

Wirtschaftlichkeit und CO₂-Fußabdruck von Verdunstungs- und Hybridkühlern

Leitfaden zur Berechnung

Inhalt

1	Vorwort und Zielsetzung	4
2	Beteiligte	5
3	Formelzeichen und Begriffe	6
3.1	Formelzeichen	6
3.2	Begriffe	7
4	Erforderliche Angaben durch den Kunden	11
4.1	Rückkühlleistung im Auslegungsfall	11
4.2	Standort	11
4.3	Luftzustand im Auslegungsfall	11
4.3.1	Feuchtkugeltemperatur im Auslegungsfall	11
4.3.2	Lufttemperatur im Auslegungsfall	11
4.3.3	Luftdruck im Auslegungsfall	11
4.4	Betriebsbedingungen	12
4.4.1	Jahresbetriebsstunden	12
4.4.2	Lastprofile	12
4.5	Bewertung der Anschaffungskosten	14
4.5.1	Abschreibungsdauer	14
4.5.2	Zinssatz	14
4.5.3	Bewertung mit Annuitätenfaktoren	14
4.6	Bewertung der Betriebskosten	14
4.6.1	Kosten für Frischwasser	14
4.6.2	Kosten für Abwasser	14
4.6.3	Kosten für Strom	14
4.6.4	Wasserqualität	14
4.7	Sonstige Anforderungen	14
5	Angaben/Berücksichtigung durch den Hersteller	15
5.1	Angaben als Grundlage der Berechnung	15
5.1.1	Anschaffungskosten gemäß Lieferumfang	15
5.1.2	Kosten für Wasseraufbereitung	15
5.2	Bei der Berechnung zu berücksichtigen	15
5.2.1	Eindickungszahl/Überschusswasser	15
5.2.2	Hybridkühler, Umschalttemperatur	15
5.2.3	Energieaufwand der Wasserverteilung	15
5.2.4	Druckverluste in Wärmeübertragern	17
5.2.5	Antriebsenergie für Ventilatoren	17
5.2.6	Wartungskosten	17
6	CO ₂ -Fußabdruck	18
6.1	CO ₂ -Abdruck aus Herstellung	18
6.2	CO ₂ -Abdruck aus Verbräuchen	18
6.2.1	Strom	18
6.2.2	Frischwasser	18
6.2.3	Wasseraufbereitung	18
6.2.4	Abwasserbehandlung	18
7	Erebnisse	19
8	Hinweis	19
9	Schrifttum	20
10	Anhang	21
10.1	Annuitätenfaktoren	21
10.2	Herleitung Feuchtkugeltemperatur ESSER	22
10.3	Vorgaben für Anfrage und Angebot über Rückkühlwerke mit Wirtschaftlichkeitsberechnung in Anlehnung an VDMA 24428	23

1 Vorwort und Zielsetzung

Die Energieeffizienz von eingesetzten Rückkühlwerken ist von steigender Bedeutung. Um bei Investitionen tatsächlich aussagefähige Entscheidungsgrundlagen zu erhalten müssen einheitliche Parameter festgelegt werden.

Dieses VDMA-Positionspapier soll dazu beitragen, dass die Planung, Projektierung und Ausschreibung von Rückkühlwerken nach einheitlichen Parametern berechenbar wird. Damit ist das vorliegende VDMA-Positionspapier für Planer, Anlagenbauer und Betreiber von Rückkühlwerken unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastung ein Leitfaden, aus der Vielfalt der angebotenen Rückkühlsysteme die für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Lösung auszuwählen.

Die an diesem VDMA-Positionspapier beteiligten Hersteller von Rückkühlwerken wollen Transparenz bieten und vorhandene Lücken bei der Planung schließen. Insgesamt hat sich in der Praxis die Vergleichbarkeit von Systemen und Angeboten als komplexes Problem dargestellt. Die Vereinheitlichung der Betrachtung und der Berechnung soll zu aussagefähigen Entscheidungsgrundlagen führen. Kennzahlen werden jedoch keine definiert.

Die Beteiligten sind sich darüber einig, dass dieses VDMA-Positionspapier nicht die Planung und Projektierung der einzelnen Anlagen ersetzen kann. Vielmehr werden Grundlagen der Berechnung zur Darstellung von Lastprofilen beim Einsatz von Rückkühlwerken in der Klimatisierung von Gebäuden und der industriellen Anwendung beschrieben. Darüber hinaus wurden wichtige Begriffe aus der Rückkühltechnik definiert. Der Kunde selbst muss erforderliche Angaben zur Rückkühlleistung im Auslegungsfall und den Betriebsbedingungen nennen. Ergänzt mit den Angaben des Herstellers kann somit eine Bewertung der Anschaffungskosten und Betriebskosten von Rückkühlwerken erarbeitet werden. Als Mindestumfang der Ergebnisse werden die Gesamtkosten, namentlich die Anschaffungskosten, Betriebskosten und Wartungskosten, über den gewählten Nutzungszeitraum berechnet. Darüber hinaus wird der Jahresstromverbrauch, Jahresfrischwasserbedarf und die Jahresabwassermenge abgebildet. Der CO₂ Fußabdruck aus den so genannten drei Verbräuchen wird in Tonnen CO₂-Äquivalent abgebildet. Dieses VDMA-Positionspapier möchte als Handlungsanleitung Planer und Betreiber von Rückkühlwerken in die Lage versetzen aus der Vielfalt der angebotenen Rückkühlsysteme die für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Lösung auswählen zu können. Es ersetzt allerdings nicht die notwendige Planung und Projektierung im Einzelfall sondern soll als Leitfaden die Auswahl von Rückkühlwerken versachlichen. Das hier entstandene VDMA-Positionspapier soll vorhandene Lücken bei Planungshilfen schließen und zu einem besseren Verständnis der Rückkühltechnik führen.

VDMA
Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate
Fachabteilung Rückkühltechnik

Frankfurt am Main, November 2013

2 Beteiligte

Dr.-Ing. Nickolay, Markus KTK Kühlturm Karlsruhe GmbH (Obmann)

Bosche, Lambert SPX Cooling Technologies GmbH

Marmann, Elmar E.W. Gohl GmbH

May, Mathias Balticare GmbH (ausgeschieden)

Moska, Maciej E.W. Gohl GmbH

Rabenstein, Michael EVAPCO Europe GmbH

Stupfel, Elmar GEA Polacell Cooling Tower B.V.

Sturies, Hubert EVAPCO Europe GmbH

Birle, Hans VDMA (ausgeschieden)

Gebhart, Peter VDMA

3 Formelzeichen und Begriffe

3.1 Formelzeichen

Lateinische Symbole

c	[J/(kgK)]	spezifische, isobare Wärmekapazität	
F _a	[-]	Annuitätenfaktor	
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung	g = 9,81 [m/s ²]
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie	
h _s	[m]	Höhe der Wasserverteilung über Wasserstand	
\dot{M}	[kg/s]	Massenstrom	
P	[W]	Leistung	
p	[Pa]	absoluter Druck	
Δp	[Pa]	Druckdifferenz	
Δp _s	[Pa]	Düsenvordruck, Druckabfall an einer Sprühdüse	
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom	
t	[min/a]	zeitliche Häufigkeit	
T	[K]	Temperatur	
\bar{T}_M	[°C]	arithmetischer Mittelwerte der Temperatur des Mediums zwischen Eintritt und Austritt	$\bar{T}_M = (T_{M,E} + T_{M,A})/2$
u	[m/s]	Geschwindigkeit	
\dot{V}	[m ³ /h]	Volumenstrom	
X	[g/kg _{tr}]	Beladung, g Wasserdampf je kg trockene Luft	
z	[m]	Höhe über Normal Null	

Griechische Symbole

ρ	[kg/m ³]	Dichte
---	----------------------	--------

Indizes

Z ₀	Auslegungsfall
Z _A	(am) Austritt
Z _E	(am) Eintritt
Z _{el}	elektrisch
Z _F	Feuchtkugel
Z _M	(zu kühlendes) Medium
Z _m	Mittelwert, beim arithmetischen Mittelwert der Temperatur
Z _L	Luft
Z _U	Umgebung

Einheiten (ohne SI-Basiseinheiten)

a	Jahr	1 a = 8760 h = 31536000 s	Zeit
bar	Druck	1 bar = 10 ⁵ Pa	Druck, Energiedichte
°C	Grad Celsius	0 °C = 273,15 K, 1 °C – 0 °C = 1 K	Temperatur
g	Gramm	1 g = 0,001 kg	Masse
h	Stunden	1 h = 3600 s	Zeit
J	Joule	1 J = 1 Nm = 1 kg×m ² /s ²	Energie

min	Minute	1 min = 3600 s	Zeit
N	Newton	1 N = 1 kg×m/s ²	Kraft
Pa	Pascal	N/m ² = kg/(m×s ²) = J/m ³	Druck, Energiedichte
W	Watt	W=J/s= kg×m ² /s ³	Leistung

3.2 Begriffe

Abwasser

Abwasser bezeichnet das unbehandelte Wasser, welches vom Kühlturm der Abwasserentsorgung zugeführt wird.

Adiabate Kühlung

Adiabate Kühlung beruht auf dem Verdunsten von Wasser in einen Luftstrom, ohne Zufuhr von Wärme. Die zur Verdunstung des Wassers erforderliche Wärme wird dem Luftstrom entnommen. Dieser kühlt sich dadurch ab und wird danach zur Kühlung eines Mediums z. B. unter Verwendung eines Lamellenwärmeübertragers verwendet.

Austrittstemperatur des Mediums

Die Austrittstemperatur des Mediums ist die Temperatur, mit welcher das Medium aus dem Rückkühlwerk austritt.

Eindickungszahl

Die Eindickungszahl ist das Verhältnis zwischen dem Salzgehalt im Kreislaufwasser und dem Salzgehalt im Nachspeisewasser.

Eintrittstemperatur des Mediums

Die Eintrittstemperatur des Mediums ist die Temperatur, mit welcher das Medium in das Rückkühlwerk eintritt.

Externe Druckverluste:

Neben den Druckverlusten auf der Luftseite, sind gegebenenfalls noch Strömungswiderstände zu überwinden, die durch bauseitige Einrichtungen, wie Kanäle und/oder Wetterschutzgitter, usw. hervorgerufen werden. Diese sind durch den Kunden zu benennen.

Feuchtkugeltemperatur (auch Temperatur des feuchten Thermometers)

Die Feuchtkugeltemperatur ist die Beharrungstemperatur des verdunstenden Wassers, das die zur Verdunstung notwendige Verdampfungsenthalpie nur durch einen Wärmestrom aus der angrenzenden Luft bezieht; sie dient in Verbindung mit Druck und Temperatur der Luft zur Bestimmung des Wasserdampfanteils in der Luft (vgl. [1]). Sie ist die niedrigste Kaltwassertemperatur, die sich theoretisch mit einem Verdunstungskühler erreichen lässt.

Frischwasser

Frischwasser bezeichnet das unbehandelte Wasser, welches dem Kühlturm als Ersatz für Abwasser und/oder verdunstetes Wasser zugeführt wird.

Freie Kühlung

Die abzuführende Energie wird ohne Verwendung eines Kälteprozesses und damit nur unter Verwendung von Rückkühlwerken an die Umgebung abgeführt.

Hybridkühlung/Hybridkühler

Als Hybridkühler wird ein Rückkühlwerk bezeichnet, das Kühlleistung soweit es die Umgebungsbedingungen zulassen, auch ohne Verdunstungskühlung zur Verfügung stellt. D.h. es kann zeitweise nur Trockenkühlung, nur Verdunstungskühlung oder eine Kombination aus beidem auftreten, wodurch der Wasserverbrauch gegenüber Systemen mit reiner Verdunstungskühlern deutlich geringer sein kann.

Körperschall

Körperschall ist Schall, der sich in einem festen Medium oder an dessen Oberfläche ausbreitet mit Frequenzen von über rd. 15 Hz, d.h. im Hörbereich (vgl. [6], Seite 187). Bei tieferen Frequenzen spricht man im Allgemeinen von Schwingungen.

Massenstrom des Mediums

Der Massenstrom des Mediums ist der Massenstrom des Mediums am Eintritt in das Rückkühlwerk.

Medium

Das Medium ist die Flüssigkeit, die im Rückkühlwerk abgekühlt wird. Bei offenen Rückkühlwerken ist das Medium Wasser.

Motoren

Elektromotoren werden verwendet um Ventilatoren und Pumpen anzutreiben.

Nachspeisewasser

Dem Kreislaufwasser zum Ausgleich der Verluste zugesetztes Wasser (vgl. [1]).

Nassbetrieb

Der Nassbetrieb ist ein Betriebszustand, bei welchem das Rückkühlwerk eine bestimmte Last mit Hilfe von Verdunsten von Wasser abführt.

Regelung

Eine Regelung besteht aus einer Steuerung und zusätzlich einer Rückkopplung zur Sollwertabfrage, mit dem Ziel einer effektiven Anpassung des Rückkühlwerkes an sich verändernde Last- und Umgebungsluftzustände.

Rückkühlwerk

Ein Rückkühlwerk ist eine Einrichtung zur Kühlung eines Wärmeträgers durch Luft, mit und/oder ohne Verdunstung von Wasser in die gleiche Luft (vgl. [1], 326, hier Kühlturm).

Rückkühlleistung

Die Rückkühlleistung ist die Wärmemenge je Zeiteinheit, die das Rückkühlwerk an die Umgebung abführt.

Schalleistungspegel

Der Schalleistungspegel ist der zehnfache Logarithmus zur Basis von Zehn der gesamten Schalleistung eines Schallstrahler bezogen auf 1 pW (vgl. [6], Seite 331).

Schwaden

Als Kühlturmschwaden bezeichnet man das Luft-Wasserdampf-Gemisch, das von einem Rückkühlwerk emittiert wird. Wenn ein Teil dieses Wasserdampfes zu feinsten Tröpfchen kondensiert, entstehen bei bestimmten Betriebszuständen sichtbare Schwaden (Nebel).

Teillastbetrieb

Kühlturbetrieb mit reduzierter hydraulischer und/oder thermischer Belastung (vgl.[1], 587).

Temperaturspreizung

Die Temperaturspreizung ist die Differenz zwischen der Temperatur des Mediums am Eintritt in das Rückkühlwerk und der Temperatur des Mediums am Austritt aus dem Rückkühlwerk.

Trockenbetrieb

Betriebszustand, bei welchem das Rückkühlwerk eine bestimmte Last ohne Verdunsten von Wasser abführt.

Trockenkühler

Ein Trockenkühler ist eine Einrichtung zur Kühlung eines Wärmeträgers durch Luft, ohne Verdunstung von Wasser.

Umschalttemperatur

Die Umschalttemperatur ist die Lufttemperatur, bis zu welcher das Rückkühlwerk eine bestimmte Last ohne Verdunstungskühlung abführen kann.

Überschusswasser

Überschusswasser ist das Wasser, welches bei Systemen ohne Umlauf, nicht verdunstet und verworfen wird.

Ventilator:

Ein Ventilator ist eine Einrichtung zur Förderung eines Luftstromes unter Verwendung von mechanischer Energie. Bei Rückkühlwerken sind sowohl Radial- als auch Axialventilatoren gebräuchlich (vgl. Abbildung 1 u. Abbildung 2).

Verdunstungskühler

Ein Verdunstungskühler ist eine Einrichtung zur Kühlung eines Wärmeträgers durch Luft, mit Verdunstung von Wasser in die gleiche Luft.

Volllastbetrieb

Volllastbetrieb bezeichnet den Kühlturbetrieb mit maximaler hydraulischer und thermischer Belastung (vgl. [1], 672).

Volumenstrom des Mediums

Der Volumenstrom des Mediums ist der Volumenstrom des Mediums am Eintritt in das Rückkühlwerk. Zusammen mit der Eintrittstemperatur und dem Systemvordruck ist der Massenstrom des Mediums festgelegt:

$$\dot{V}_{M,E} = \frac{\dot{M}_{M,E}}{\rho_{M,E}(\rho_{M,E}, T_{M,E})} \quad (1)$$

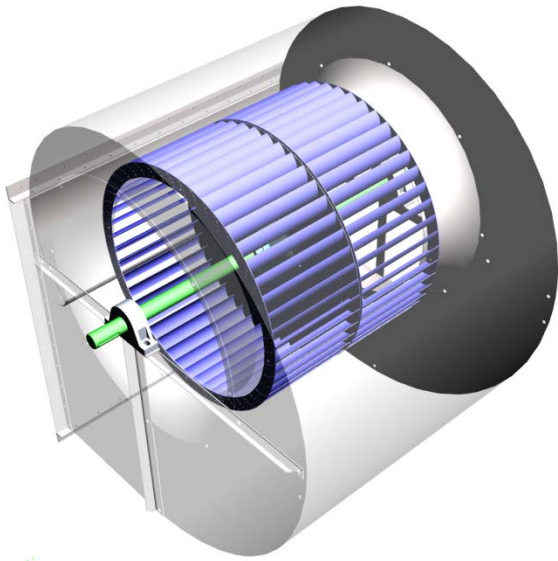


Abbildung 1: Radialventilator

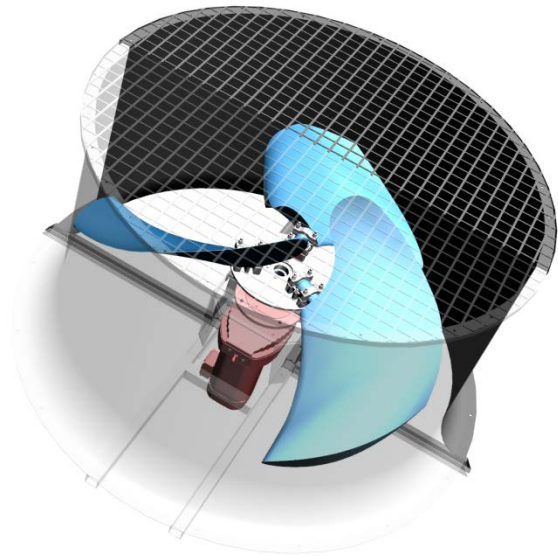


Abbildung 2: Axialventilator

4 Erforderliche Angaben durch den Kunden

4.1 Rückkühlleistung im Auslegungsfall

Zur Festlegung der Rückkühlleistung im Auslegungsfall sind wegen

$$\dot{Q}_0 = \dot{M}_{M,E,0} c_{M,0} (T_{E,0} - T_{A,0}) = \dot{V}_{M,E,0} \rho_{M,E,0} c_{M,m,0} (T_{E,0} - T_{A,0}) \quad (2)$$

vollständige Angaben über

$$\dot{V}_{M,E,0} \quad T_{E,0} \quad T_{A,0} \quad (3)$$

und bei geschlossenen Rückkühlwerken zusätzlich über das zu kühlende Medium zu machen. Bei offenen Kühltürmen wird Wasser als zu kühlendes Medium vorausgesetzt.

4.2 Standort

Aus den Standortangaben muss sich bei Aufstellung innerhalb Deutschlands ein Vergleichsort nach DIN 4710 oder VDI 4710 ermitteln lassen. Bei Aufstellung außerhalb Deutschlands, sind lokale Daten zu verwenden, die soweit verfügbar in Umfang und Qualität der DIN 4710 bzw. der VDI 4710 entsprechen.

4.3 Luftzustand im Auslegungsfall

Zur Definition des Luftzustandes im Auslegungsfall sind Angaben über Feuchtkugeltemperatur, Lufttemperatur und Luftdruck zu machen.

4.3.1 Feuchtkugeltemperatur im Auslegungsfall

Der Kunde definiert die Feuchtkugeltemperatur für welche das Rückkühlwerk ausgelegt werden soll.

Werden keine spezifischen Angaben gemacht, ist auf die aktuell gültigen Fassung der DIN 4710 oder VDI 4710 für Deutschland oder ähnlichen Werken für Standorte außerhalb Deutschlands zurückzugreifen.

4.3.2 Lufttemperatur im Auslegungsfall

Der Kunde definiert die Lufttemperatur für die das Rückkühlwerk ausgelegt werden soll. Werden keine spezifischen Angaben gemacht, ist auf die aktuell gültigen Fassung der DIN 4710 oder VDI 4710 für Deutschland oder ähnlichen Werken für Standorte außerhalb Deutschlands zurückzugreifen.

4.3.3 Luftdruck im Auslegungsfall

Der Luftdruck ist der absolute Druck der Luft im Auslegungspunkt. Er ist vom Standort abhängig. Werden keine spezifischen Angaben gemacht, kann er beispielsweise der aktuell gültigen Fassung der DIN 4710 oder VDI 4710 für Deutschland oder ähnlichen Werken für Standorte außerhalb Deutschlands entnommen werden.

Liegen keine ausreichenden Informationen vor, so wird auf die Internationale Höhenformel

$$p(z) = 1013,25 \left(1 - \frac{0,0065 \cdot z}{288,15} \right)^{5,255} \quad [\text{mbar}] \quad (4)$$

zurückgegriffen.

4.4 Betriebsbedingungen

4.4.1 Jahresbetriebsstunden

Der Kunde gibt an, wie viele Stunden im Jahr das Rückkühlwerk in Betrieb ist. Ein volles Kalenderjahr umfasst dabei per Definition 8760 h.

4.4.2 Lastprofile

Zum Vergleich verschiedener Rückkühlssysteme und Angebote wird die Auswahl eines der nachfolgenden Lastprofile empfohlen:

a) **konstante Last**

Das Profil ist dadurch gekennzeichnet, dass das Rückkühlwerk zeitweise entweder in Betrieb ist oder nicht. Ist das Rückkühlwerk in Betrieb, sind Rückkühlleistung, Massenstrom und Temperaturen des Mediums, gleich dem Auslegungsfall.

b) **Last proportional zur Umgebungstemperatur**

Das Profil ist dadurch gekennzeichnet, dass die geforderte Rückkühlleistung unterhalb einer bestimmten Umgebungstemperatur $T_{U,i}$ konstant ist und von dort linear mit der Umgebungstemperatur ansteigt, so dass bei $T_{U,0}$ die Auslegungsleistung erreicht wird. Der Massenstrom ist der Massenstrom wie im Auslegungspunkt.

Für Bedingungen oberhalb des Auslegungspunktes sollen die Betriebskosten des Rückkühlwerkes gleich der Kosten im Auslegungsfall angesetzt werden. Ein Beispiel kann Abbildung 3 entnommen werden.

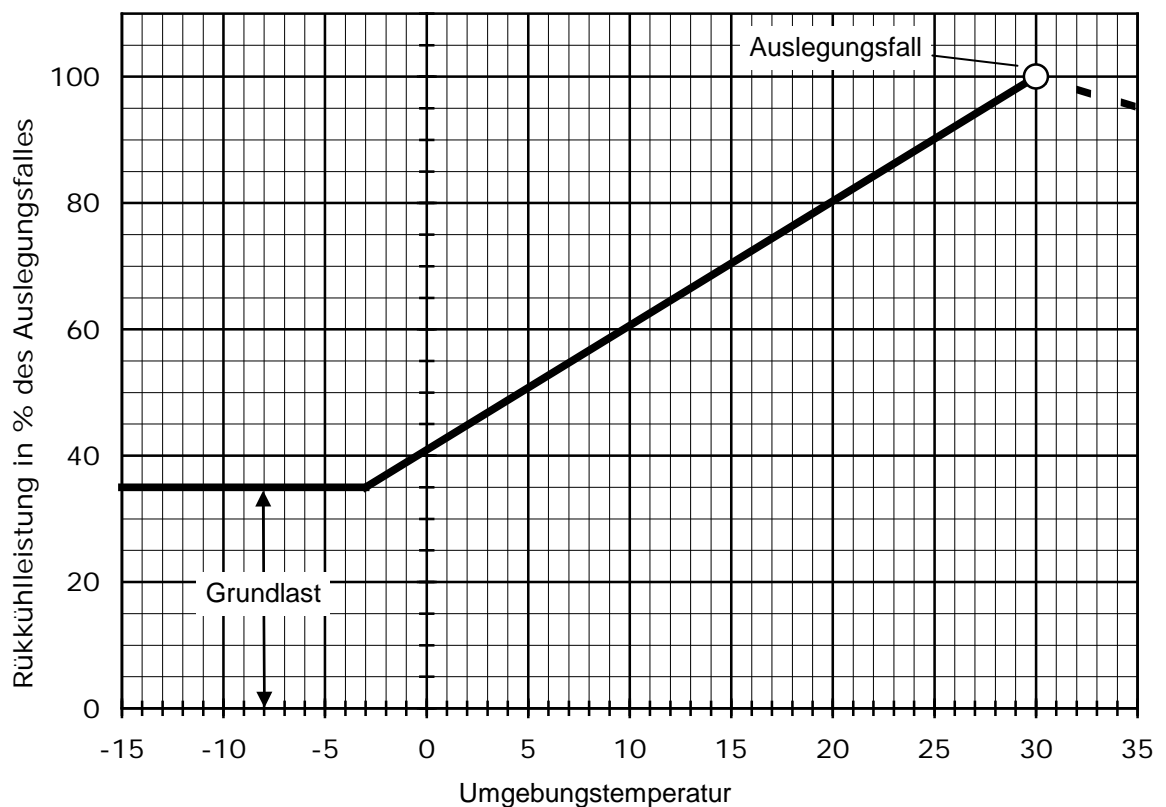


Abbildung 3: Last proportional zur Umgebungstemperatur

c) **Klimaanwendung in Ergänzung des ESEER [2]**

In Ergänzung des „European Seasonal Energy Efficiency Ration“, kurz ESEER, sind bei der Betrachtung dieses Lastprofils folgende Werte zu verwenden:

Tabelle 1: Lastprofil in Anlehnung an ESEER

Teillast bezogen auf den Auslegungsfall	Massenstrom des Mediums bezogen auf den Auslegungsfall	Luftdruck	Umgebungs-lufttemperatur	Feucht-kugel-temperatur	Temperatur des Mediums am Austritt aus dem Rückkühlwerk	Temperatur-spreizung	Gewichtung
%	%	bar	°C	°C	°C	K	%
100	100	0,97	35	19,1	30	ΔT_0	3
75	100	0,97	30	18,6	26	$0,75 * \Delta T_0$	33
50	100	0,97	25	16,9	22	$0,5 * \Delta T_0$	41
25	100	0,97	20	14,8	18	$0,25 * \Delta T_0$	23

d) **Industrielle Anwendung in Ergänzung von VDMA 24247-5 : 2011-05**

In Ergänzung des in VDMA 24247-5 definierten Lastfalles sind bei Betrachtung dieses Lastprofils folgende Werte zu verwenden (vgl. [4]):

Tabelle 2: Lastprofil in Anlehnung an VDMA 24247-5 : 2011-05

Teillast bezogen auf den Auslegungsfall	Massenstrom des Mediums bezogen auf den Auslegungsfall	Luftdruck	Umgebungs-lufttemperatur	Feucht-kugel-temperatur	Temperatur des Mediums am Austritt aus dem Rückkühlwerk	Temperatur-spreizung	Gewichtung
%	%	bar	°C	°C	°C	K	%
100	100	0,97	34	19,5	Kundenan-gabe	ΔT_0	Kundenan-gabe
100	100	0,97	10	8		ΔT_0	
50	100	0,97	10	8		$0,5 * \Delta T_0$	
25	100	0,97	10	8		$0,25 * \Delta T_0$	

4.5 Bewertung der Anschaffungskosten

4.5.1 Abschreibungsdauer

Der Kunde gibt an, über welchen Zeitraum das Rückkühlwerk linear abgeschrieben wird. Liegen keine Angaben vor, würde eine Einordnung nach AfA-Tabelle als Wärmetauscher eine Nutzungsdauer von 15 Jahren ergeben.

4.5.2 Zinssatz

Der Restbuchwert des Rückkühlwerkes verursacht jährlich Kapitalkosten. Liegen keine Angaben des Kunden vor, scheint hierfür aktuell ein Zinssatz von 5 % angebracht.

4.5.3 Bewertung mit Annuitätenfaktoren

Zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Berechnung und um Fehler zu minimieren sind die jährlichen Kapitalkosten in Abhängigkeit von Abschreibungsdauer und Zinssatz mit Hilfe der Annuitätenfaktoren aus Tabelle 3 zu ermitteln. Es gilt

$$\text{jährliche Kapitalkosten} = \text{Annuitätenfaktor} \times \text{Investition} \quad (5)$$

4.6 Bewertung der Betriebskosten

4.6.1 Kosten für Frischwasser

Der Kunde nennt seine Kosten je m³ unbehandeltes Frischwasser.

4.6.2 Kosten für Abwasser

Der Kunde nennt seine Kosten je m³ unbehandeltes Abwasser.

4.6.3 Kosten für Strom

Der Kunde nennt seine Kosten je kWh Strom.

4.6.4 Wasserqualität

Der Kunde nennt die vorliegende Wasserqualität, vorzugsweise in Anlehnung an die VDI 3803. Die Daten werden auch zur Ermittlung der Eindickungszahl herangezogen.

4.7 Sonstige Anforderungen

Weiter sind vom Kunden anzugeben:

- a) maximal zulässiger Schalleistungspegel
- b) maximal zulässige Betriebsmasse
- d) maximal zulässige Abmessungen (Länge, Breite, Höhe)
- d) Aufstellfläche (Länge, Breite)
- e) bauseitige Druckverluste auf der Luftseite
- f) Anforderungen an die Minderung sichtbarer Schwaden
- g) besondere Anforderungen an die Körperschallentkopplung
- h) weitere Angaben zu besonderen Umgebungs- und Aufstelleinflüssen mit Aufstellskizze
- i) Windlasten, Schneelasten, seismische Lasten

5 Angaben/Berücksichtigung durch den Hersteller

5.1 Angaben als Grundlage der Berechnung

5.1.1 Anschaffungskosten gemäß Lieferumfang

Mit der Wirtschaftlichkeitsberechnung soll ein Angebot verbunden sein, welches neben den Anschaffungskosten den Lieferumfang spezifiziert und bauseitig zu erbringende Leistung definiert.

5.1.2 Kosten für Wasseraufbereitung

Der Hersteller gibt an, welche Kosten er für die Wasseraufbereitung zugrunde gelegt hat und welche Maßnahmen dabei einbezogen wurden.

5.2 Bei der Berechnung zu berücksichtigen

5.2.1 Eindickungszahl/Überschusswasser

Der Hersteller gibt an, welche Eindickungszahl er zugrunde gelegt hat. Bei Systemen ohne Umlauf ist anzugeben, wie groß die Überschussmenge ist.

5.2.2 Hybridkühler, Umschalttemperatur

Der Hersteller gibt an, bis zu welcher Umgebungslufttemperatur der Hybridkühler die im Auslegungspunkt geforderte Leistung im Trockenbetrieb erbringt.

5.2.3 Energieaufwand der Wasserverteilung

Jedes Rückkühlwerk, das zu Kühlzwecken Wasser verdunstet, verfügt über ein System zur Verteilung dieses Wassers. Diese Systeme können drucklos arbeiten oder Sprühdüsen mit Vordruck verwenden, wobei es unerheblich ist, ob es sich bei dem Wasser um das zu kühlende Medium selbst oder wie zum Beispiel bei geschlossenen Kühltürmen um so genanntes Sekundärwasser handelt. Unabhängig davon, ob das System drucklos arbeitet oder nicht, muss das Wasser auf eine bestimmte Höhe gefördert werden.

offener Nasskühlturm:

Beim offenen Kühlturm wird vorgeschlagen, die Leistung einer Pumpe, die zur Überwindung des Druckverlustes notwendig ist, mit

$$P_{el} = \frac{\dot{V}(\Delta p_s + \rho g h_s)}{0,7} \quad (6)$$

zu berechnen und dabei die Förderhöhe mit h_s zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 4). Bei drucklosen Wasserverteilung ist $\Delta p_s = 0$.

System mit Sekundärkreislauf:

Bei Systemen mit Sekundärkreislauf wird vorgeschlagen, die Leistung einer Pumpe, die zur Überwindung des Druckverlustes notwendig ist, mit

$$P_{el} = \frac{\dot{V}(\Delta p_s + \rho g h_s)}{0,7} \quad (7)$$

zu berechnen und dabei die Förderhöhe mit h_s zu berücksichtigen (Abbildung 5). Bei drucklosen Wasserverteilung ist $\Delta p_s = 0$.

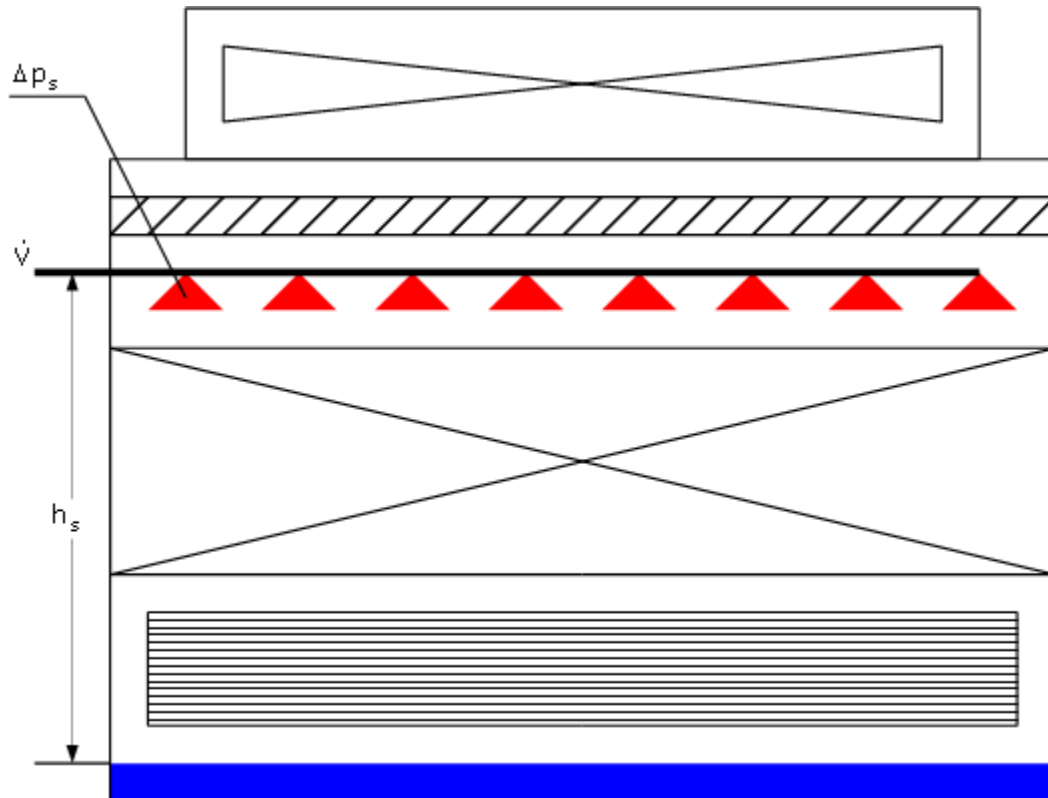


Abbildung 4: Wasserverteilung, offener Kühlturm

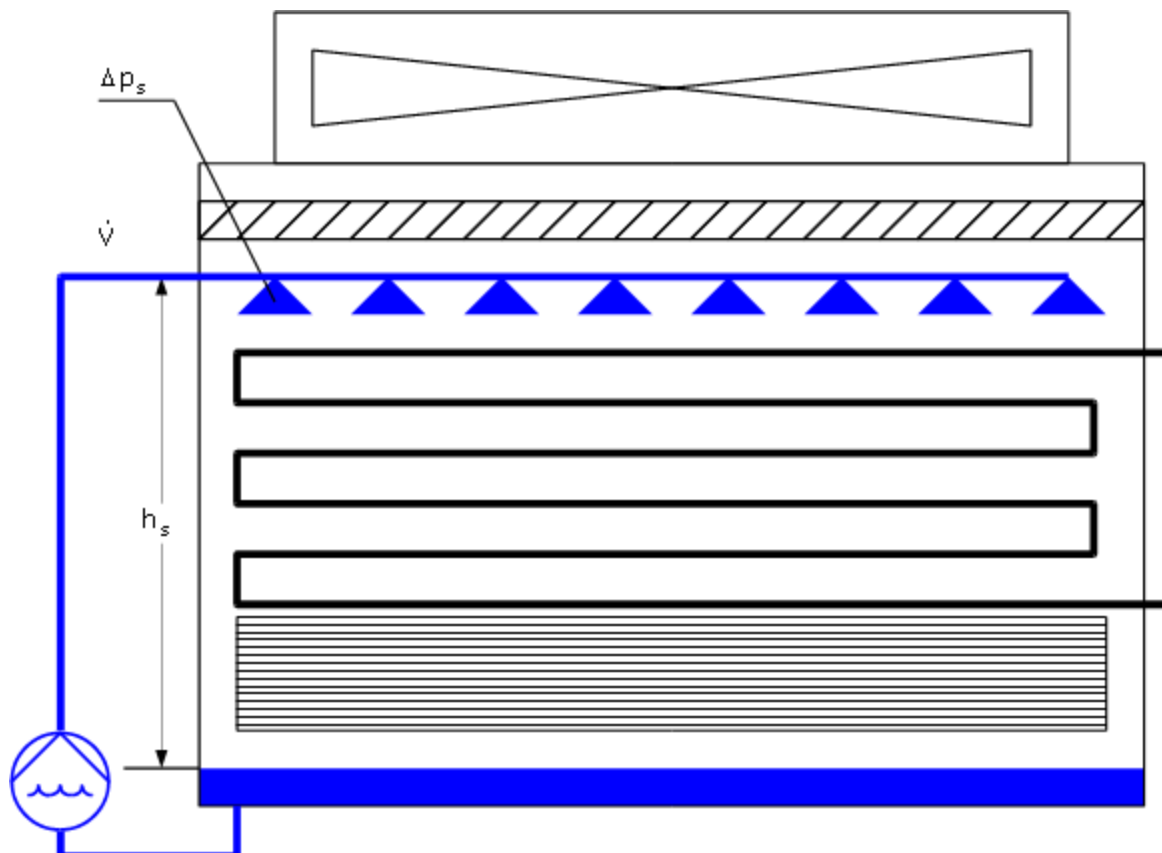


Abbildung 5: Wasserverteilung, System mit Sekundärkreislauf

5.2.4 Druckverluste in Wärmeübertragern

Die Druckverluste im Wärmeübertrager (soweit vorhanden) sollen mit

$$P_{\text{el}} = \frac{\dot{V}\Delta p}{0,7} \quad (8)$$

bewertet werden.

5.2.5 Antriebsenergie für Ventilatoren

Die Antriebsenergie hängt vom jeweils erforderlichen Luftvolumenstrom ab und ergibt sich durch Integration der einzelnen Betriebszustände zusammen mit den jeweiligen Luftzuständen.

Der Zusammenhang zwischen Antriebsleistung und Luftvolumenstrom ist näherungsweise

$$P_{\text{el}} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} \right)^n P_{\text{el},0} \quad (9)$$

$n = 2..3$

5.2.6 Wartungskosten

Vom Hersteller ist ein Jahresbetrag für die periodischen Wartungsaufwendungen nach VDMA 24186-3: 2002-09 anzugeben.

6 CO₂-Fußabdruck

6.1 CO₂-Abdruck aus Herstellung

Rückkühlwerke bestehen im Wesentlichen aus Metallen (Stahl, Edelstahl, Kupfer, Aluminium) und Kunststoffen (Polypropylen, PVC, GFK), Beton, vereinzelt auch Holz. Hinzu kommen Bauteile, die aus einer Vielzahl an Materialien zusammengesetzt sind (Motore, Frequenzumrichter, Pumpen). Die Ermittlung der CO₂-Bilanz aus der Herstellung würde die differenzierte Betrachtung all dieser Komponenten von der Gewinnung der Rohstoffe über deren Transport und Verarbeitung und schließlich aus Entsorgung bedeuten. Gleiches gilt für die Herstellung der Rückkühler selbst und müsste eigentlich auch Emissionen einschließen, die beispielsweise aus dem Arbeitsweg der Mitarbeiter folgen.

Andererseits lässt sich abschätzen, dass die CO₂-Emissionen aus der Herstellung weniger als 1 % der CO₂-Emissionen aus den Verbräuchen, betrachtet über einen Zeitraum von 10 Jahren betragen. Der Aufwand der Ermittlung der CO₂-Emissionen aus der Herstellung scheint damit zurzeit ungerechtfertigt hoch.

Dieses Positionspapier konzentriert sich daher auf die Betriebsphase des Rückkühlwerkes. Vor- und Nachgeschaltete Prozesse bleiben unberücksichtigt.

6.2 CO₂-Abdruck aus Verbräuchen

6.2.1 Strom

Der CO₂-Emissionsfaktor für Strominlandsverbrauch für Deutschland kann beim Umweltbundesamt recherchiert werden. Nach [3] betrug er in 2012 601 g/kWh. Dieser Wert ist jährlich zu überprüfen und anzupassen.

6.2.2 Frischwasser

Nach einer Angabe aus einem Vortrag mit dem Titel „Energieverbrauch und -erzeugung in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft, Nutzung erneuerbarer Energien“ von Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel und Dr.-Ing. Linda Hinken vom 29.11.2006 (vgl. [9]) beträgt der Energieaufwand je m³ Trinkwasser ca. 1 kWh was in diesem Kontext ca. 600 g CO₂/m³ entspricht.

Bei anderen Quellen können diese Werte abweichen.

6.2.3 Wasseraufbereitung

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Methoden zur Wasseraufbereitung und wegen der großen Bandbreite der auftretenden Rohwasserqualitäten, ist es nicht möglich den CO₂-Fußabdruck der Wasseraufbereitung objektiv zu ermitteln.

6.2.4 Abwasserbehandlung

Den Quellen [7] und [8] ist zu entnehmen, dass der Energieverbrauch der kommunalen Klärwerke 2009 ca. 4400 GWh betrug, während von 1998 bis 2007 im Schnitt 9899 Mio. m³ Abwasser behandelt wurden. Dies führt zu einem Durchschnittlichen Aufwand von ca. 0,45 kWh je Kubikmeter Abwasser und entspricht ca. 270 g CO₂ je Kubikmeter.

Grundsätzlich scheint ein energieautarker Betrieb von Kläranlagen möglich (vgl. [5]) so dass diese Werte sporadisch überprüft werden sollten.

Insbesondere bei kleineren Kläranlagen ohne Faulgasverwendung werden aber auch Methan und CO₂ in die Atmosphäre entlassen, wobei aber unklar ist, welchen Anteil das Abwasser aus Rückkühlwerken an diesem Prozess hat.

7 Ergebnisse

Als Mindestumfang der Ergebnisse sind anzugeben

- a) Gesamtkosten über den gewählten Abschreibungszeitraum
- b) Kapitalkosten über den gewählten Abschreibungszeitraum
- c) Betriebskosten über den gewählten Abschreibungszeitraum
- d) Wartungskosten über den gewählten Abschreibungszeitraum
- e) Durchschnittlicher Jahresstromverbrauch
- f) Durchschnittlicher Jahresfrischwasserbedarf
- g) Durchschnittliche Jahresabwassermenge
- h) CO₂-Fußabdruck in Tonnen CO₂-Äquivalent aus e), f) und g) bezogen auf ein Jahr
- i) Jahresrückkühlleistung in MWh

8 Hinweis

Die notwendigen Berechnungen erfordern die Verwendung von Klimadaten. Das Klima ist das über einen längeren Zeitraum gemittelte Wetter. Eine Überprüfung von auf Basis von Klimadaten ermittelten Werten erfordert daher Messungen über den gleichen Zeitraum. Das ist praktisch nicht möglich.

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit ist zudem außerordentlich komplex und basiert dabei auf bewährter Vereinfachung. Es werden zwangsläufig auch Zustände erfasst die am Rande der Gültigkeit dieser Vereinfachungen liegen.

9 Schrifttum

- [1] VDI 2047-1 : 1992-07
Kühltürme, Begriffe und Definitionen
- [2] ESEER, European seasonal energy efficiency ratio
http://www.eurovent-certification.com/en/Certification_Programmes/Programme_Descriptions.php?lg=en&rub=03&srub=01&select_prog=LCP-HP
- [3] Petra Icha: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Mai 2013. Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4488.html> verfügbar.
- [4] VDMA 24247-5 : 2011-05
Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 5: Industriekälte
- [5] Dr.-Ing. P. Hartwig, Dipl.-Ing D. Gerdes, Dipl.-Ing. N. Schrewe: Energieautarker Kläranlagenbetrieb, http://de.dwa.de/tl_files/media/content/PDFs/LV_Nord/Nachbarschaften-Manuskripte/Gerdes-EnergieautarkerKA-Betrieb.pdf vom 23.06.2013
- [6] Helmut Schmidt: Schalltechnisches Taschenbuch, Schweingskompodium, 5. grundlegend neu bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996, ISBN 3-18-401353-7
- [7] Statistik Abwasserentsorgung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Kurzlink: www.bmu.de/N2833
- [8] Klaus Fricke, Fachgebiet III 2.5 - Überwachungsverfahren, ENERGIEEFFIZIENZ KOMMUNALER KLÄRANLAGEN, Umweltbundesamt, Stand Oktober 2009
- [9] Rosenwinkel, K.-H., Hinken, L. (2006): Energieverbrauch und -erzeugung in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft - Nutzung erneuerbarer Energien, Wasserwirtschaft im Wandel in Berlin am 29.11.2006
- [10] Stoffwertberechnung für feuchte Luft als ideales Gemisch realer Fluide, Add-In FluidEXL, Hochschule Zittau/Görlitz - (FH) University of Applied Sciences, Fachbereich Maschinenwesen, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar, Dr.-Ing. I. Stöcker
- [11] VDI 4710 Blatt 3 : 2011-03
Meteorologische Grundlagen für die technische Gebäudeausrüstung - t,x-Korrelationen der Jahre 1991 bis 2005 für 15 Klimazonen in Deutschland
- [12] DIN 4710 : 2003-01
Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland
- [13] VDMA 24428 : 1995-09
Vorgaben für Anfrage und Angebot eines zwangsbelüfteten Naßkühlturms
- [14] VDMA 24186-3: 2002-09
Leistungsprogramm für die Wartung von technischen Anlagen und Ausrüstungen in Gebäuden - Teil 3: Kältetechnische Geräte und Anlagen zu Kühl- und Heizzwecken

10 Anhang

10.1 Annuitätenfaktoren

Tabelle 3: Annuitätenfaktoren F_a

Zinssatz	Abschreibungsdauer in Jahren															
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0,5 %	0,2030	0,1696	0,1457	0,1278	0,1139	0,1028	0,0937	0,0861	0,0796	0,0741	0,0694	0,0652	0,0615	0,0582	0,0553	0,0527
1,0 %	0,2060	0,1725	0,1486	0,1307	0,1167	0,1056	0,0965	0,0888	0,0824	0,0769	0,0721	0,0679	0,0643	0,0610	0,0581	0,0554
1,5 %	0,2091	0,1755	0,1516	0,1336	0,1196	0,1084	0,0993	0,0917	0,0852	0,0797	0,0749	0,0708	0,0671	0,0638	0,0609	0,0582
2,0 %	0,2122	0,1785	0,1545	0,1365	0,1225	0,1113	0,1022	0,0946	0,0881	0,0826	0,0778	0,0737	0,0700	0,0667	0,0638	0,0612
2,5 %	0,2152	0,1815	0,1575	0,1395	0,1255	0,1143	0,1051	0,0975	0,0910	0,0855	0,0808	0,0766	0,0729	0,0697	0,0668	0,0641
3,0 %	0,2184	0,1846	0,1605	0,1425	0,1284	0,1172	0,1081	0,1005	0,0940	0,0885	0,0838	0,0796	0,0760	0,0727	0,0698	0,0672
3,5 %	0,2215	0,1877	0,1635	0,1455	0,1314	0,1202	0,1111	0,1035	0,0971	0,0916	0,0868	0,0827	0,0790	0,0758	0,0729	0,0704
4,0 %	0,2246	0,1908	0,1666	0,1485	0,1345	0,1233	0,1141	0,1066	0,1001	0,0947	0,0899	0,0858	0,0822	0,0790	0,0761	0,0736
4,5 %	0,2278	0,1939	0,1697	0,1516	0,1376	0,1264	0,1172	0,1097	0,1033	0,0978	0,0931	0,0890	0,0854	0,0822	0,0794	0,0769
5,0 %	0,2310	0,1970	0,1728	0,1547	0,1407	0,1295	0,1204	0,1128	0,1065	0,1010	0,0963	0,0923	0,0887	0,0855	0,0827	0,0802
5,5 %	0,2342	0,2002	0,1760	0,1579	0,1438	0,1327	0,1236	0,1160	0,1097	0,1043	0,0996	0,0956	0,0920	0,0889	0,0862	0,0837
6,0 %	0,2374	0,2034	0,1791	0,1610	0,1470	0,1359	0,1268	0,1193	0,1130	0,1076	0,1030	0,0990	0,0954	0,0924	0,0896	0,0872
6,5 %	0,2406	0,2066	0,1823	0,1642	0,1502	0,1391	0,1301	0,1226	0,1163	0,1109	0,1064	0,1024	0,0989	0,0959	0,0932	0,0908
7,0 %	0,2439	0,2098	0,1856	0,1675	0,1535	0,1424	0,1334	0,1259	0,1197	0,1143	0,1098	0,1059	0,1024	0,0994	0,0968	0,0944
7,5 %	0,2472	0,2130	0,1888	0,1707	0,1568	0,1457	0,1367	0,1293	0,1231	0,1178	0,1133	0,1094	0,1060	0,1030	0,1004	0,0981
8,0 %	0,2505	0,2163	0,1921	0,1740	0,1601	0,1490	0,1401	0,1327	0,1265	0,1213	0,1168	0,1130	0,1096	0,1067	0,1041	0,1019
8,5 %	0,2538	0,2196	0,1954	0,1773	0,1634	0,1524	0,1435	0,1362	0,1300	0,1248	0,1204	0,1166	0,1133	0,1104	0,1079	0,1057
9,0 %	0,2571	0,2229	0,1987	0,1807	0,1668	0,1558	0,1469	0,1397	0,1336	0,1284	0,1241	0,1203	0,1170	0,1142	0,1117	0,1095
9,5 %	0,2604	0,2263	0,2020	0,1840	0,1702	0,1593	0,1504	0,1432	0,1372	0,1321	0,1277	0,1240	0,1208	0,1180	0,1156	0,1135
10 %	0,2638	0,2296	0,2054	0,1874	0,1736	0,1627	0,1540	0,1468	0,1408	0,1357	0,1315	0,1278	0,1247	0,1219	0,1195	0,1175

10.2 Herleitung Feuchtkugeltemperatur ESEER

Die zu einem Luftzustand gehörende Feuchtkugeltemperatur lässt sich als eine Funktion des Druckes, der Temperatur und der spezifischen Enthalpie

$$T_F = T_F(p, T, h) \quad (10)$$

ausdrücken. Entsprechend kann eine mittlere Feuchtkugeltemperatur zu einer Temperatur als

$$\bar{T}_F = T_F(\bar{p}, T, \bar{h}) \quad (11)$$

definiert werden.

Unter Verwendung der VDI 4710 Blatt 3, folgt die mittlere Enthalpie dann aus

$$\bar{h}_T = \frac{\sum_{i=1}^{15} \left(\sum_{x=0}^{19} (h(p_i, T, x) \times t_{i,x,T}) \right)}{\sum_{i=1}^{15} \left(\sum_{x=0}^{19} (t_{i,x,T}) \right)}, \quad (12)$$

wobei i der Index für den Referenzort der VDI 4710 Blatt 3 ist und x den Zahlenwert der Wasserdampfbeladung in g Wasserdampf je kg trockener Luft angibt. Der Druck p_i ist der mittlere Luftdruck in Stationshöhe am Referenzort i .

Der mittlere Druck folgt analog aus

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{15} (p_i)}{15}. \quad (13)$$

Er beträgt im Rahmen der VDI 4710 0,97 [bar]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

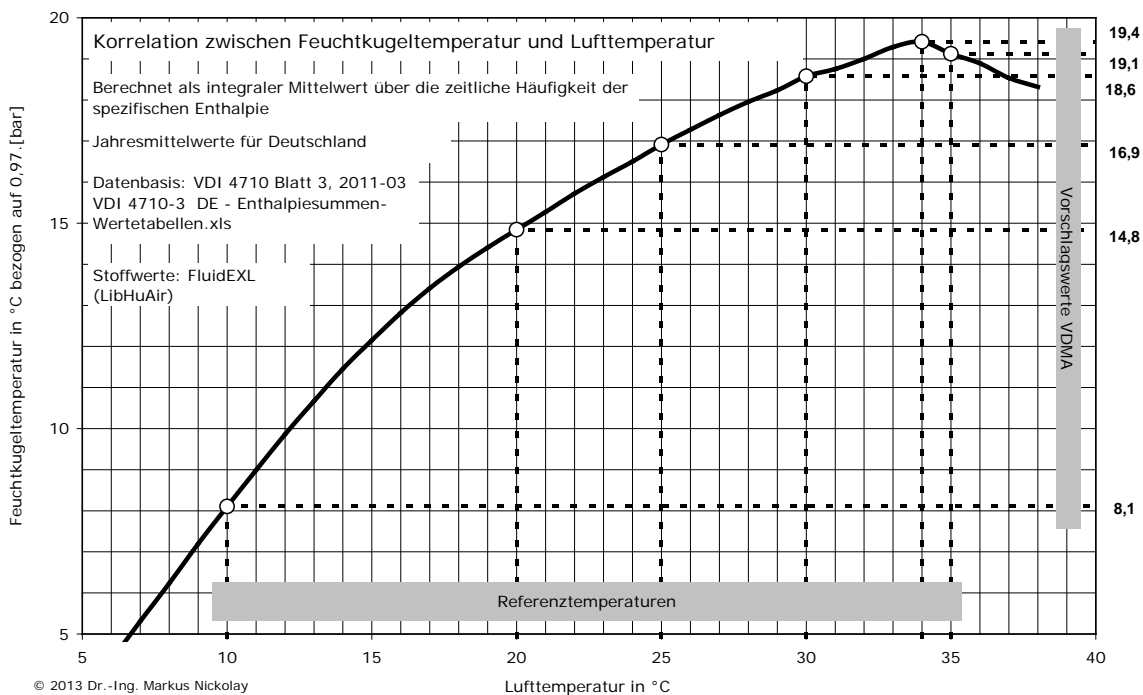


Abbildung 6: Korrelation zwischen Feuchtkugeltemperatur und Lufttemperatur

10.3 Vorgaben für Anfrage und Angebot über Rückkühlwerke mit Wirtschaftlichkeitsberechnung in Anlehnung an VDMA 24428

Firma/Abteilung:		Branche	
Anfrage Nr.:		Stichwort	
Bearbeiter		Telefon	
(Budget-)Angebot		Email	
Standort			

Angaben durch den Kunden			
zu kühlendes Medium			
Volumenstrom am Eintritt	$\dot{V}_{M,E,0}$	m ³ /h	
Eintrittstemperatur	$T_{E,0}$	°C	
Austrittstemperatur	$T_{A,0}$	°C	
Standort (geographisch)			
Aufstellungshöhe über N.N.	h	m	
Feuchtkugeltemperatur	T_F	°C	
Lufttemperatur	T_L	°C	
Luftdruck	p_L	mbar	
Jahresbetriebsstunden		h/a	
Lastprofil nach 4.4		--	
ergänzende Angaben zum Lastprofil			
Abschreibungsdauer		Jahre	
und Zinssatz		%	
oder			
Annuitätenfaktor nach Tabelle 3	F_A	--	
Kosten für Frischwasser		€/m ³	
Kosten für Abwasser		€/m ³	
Kosten für Strom		€/MWh	
Angaben zur Frischwasserqualität			
zulässiger Schalleistungspegel		dB(A)	
maximales Betriebsgewicht des Rückkühlwerkes		kg	
maximale Länge		m	
maximale Höhe		m	
maximale Breite		m	
Aufstellfläche Länge		m	

Aufstellfläche Breite		m	
Minderung sichtbarer Schwaden		ja/nein	
Körperschallentkopplung		ja/nein	
weitere Angaben zu besonderen Umgebungs- und Aufstellbedingungen			
Angaben durch den Lieferanten			
zugrunde gelegte Eindickungszahl			
Gesamtkosten über den gewählten Abschreibungszeitraum		€	
Kapitalkosten über den gewählten Abschreibungszeitraum		€	
Betriebskosten über den gewählten Abschreibungszeitraum		€	
Wartungskosten über den gewählten Abschreibungszeitraum		€	
Durchschnittlicher Jahresstromverbrauch		kWh	
Durchschnittlicher Jahresfrischwasserbedarf		m ³	
Durchschnittliche Jahresabwassermenge		m ³	
CO ₂ -Fußabdruck		t/a	
Jahresrückkühlleistung		MWh	

VDMA

Verfahrenstechnische
Maschinen und Apparate

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1432

Fax +49 69 6603-1421

E-Mail vtma@vdma.org

Internet www.vdma.org/verfahrenstechnik