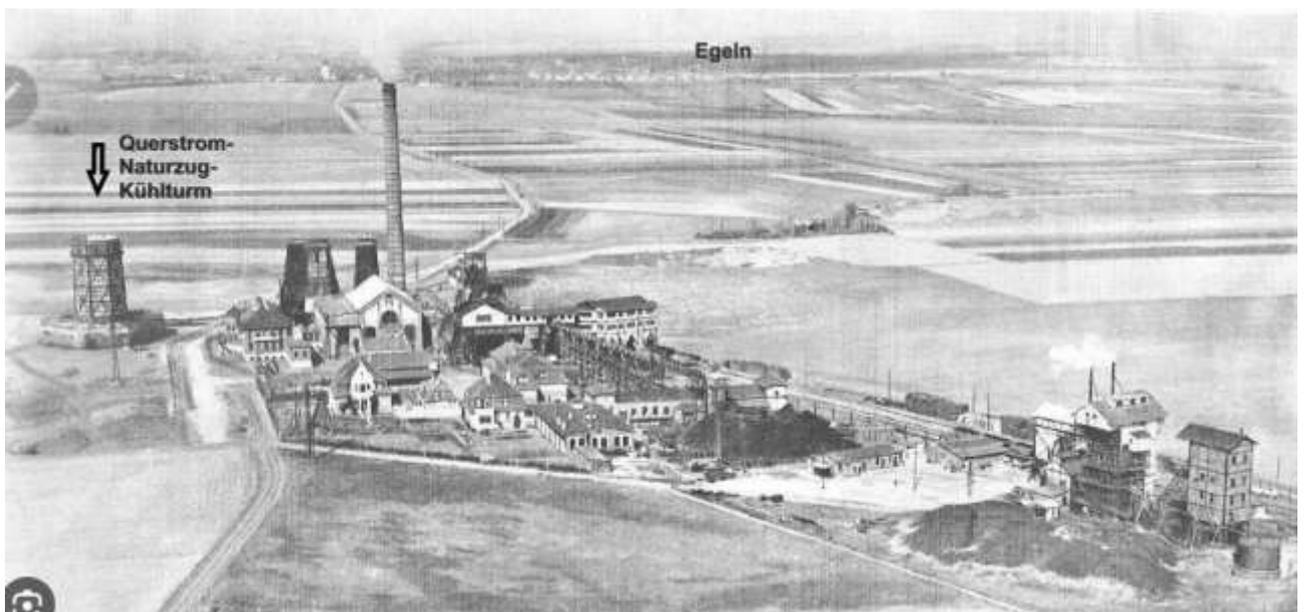
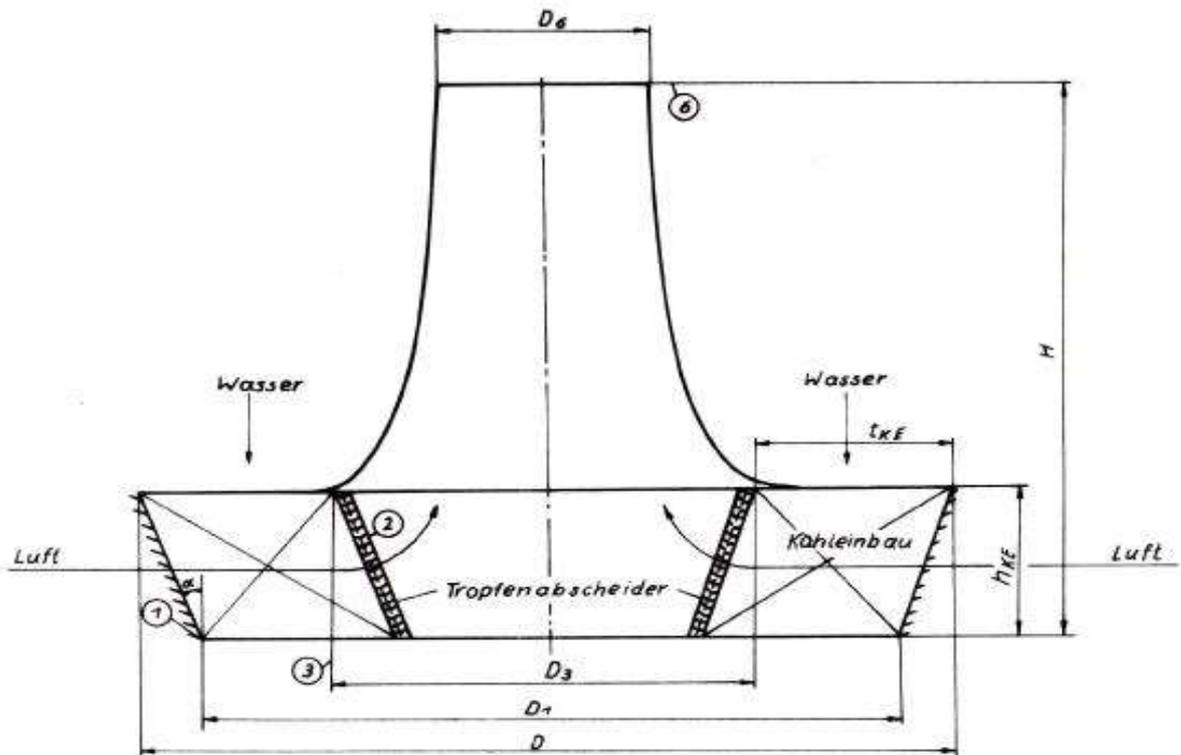


Kühltürme : Querstrom-Naturzug



KW César, 1910, mit dem Querstrom-Naturzug-Kühlturm (Volksstimme 14.04.2017)

Zur Berechnung von Querstrom-Verdunstungskühltürmen²

1. Einleitung

Die Anwendung des Querstromprinzips für Verdunstungskühltürme bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Gegenstromverfahren [3]. Nachteilig ist aber, daß zur Berechnung des Kühlprozesses die Abhängigkeit des Abkühlverhaltens von der Höhe und Tiefe des Kühleinbaues zu beachten ist. Der vorliegende Bericht erläutert ein relativ einfaches Berechnungsverfahren, mit dessen Hilfe der Projektgenieur in der Lage ist, in kurzer Zeit die Auslegung einer gewählten Konstruktionsvariante eines Querstrom-Kühlturmes vorzunehmen.

2. Grundlagen

Als Kenngrößen treten bei einem Querstrom-Kühleinbau nachfolgende Größen auf (Bild 1):

1. Stoffgrößen

- $t_{W,1}$ Wassertemperatur,
- h_1 Enthalpie der Luft,
- $K_{W,L}$ Gesamtübertragungszahl des Stoffaustausches.

2. Auslegungsgrößen

- H_{KE} Höhe des Kühleinbaues,
- T_{KE} Tiefe des Kühleinbaues,
- A_W Bezugsfläche für Wasser,
- A_L Bezugsfläche für Luft,
- \dot{m}_W Mengenstrom des Wassers,
- \dot{m}_L Mengenstrom der Luft.

Das Verhältnis zwischen Luftenthalpie und Wassertemperatur wird durch eine Gruppe von partiellen Differentialgleichungen beschrieben [7].

$$-\frac{\dot{m}_W}{A_W} \cdot C_{p,W} \frac{\partial t_W}{\partial H_{KE}} = \frac{\dot{m}_L}{A_L} \cdot \frac{\partial h}{\partial T_{KE}}, \quad (1)$$

$$\frac{\dot{m}_L}{A_L} \cdot \frac{\partial h}{\partial T_{KE}} = K_{W,L} (\lambda^* - h). \quad (2)$$

¹ Dipl.-Ing. Harald Bartzack und Dr.-Ing. Siegfried Lepenies, Sektion Energieumwandlung, Bereich Kraftwerkstechnik, Technische Universität Dresden

² Ergebnis der studentischen Arbeit im wissenschaftlich-produktiven Studium im 4. Studienjahr der Fachrichtung Energieanlagen-technik

Für die Differentialgleichungen (1) und (2) kann man nachfolgende Randbedingungen aufstellen:

$$t_W = t_{W,1} \quad \text{für } H_{KE} = 0 \text{ m}, \quad (3)$$

$$h = h_1 \quad \text{für } T_{KE} = 0 \text{ m}. \quad (4)$$

Die Anwendung dieser partiellen Differentialgleichungen kann praktisch nur bei Beachtung bestimmter Annahmen erfolgen. Diese Annahmen lauten:

1. Ein stationärer Zustand ist erreicht.
2. Die Lewis-Beziehung ist gültig [5].
3. Die Verwendung eines Gesamtübertragungskoeffizienten ist bindend. Dieser totale Stoffübertragungskoeffizient muß unabhängig von der Lage angenommen werden.
4. Diffusionsvorgänge und konvektiver Transport werden als unabhängige Austauschvorgänge betrachtet.
5. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden als konstant angenommen.
6. Die spezifische Wärme $C_{p,W}$ ist konstant.

Um eine universelle Anwendung zu ermöglichen, wurde durch Bildung dimensionsloser Kennwerte das Gleichungssystem umgestellt [2].

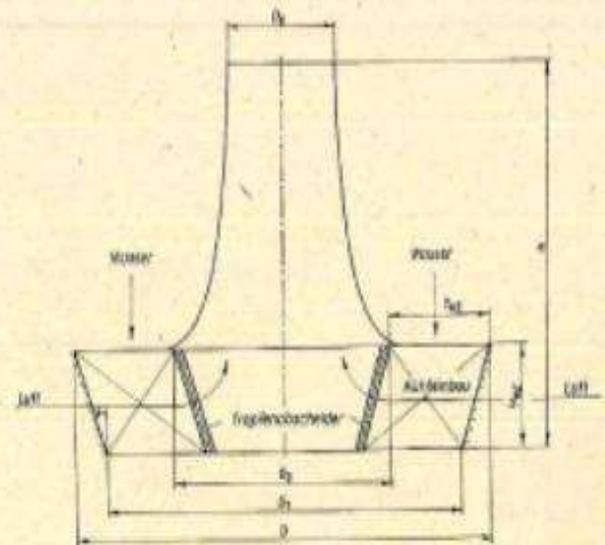


Bild 1. Querstrom-Naturzugkühlturm [5]

Es gelten folgende Kennwerte:

$$Z = \frac{K_W \cdot I_0^* \cdot H_{KE} \cdot b}{C_{pW} \cdot r} \quad (5)$$

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

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

$$I = \frac{h}{I_0^*} \quad (8)$$

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

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

und

$$I = IE = \frac{h_1}{I_0^*} \quad \text{für } X = 0. \quad (11)$$

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

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

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

$$I_0^* = h^* = e^a + b \cdot t \quad (13)$$

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

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

$$I_0^* = e^{1,820 + 0,0055t} \quad (14)$$

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:

$$I_0^* = e^{1,4852 + 0,00665t} \quad (15)$$

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:

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

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

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:

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

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

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

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

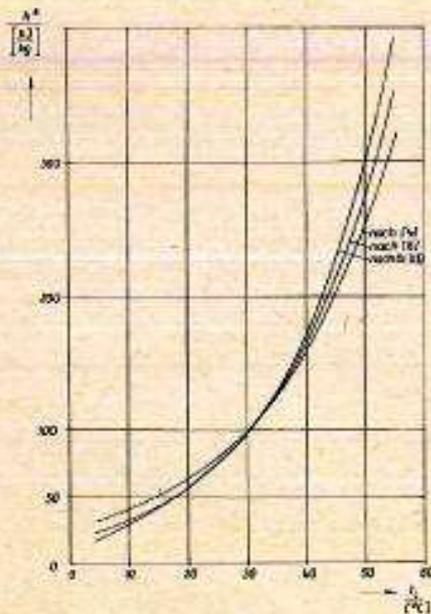


Bild 2. (links) h^*, t -Diagramm der gesättigten Luft

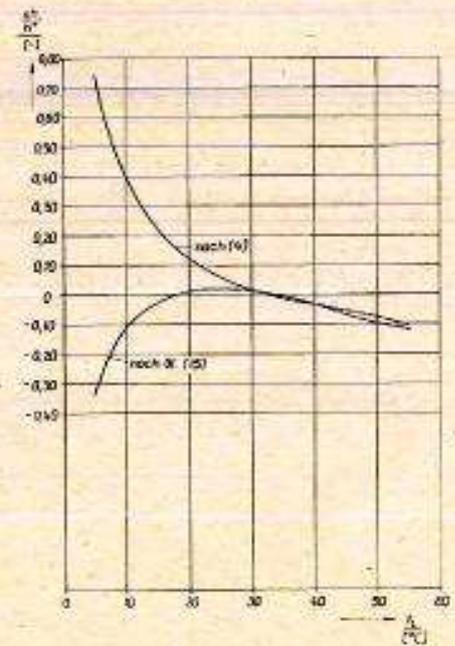


Bild 3. (rechts) Fehleruntersuchung

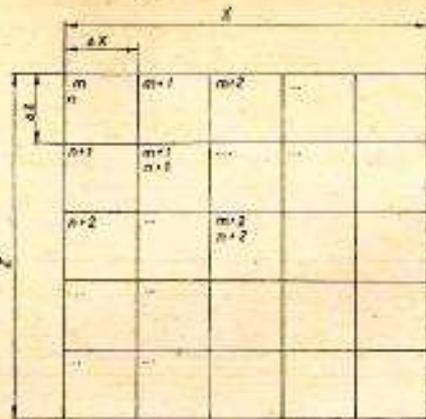


Bild 4. Kühlturmeinbau in dimensionsloser Form

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:

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

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 $(m+1, n)$: $I = I_{m+1,n}$, 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:

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

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

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

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

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

$$t_{w2m} = t_{w1} + \frac{\Theta}{b} \quad (25)$$

und

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

2. Methode

Wahl von IE , t_{w2m} 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

$$r = \frac{m_W}{A_W} = \frac{m_W}{\pi \cdot T_{KK} (D_2 + T_{KK})} \quad (27)$$

und

$$l = \frac{m_L}{A_L} = \frac{m_L}{\pi \cdot D_2 \cdot H_{KK}} \quad (28)$$

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

$$\frac{H_{KK} \cdot T_{KK} (D_2 + T_{KK})}{m_W} \cdot K_W = \frac{C_{p,w} \dot{w}}{b \cdot \pi \cdot I_0^4} \cdot Z, \quad (29)$$

$$\frac{H_{KK} \cdot T_{KK} \cdot D_2}{m_L} \cdot K_W = \frac{X}{\pi} \quad (30)$$

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

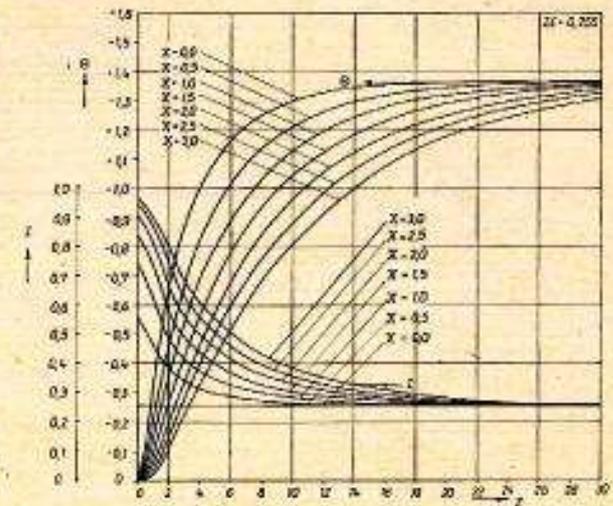


Bild 5. Diagramm für $IE = 0,355$

- $t_{L1} = 15^\circ\text{C}$
- $\phi_1 = 70\%$
- $t_{w1} = 35^\circ\text{C}$
- $\Delta t_w = 10\text{K}$

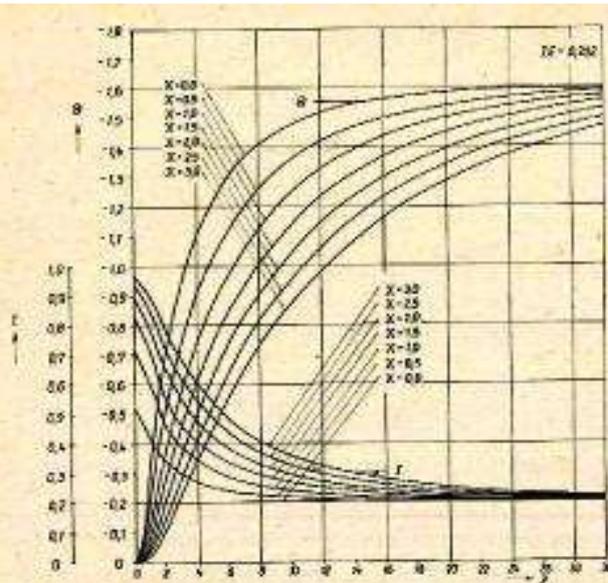


Bild 6. Diagramm für $IE = 0,202$
 z. B.: $t_{L,1} = 3,8^\circ\text{C}$
 $\phi_1 = 89\%$
 $t_{W,1} = 32,2^\circ\text{C}$
 $\Delta t_M = 9,2\text{ K}$

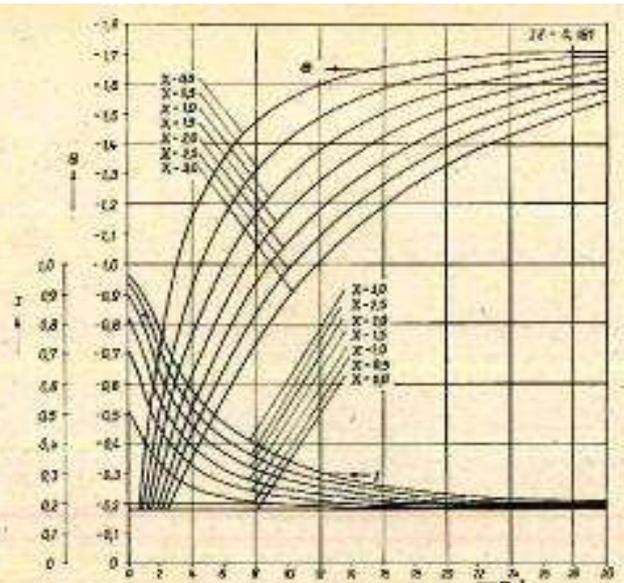


Bild 7. Diagramm für $IE = 0,181$
 z. B.: $t_{L,1} = 0,8^\circ\text{C}$
 $\phi_1 = 89\%$
 $t_{W,1} = 34,2^\circ\text{C}$
 $\Delta t_M = 9,2\text{ K}$

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

6. Zusammenfassung

Die vorgestellte Berechnungsmethode ist durch die dimensionlose 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

σ	Teilexponent,
A_0	Eintrittsfläche für Luft,
A_{0r}	Eintrittsfläche für Wasser,
b	Teilexponent,
$C_{p,w}$	spezifische Wärme für Wasser bei konstantem Druck,
D_0	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_{0r}	Gesamtübertragungsfaktor des Stoffaustausches,
l	Luftdurchsatzzahl,
m	Koordinatenpunkt in X-Richtung,
m_{1r}	Mengenstrom des Wassers,
m_L	Mengenstrom der Luft,
n	Koordinatenpunkt in Z-Richtung,
ρ	Reindichte,
t	Lufttemperatur,
$t_{L,1}$	Luft Eintrittstemperatur,
t_w	Wassertemperatur,
$t_{w,1}$	Wassereintrittstemperatur,
$t_{w,m}$	mittlere Kaltwassertemperatur,
X	Kennwert, dimensionslos.

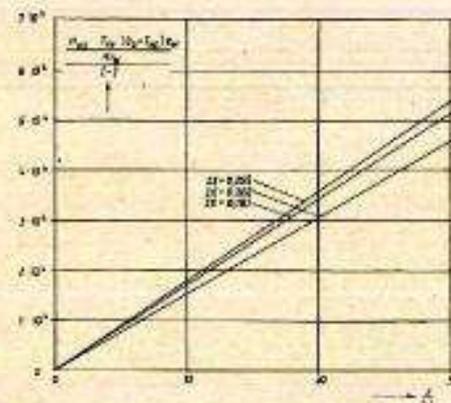


Bild 8. Darstellung der Gleichung (19) als Funktion von Z und Parameter IE

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

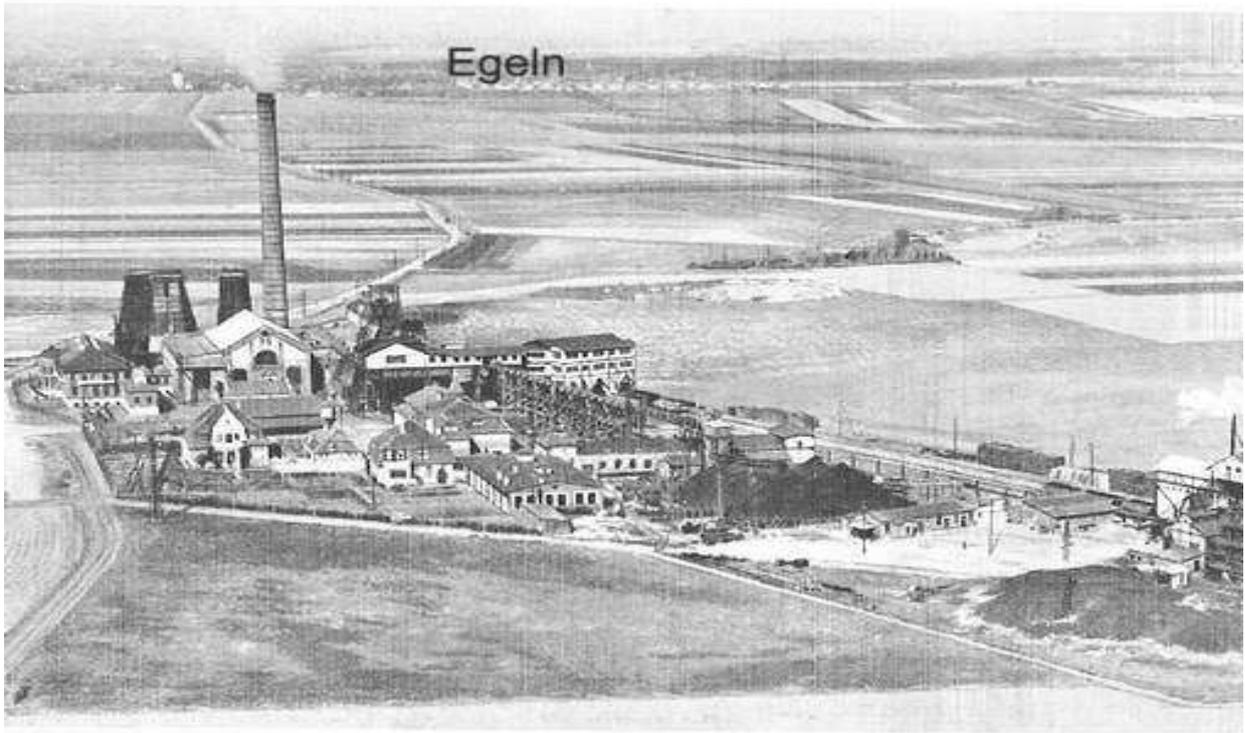
Literatur

- [1] Bartzack, H.: Untersuchungen zur Anwendung des Querstromprinzips für Verdunstungskühltürme. Ing.-Praktikums-Bericht Nr. 44. TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1973
- [2] Bartzack, H.: Untersuchungen zur Berechnung von Querstrom-Verdunstungskühltürmen, WPS-Arbeit Nr. 14. TU Dresden, Sektion Energieumwandlung, 1973
- [3] Lopenius, S.: Beitrag zur Berechnung von Querstrom-Verdunstungskühltürmen. Dissertation, TU Dresden, 1973
- [4] Moryška, L., und Reintsch, R.: Kühlturmberechnung mit einer elektron. Rechenmaschine. Brennstoff-Wärme-Kraft 17 (1955) S. 61-63
- [5] Schechter, R. S., und Kang, Y. L.: Design Considerations in Cross-Flow Air-Water Contactors. Ind. and Engin. Chemistry 51 (1959) 11, S. 1373-1376
- [6] Schmidt, E.: VDI-Wasserdampftafel bis 300 °C und bis 1000 at. Springer-Verlag, 1963, 7. Auflage
- [7] Zhai, S. W., und Brand, B. B.: An Analysis to the Cross-Flow Cooling Tower. Refg. Eng. 61 (1956) R. S. 31

Manuskripteingang am 8. 3. 1976

ENA 4414

Das Rätsel vom 14.04.2017 in der Volksstimme.



Kraftwerksanlage Cäsar 1928 (privat Heidemarie Borchert, Westeregeln)

Leserzuschrift vom 23.04.2017

Bartzack am 2017-04-23

Ja Hallo, nochmal zu Cäsar.

Die Braunkohlengrube Cäsar der Solvay-Werke mit privatem Gleisanschluss hatte im Kraftwerk eine bedeutende Innovation für ihre Zeit. Die Kühltürme waren die ältesten bekannten Querstrom-Naturzug-Kühltürme Deutschlands. Noch Ende der 60ziger Jahre wurden Leistungsmessungen durch das Institut für Kühltürme in Leipzig durchgeführt. Lit. S. Lepenies, Diss. TU Dresden 1973.



Braunkohlengrube Cäsar mit Kraftwerk und Naturzug-Kühltürmen

Unternehmensgeschichte: Cäsar (Quelle: Stand von 1931)

The screenshot shows a website for 'Kraft- und Dampfmaschinen' with a navigation bar containing 'Startseite', 'Impressum', 'Kontakt', and a search box. The main content area is titled 'Braunkohlengrube Cäsar' and includes a sidebar menu with items like 'Firmen- und Sachregister', 'Dampfmaschinen', 'Hersteller', 'Zeittafel', 'Lokomotiven', 'Bildergalerie', 'Besuchsempfehlung', and 'Weblinks'. The 'Allgemeines' section contains a table with the following data:

Firmenname	Braunkohlengrube Cäsar
Ortsitz	Egeln
Postleitzahl	39435
Art des Unternehmens	Braunkohlenbergwerk
Anmerkungen	Dazu gehört ein Dampfturbinen-Kraftwerk mit AEG- und BBC-Turbinen
Quellenangaben	[50 Jahre Akt.-Ges. Cons. Alkaliwerke Westeregeln (1931) 141+151]

The 'Unternehmensgeschichte' section features a table with the following entries:

Zeit	Ereignis
1883	Erichtung einer elektrischen Beleuchtungsanlage mit 100 16kerzigen Glühlampen und 6 Bogenlampen, einer Dampfmaschinenanlage und einem Schuckert-Dynamo
1884	Intze befaßt sich mit dem Behältertyp "Intze II" im Zusammenhang mit dem Wasserturm der Alkaliwerke Westeregeln. Es ist ein 400-cbm-Behälter, der am höchsten Punkt des Werksgebietes, am früheren Standort der Schrader'schen Windmühle, steht. Inbetriebnahme des Wasserwerks: 02. Febr. 1885.
1907-1910	Bau des Kraftwerkes (1907-10)
10.04.1910	Inbetriebnahme des ersten Turbosatzes (AEG, 600 kW, 500 V)

The 'Produkte' section contains a table with one entry:

Produkt	ab	Bem.	bis	Bem.	Kommentar
Braunkohle					

The 'Betriebene Dampfmaschinen' section contains a table with one entry:

Bezeichnung	Bauzeit	Hersteller
Dampfpumpmaschine	1898	Maschinenfabrik Buckau AG

Copyright © Albert Gieseler, Mannheim, Germany 2009

1883: Beleuchtungsanlage mit 100 Stck 16kerzigen Glühlampen und 6 Bogenlampen, eine Dampfmaschinenanlage und einem Schuckert-Dynamo

1898: Dampfpumpmaschine: 1898: Maschinenfabrik Buckau AG

Bau des Kraftwerkes: 1907-1910

10.04.1910: Inbetriebnahme des ersten Turbosatzes: 600 kW, 500 V