

Technisch wirtschaftlicher Vergleich

Luftgekühlte Rückkühlsysteme

Gert Dierks, Trimbach (Schweiz)

zum Autor

Dipl.-Ing.
Gert Dierks,
Geschäftsführer
der Firma Jäggi/
Güntner
(Schweiz) AG,
Trimbach



Die nachfolgende Untersuchung wird anhand eines konkreten Falls dargestellt, wobei Preise und technische Produktdaten auf realen Anfragen beruhen. Der Autor ist um objektive Bewertung bemüht, der Leser möge aber selbst urteilen.

Aufgabenstellung

In einer kältetechnischen Anlage im Stadtzentrum von Frankfurt ist vom Verflüssiger eine Wärmemenge von 630 kW abzuführen. Um die Kälteanlage klein zu halten, entscheidet man sich für ein tiefes Temperaturniveau des Kühlmediums, wo-

bei die Wärme an die Umgebungsluft abgeführt werden soll. Die Kühlmediumtemperatur (Wasser oder Wasser/Glykol-Gemisch, 70/30 %) wird mit $T_{\text{ein}} = 30\text{ °C}$ und $T_{\text{aus}} = 26\text{ °C}$ projektiert. Der Auslegungseintrittsluftzustand wird mit $32\text{ °C}/38\text{ % r. F.}$ festgelegt. Der zulässige Schalleistungspegel der gesamten Anlage soll 82 dB(A) nicht überschreiten.

Lösungsmöglichkeiten

Für die Rückkühlanlage stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:
- der offene Verdunstungskühler

Für die Wärmeabfuhr aus kältetechnischen Anlagen stehen verschiedene luftgekühlte, zwangsbelüftete Rückkühlsysteme zur Verfügung. Die Auswahl des Systems ist oft von kurzfristigem Kostendenken geprägt, was in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht aber nicht immer der optimalen Lösung entspricht. Erst die genauere Kenntnis der verschiedenen Systeme und eine ganzheitliche Betrachtungsweise ermöglichen die optimale Wahl für den einzelnen Fall.

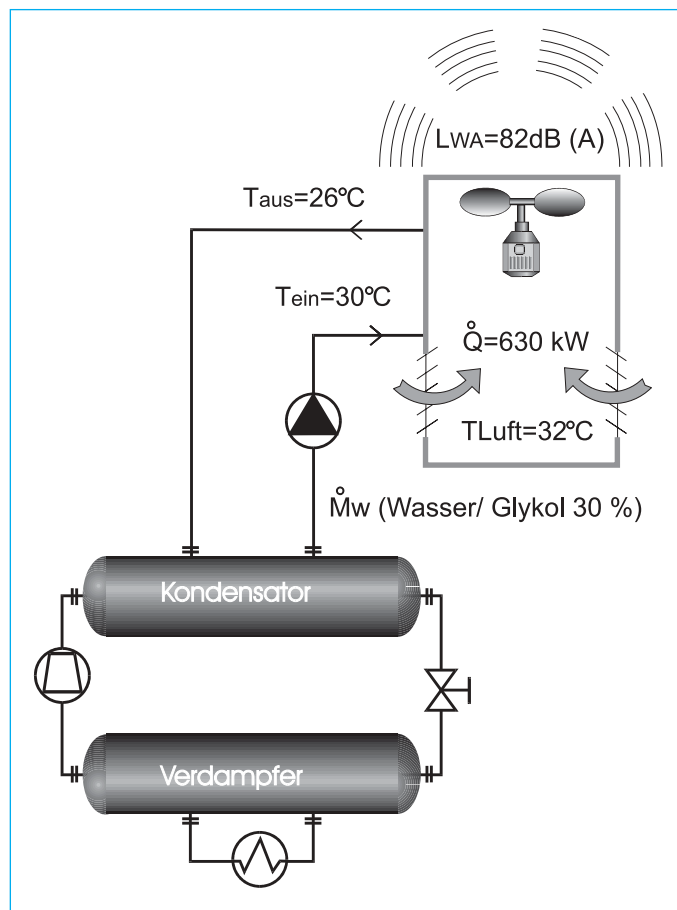


Bild 1 Anlagenschema

- der offene Verdunstungskühler mit Zwischenwärmetauscher,
- der geschlossene Verdunstungskühler,
- der Trockenrückkühler,
- der Trockenrückkühler mit Besprühung gegen den Luftstrom,
- der Trockenrückkühler mit Besprühung in Richtung des Luftstroms und
- der Hybride Trockenrückkühler

Beschreibung der verschiedenen Systeme

Der offene Verdunstungskühler

Der offene Verdunstungskühler, auch einfach als Kühlturm bezeichnet, besteht aus einem Gehäuse, in dem eine großflächige Packung untergebracht ist. Über dieser Packung ist ein Düsenstock angeordnet, mit dem das zu kühlende Wasser über der Packung versprüht wird. Indem das Wasser durch die Packung rieselt, wird mittels Ventilator im Gegen- oder Querstrom Luft durch die Packung gesaugt und gedrückt, wobei eine der Leistung entsprechende Wassermenge verdunstet und die verbleibende Wassermenge abgekühlt in eine unter dem Gehäuse angeordnete Sammelwanne zurückläuft. Von dort aus wird das Wasser wieder dem Kühlprozeß zugeführt.

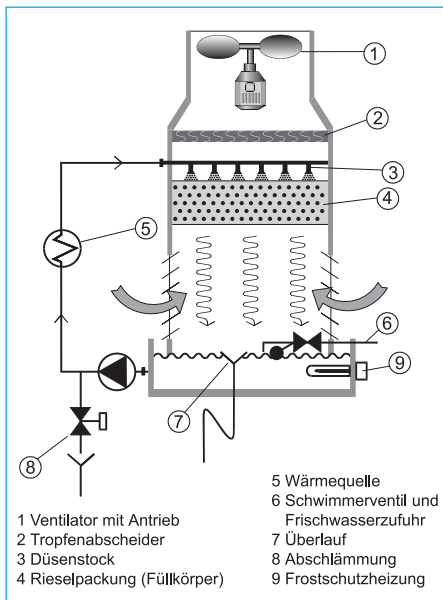


Bild 2 Offener Kühlturm

Das verdunstete Wasser wird ständig ersetzt. Ferner erfolgt durch die Verdunstung eine Aufsatzung (Eindickung, Anreicherung von Mineralien), so daß durch das sogenannte Abschlämmen das Kühlwasser bis zu einem gewissen Grad periodisch erneuert werden muß. Mit dem Kühlturm ist es problemlos möglich, das Wasser

unter die Umgebungslufttemperatur abzukühlen. Maßgebend für den Grad der Abkühlung ist die Feuchtkugeltemperatur. Die Differenz zwischen Wasseraustrittstemperatur und Feuchtkugeltemperatur wird Kühlgrenzabstand genannt. Ein Kühlgrenzabstand von 4 °C läßt sich mit einem Verdunstungskühler noch wirtschaftlich realisieren.

Der offene Verdunstungskühler mit Zwischenwärmetauscher

Bei diesem System wird dem Kühlturm wie zuvor beschrieben, ein Wärmeaustauscher vorgeschaltet. Durch diese Schaltung werden verschiedene Nachteile des offenen Systems eliminiert, dafür sind andere in Kauf zu nehmen.

Man kann dieses System als geschlossenes betrachten, weil das Kühlwasser mit der Luft nicht mehr in Berührung kommt. Der Kühlturm wird aber in diesem Fall viel größer, weil durch den Zwischenwärmetauscher das Kühlturmwasser (Sekundärkreis) stärker abgekühlt werden muß, um im Primärkreislauf die gewünschten Temperaturen erreichen zu können. Außerdem entstehen zusätzliche, erhebliche Kosten für den Zwischenwärmetauscher, weil dieser infolge der kleinen Grätigkeit groß wird, auch wenn dieser zweckmäßigerweise meist als kompakter Plattenwärmetauscher ausgeführt wird.

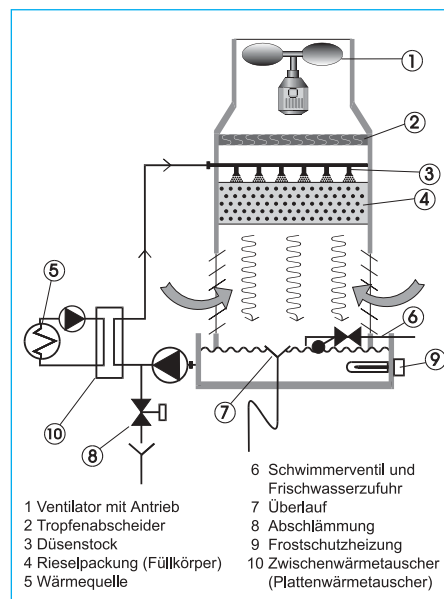


Bild 3 Offener Kühlturm mit Zwischenwärmetauscher

Der geschlossene Verdunstungskühler

Der geschlossene Verdunstungskühlturm ist im Prinzip aufgebaut wie der offene Kühlturm. Jedoch ist anstelle der Packung ein Glattrohrbündel angeordnet, durch welches das zu kühlende Medium fließt. Demzufolge kommt das zu kühlende Medium nicht mit der Atmosphäre in Berührung. Das Wasser aus dem Sammelbecken wird mittels Umlaufsystem und Düsenstock über dem Rohrbündel versprüht. Durch die Verdunstung auf der Rohroberfläche erfolgt die Kühlung. Auch hier wird das verdunstete Wasser ständig ersetzt und der Kreislaufinhalt nach einer gewissen Eindickung erneuert.

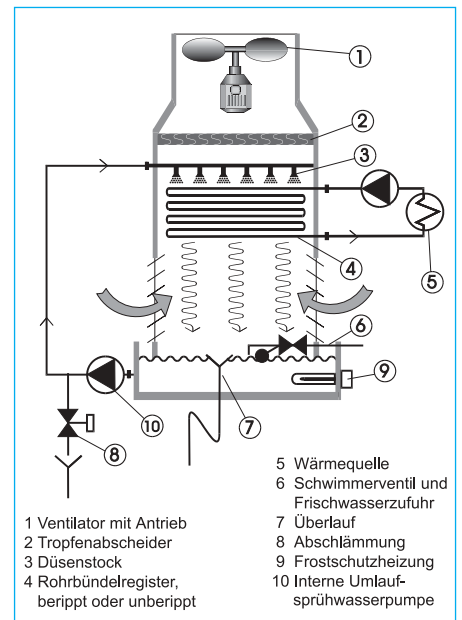


Bild 4 Geschlossener Kühlturm

Der Trockenrückkühler

Der Trockenrückkühler besteht im wesentlichen aus einem Lamellenwärmetauscher, welcher über oder unter einem Luftkasten angeordnet ist. Am Luftkasten sind Ventilatoren angeordnet, welche die Kühlluft durch den Lamellenwärmetauscher ziehen oder drücken. Das abzukühlende Medium strömt dabei durch die Lamellenwärmetauscher, wobei die Luft die Wärme des Mediums aufnimmt. Mit dem Trockenrückkühler ist es nicht möglich, das Medium unter die Umgebungslufttemperatur abzukühlen. Der Kühlgrenzabstand ist in diesem Fall die Differenz zwischen Mediaustrittstemperatur und Lufttemperatur. Für Trockenrückkühler gilt ein Kühlgrenzabstand von 7-8 °C noch als wirtschaftlich.

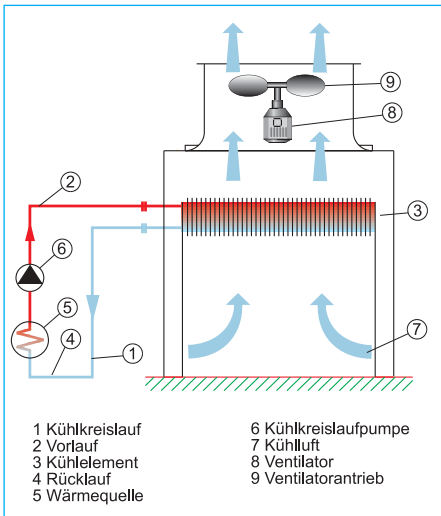


Bild 5 Trockenrückkühler

Der Trockenrückkühler mit Besprühung in Luftrichtung

Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Trockenrückkühler wie oben beschrieben, jedoch zusätzlich ausgerüstet mit einem Düsenstock, welcher unter dem Lamellenwärmetauscher angeordnet ist. Bei Bedarf wird das Wasser in Luftrichtung versprüht, wobei es teilweise die Lamellenoberfläche nässt. Dadurch tritt ein Verdunstungseffekt auf, der eine Abkühlung unter die Umgebungslufttemperatur ermöglicht.

Ein derartiger Einsatz des Trockenrückkühlers ist aus verschiedenen Gründen nicht unproblematisch. Die Besprühung sollte deshalb nur für Notfälle eingesetzt werden, d. h. zum Beispiel, wenn der Kühler für eine Lufttemperatur von 35 °C ausgelegt ist und dieser Wert für nur wenige Stunden im Jahr überschritten wird.

Trockenrückkühler sind grundsätzlich für eine trockene Betriebsweise konzipiert. Bei häufiger Anwendung der Besprühung kann dies zu schweren Korrosionsschäden und Kalkablagerungen führen, insbesondere am Wärmetauscherpaket. Außerdem ist der Wasserverbrauch hoch und es darf nur teilenthärtetes Wasser verwendet werden.

Der Trockenrückkühler mit Besprühung gegen den Luftstrom

Auch hier kommt der Trockenrückkühler mit Düsenstock wie zuvor beschrieben zur Anwendung. Die Düsen sind jedoch gegen den Luftstrom gerichtet und versprühen das Wasser in sehr feinen Tropfen als Aerosole. Ein Teil der feinen Tropfen löst sich in der Luft und sättigt diese fast, wobei eine Absenkung der Temperatur erreicht wird, annähernd die Feuchtkugeltemperatur. Dieser Vorgang wird (fälschlicherweise) auch als adiabate Kühlung bezeichnet. Mit der abgesenkten Lufttrittstemperatur kann dann das Medium unter die Lufttemperatur gekühlt werden.

Aus gleichen Gründen wie hiervoor beschrieben, sollte die Besprühung nur für Notfälle eingesetzt werden. Hinzu kommt, daß das Wasser unter hohem Druck versprüht werden muß, um ein feines Tropfenspektrum zu erreichen. Dies erfordert sehr sauberes, gefiltertes und aufbereitetes Wasser.

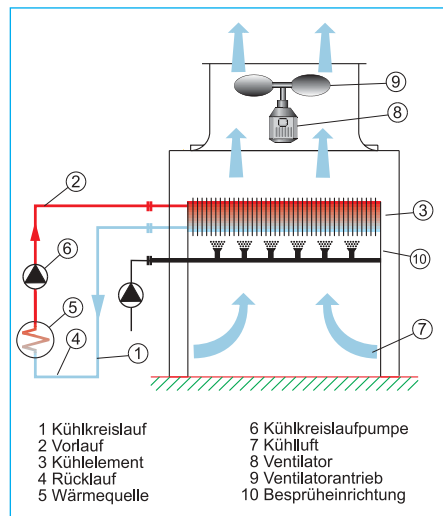


Bild 6 Trockenkühler mit Besprühung in Luftrichtung

Der Hybride Trockenkühler

Der nachfolgend beschriebene und patentierte Rückkühler ist in seiner Bauart noch relativ unbekannt, obwohl er bereits seit 1986 auf dem Markt ist und inzwischen eine stattliche Anzahl Anlagen hiervon in Betrieb sind.

Es handelt sich hier um einen eigentlichen Hightech-Rückkühler, der die Vorteile des geschlossenen Verdunstungskühlers und des Trockenrückkühlers vereinigt, ohne die Nachteile zu übernehmen. Die Möglichkeiten der modernen Antriebs- Meß- und Steuerungstechnik werden dabei voll ausgeschöpft. Der Kühler kann

trocken oder naß gefahren werden, weshalb eine Abkühlung des Mediums unter die Umgebungslufttemperatur ohne weiteres möglich ist. Zwei mit einem speziell versehenen Korrosionsschutz behandelte Lamellenwärmetauscherblöcke sind V-förmig in einem Gestell angeordnet. Die zu meist extrem leisen Ventilatoren sind saugend über den Wärmetauschern angeordnet. Ein Wasserverteilsystem oberhalb der Wärmetauscherblöcke ermöglicht die absolut gleichmäßige und vollständige Wasserbenetzung der Wärmetauscherober-

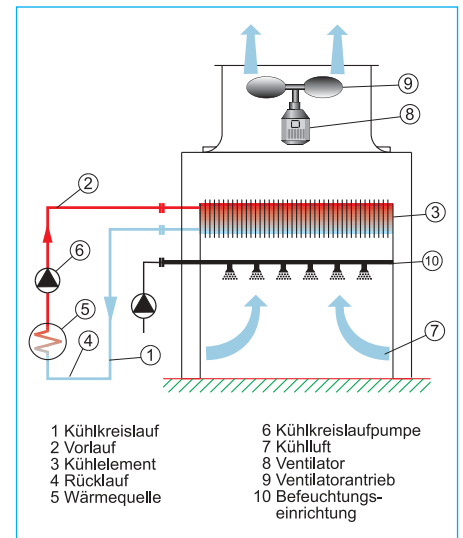
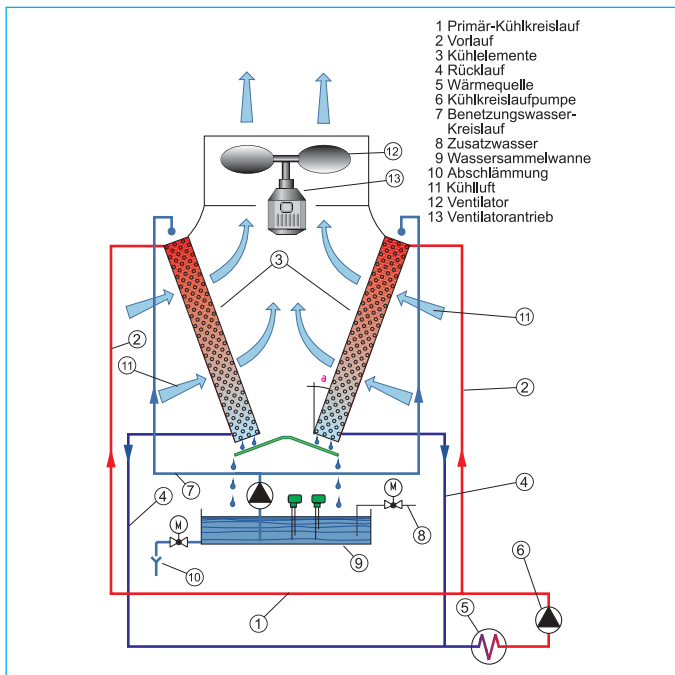


Bild 7 Trockenkühler mit Besprühung gegen den Luftstrom

fläche. Das überschüssige Wasser wird in einer Wanne unterhalb der Wärmetauscher aufgefangen und im Kreislauf wieder für die Benetzung verwendet, bis infolge Eindickung das Benetzungswasser erneuert werden muß.

Infolge seiner Funktionsweise und Ausführung hat der hybride Trockenkühler einen extrem geringen Wasser- und Energieverbrauch. Er zeichnet sich durch Schwadenfreiheit aus und kann als äußerst leises Gerät ausgeführt werden. Der durch aufwendigen Korrosionsschutz und modernste Technik bedingte relativ hohe Preis gegenüber anderen Systemen wird oft in sehr kurzer Zeit amortisiert, wie die nachfolgende Untersuchung zeigen wird.

Bild 8 Hybrider Trockenkühler



oder mit anderen Worten: Die technische Wertigkeit ist eine Verhältniszahl, die angibt, wie gut die technische Lösung im Verhältnis zur idealen Lösung ist. Demnach ist die technische Wertigkeit der idealen Lösung $w_{Ti} = 1$.

Für die Bewertung wurde folgendes Punktesystem gewählt:

- 0 unbrauchbar
- 1 mangelhaft
- 2 schwach
- 3 tragbar
- 4 ausreichend
- 5 befriedigend
- 6 gute Lösung, geringe Mängel
- 7 gute Lösung
- 8 sehr gute Lösung
- 9 Zielvorstellung übererfüllt
- 10 Ideallösung

Definition der wirtschaftlichen Wertigkeit

Die wirtschaftliche Wertigkeit ist das Verhältnis der Kosten einer wirtschaftlich Ideallösung zu den ermittelten Kosten der zu bewertenden Lösung.

Als Gleichung:

$$w_w = K_j / K \text{ wobei } K_j = 0,8 \times K_{zul} \text{ ist}$$

w_w = wirtschaftliche Wertigkeit
 K_i = Kosten der wirtschaftlichen Ideallösung

K_{zul} = zulässige Kosten
 K = Kosten der Lösungsvariante

oder mit anderen Worten: Die wirtschaftliche Wertigkeit w_w ist eine Verhältnis-

Auswahl der Systeme

Um den Untersuchungsaufwand in Grenzen zu halten und auf Grund der technischen Gegebenheiten wird eine erste Auswahl getroffen für die Systeme, welche einer genaueren Prüfung unterzogen werden sollen. In Betracht kommen 1. der offene Verdunstungskühler, 2. der geschlossene Verdunstungskühler, 3. der Trockenkühler mit Besprühung gegen den Luftstrom und 4. der hybride Trockenrückkühler.

Der Verdunstungskühler mit Zwischenwärmetauscher entfällt, weil durch den kleinen Kühlgrenzabstand infolge des Zwischenwärmetauschers eine unwirtschaftliche Größenordnung abzusehen ist. Der Trockenkühler entfällt, weil mit diesem Gerät die gewünschte Mediaustrittstemperatur T_{w2} nicht erreichbar ist. Der Trockenkühler mit Besprühung in Luft- richtung wird fallen gelassen, weil über einen längeren Zeitraum gesehen, Korrosionsprobleme am Lamellenwärmetauscher befürchtet werden müssen.

Die Bewertung erfolgt nach technisch, wirtschaftlichen Kriterien auf Grund vorliegender Offerten. Die Bewertungsmethode wurde von Kesselring entwickelt und wird in der VDI-Richtlinie 2225 beschrieben. Sie erlaubt eine weitgehend objektive Bewertung verschiedener Lösungen.

Definition der technischen Wertigkeit

Technische Wertigkeit = technischer Erfüllungsgrad einer Lösung dividiert durch den technischen Erfüllungsgrad einer idealen Lösung.

Als Gleichung:

$$w_T = p / p_{max}$$

w_T = technische Wertigkeit
 p = Punktzahl der zu vergleichenden Lösung
 p_{max} = Punktzahl der Ideallösung

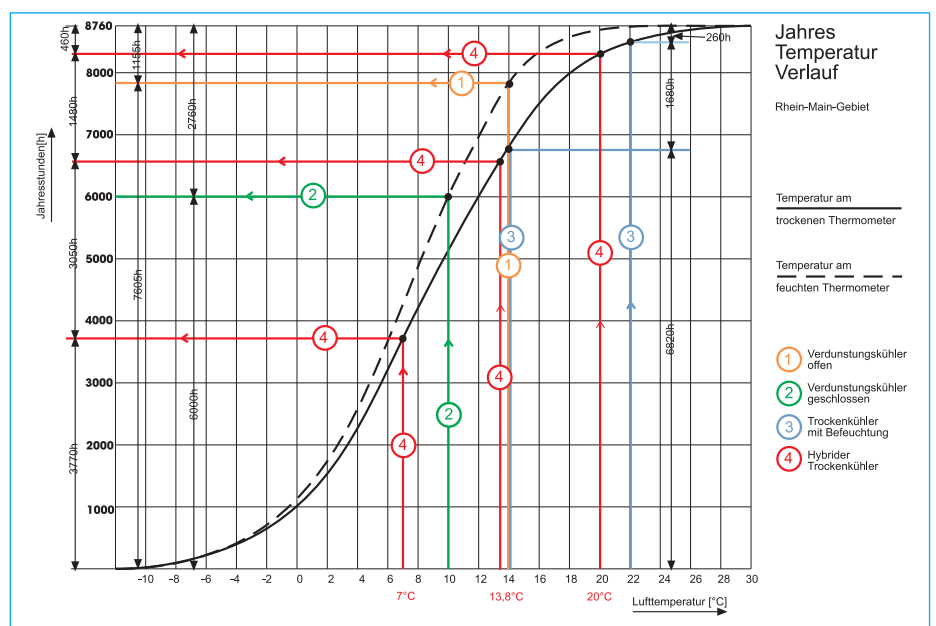


Bild 9 Jahrestemperaturverlauf Rhein-Maingebiet

Luftzustandsbereich		Kühler-	Ventilator	Leistungsbedarf
von	bis	fahrweise	Drehzahl	Ventilatoren/ Pumpe
Feuchtkugeltemperatur				
<<14°C		nass	2/3	1.1 kW
14°C	21°C	nass	3/3	3.5 kW

Tabelle 1 Betriebspunkte Verdunstungskühler offen

Luftzustandsbereich		Betriebs-	Frisch-	Ab-	Strom-
von	bis	Stunden	Wasser	Wasser	verbrauch
Feuchtkugeltemperatur		pro Jahr	m ³ /Jahr	m ³ /Jahr	kWh
<<14°C		7605			8365
14°C	21°C	1155			4042
total		8760	7885	7885	12407

Tabelle 2 Betriebsdaten Verdunstungskühler offen

zahl, die angibt, wie gut die wirtschaftliche Lösung ist im Vergleich zu einer wirtschaftlichen Ideallösung. Demnach ist die Wertigkeit der wirtschaftlichen Ideallösung $w_{wi} = 1$.

Für die wirtschaftliche Bewertung werden in diesem Fall die Jahreskosten der verschiedenen Lösungen herangezogen.

Die Ergebnisse der technischen und wirtschaftlichen Bewertung werden im Koordinatensystem, dem sogenannten S-Diagramm (siehe Bild 10) übersichtlich dargestellt, indem die technische Wertigkeit w_T auf der Abszisse und die wirtschaftliche Wertigkeit w_w auf der Ordinate abgetragen wird.

Beschreibung der ausgewählten Lösungen

Nachfolgend werden die ausgewählten Varianten kurz beschrieben. Für die Bestimmung der Betriebsstunden für die Befeuchtung beim Trockenrückkühler, die Benetzung des hybriden Trockenrückkühlers und der Umschaltpunkte der Ventilatorantriebe von der kleinen Drehzahl auf die höhere, wird die Jahres-Temperaturverlaufskurve (Lorenzkurve) für das Rhein-Main-Gebiet verwendet.

Der offene Verdunstungskühler

Für die gestellte, thermische Aufgabe wurde ein Kreuzstrom-Kühlturm gewählt. Seine Vorteile liegen insbesondere im geringen Energiebedarf, weshalb sich die akustischen Anforderungen ohne Schalldämpfer realisieren ließen. Als Ventilatorantrieb wurde ein zweistufiger, polumschaltbarer Elektromotor gewählt. Das Gerät ist komplett montiert und die Lebensdauer wurde mit 20 Jahren angegeben. Weitere technische Daten gehen aus

den Tabellen 1 und 2 sowie aus den Tabellen der technischen und wirtschaftlichen Bewertung (Tabellen 9 und 10) hervor.

Der geschlossene Verdunstungskühler

Der geschlossene Verdunstungskühler ist mit einem Radialventilator ausgerüstet. Die akustischen Anforderungen machten

Luftzustandsbereich		Kühler-	Ventilator	Leistungsbedarf
von	bis	fahrweise	Drehzahl	Ventilatoren/ Pumpe
Feuchtkugeltemperatur				
<<10°C		nass	2/3	8 kW
10°C	21°C	nass	3/3	27 kW

Tabelle 3 Betriebspunkte Verdunstungskühler geschlossen

Luftzustandsbereich		Betriebs-	Frisch-	Ab-	Strom-
von	bis	Stunden	Wasser	Wasser	verbrauch
Feuchtkugeltemperatur		pro Jahr	m ³ /Jahr	m ³ /Jahr	kWh
<<10°C		6000			48000
10°C	21°C	2760			74520
total		8760	7885	7885	122520

Tabelle 4 Betriebsdaten Verdunstungskühler geschlossen

Luftzustandsbereich		Kühler-	Ventilator in	Leistungsbedarf
von	bis	fahrweise	Betrieb	Ventilatoren/ Pumpe
Feuchtkugeltemperatur				
<<14°C		trocken	3	14.4 kW
14°C	22°C	trocken	6	28.8 kW
22°C	32°C	feucht	6	28.8/5 kW

Tabelle 5 Betriebspunkte Trockenrückkühler

Luftzustandsbereich		Betriebs-	Sprühwasser	Strom-
von	bis	Stunden	Menge	verbrauch
Feuchtkugeltemperatur		pro Jahr	m ³ /Jahr	kWh
<<14°C		6820	0	98208
14°C	22°C	1680	0	48384
22°C	32°C	260	2300	8788
total		8760	2300	155380

Tabelle 6 Betriebsdaten Trockenrückkühler

für diesen Apparat Schalldämpfer erforderlich, was sich unter anderem ungünstig auf den Energiebedarf auswirkt.

Weitere technische Daten gehen aus den Tabellen 3 und 4 sowie aus den Tabellen der technischen und wirtschaftlichen Bewertung (Tabellen 9 und 10) hervor.

Der Trockenrückkühler mit Befeuchtung

Aus Gründen des Korrosionsschutzes wird ein Industrierückkühlwerk in feuerverzinkter Ausführung gewählt. Es sind 2 Kühler erforderlich, die parallel zu schalten sind. Die Befeuchtung der Luft erfolgt, indem das Wasser mittels Düsenstöcken gegen den Luftstrom aerosolmäßig zerstäubt wird. Um den Einfluß des Windes gering zu halten, müssen die Düsen in einem relativ kleinen Abstand vor den Wärmetauscherelementen angeordnet werden. Die Verweilzeit der Tropfen ist demnach kurz, so daß nur etwa 20 % des zerstäubten Wassers von der Luft aufgenommen wird. Eigene Messungen und Erfahrungswerte bestätigen diesen Wert.

Technische Wertigkeit

Zunächst wird die technische Bewertung durchgeführt. Hierzu werden Bewertungskriterien festgelegt in Anlehnung an VDI 2225. Die Werteskala nach Punkten zwischen 0 und 10 wurde ebenfalls vorgängig beschrieben. Da nicht alle technischen Eigenschaften die gleiche Wichtigkeit haben, wird ferner ein Gewichtungsfaktor eingeführt. Dies führt zu einer stärkeren Differenzierung.

Eigenschaften die allen Produkten gemeinsam sind, wie die lange Lebensdauer, den fertig montierten Anlieferungszustand auf der Baustelle, und die Schalleistung von 82 dB(A), usw. werden als Bewertungskriterien nicht aufgeführt.

Luftzustandsbereich von bis	Kühler-fahrweise	Ventilator Drehzahl	Wasser-verbrauch	Leistungsbedarf Ventilatoren/Pumpe
Feuchtkugeltemperatur		beide gleich	max. Wert	
<<7°C	trocken	67%	0	2.8 kW
7°C 13.8°C	trocken	100%	0	8.4 kW
13.8°C/64% 20°C/64%	benetzt	65%	1.09m³/h	3.1 kW
20°C/64% 32°C/38%	benetzt	97%	2.03m³/h	8.5 kW

Tabelle 7 Betriebspunkte hybrider Trockenkühler

Luftzustandsbereich von bis	Betriebs-Stunden	Frisch-Wasser	Ab-Wasser	Strom-verbrauch
Feuchtkugeltemperatur	pro Jahr	m³/Jahr	m³/Jahr	kWh
<<7°C	3770	0	0	10556
7°C 13.8°C	3050	0	0	25620
13.8°C/80% 20°C/64%	1480	1613	538	4588
20°C/64% 32°C/38%	460	934	311	3910
total	8760	2547	849	44674

Tabelle 8 Betriebsdaten hybrider Trockenkühler

Bewertungskriterien (VDI 2225)	Gew.-Faktor	Anlage 1		Anlage 2		Anlage 3		Anlage 4	
		Verdunstungs-kühler offen	Pkt.	Verunstungskühler geschlossen	Pkt.	Trockenkühler befeuchtet	Pkt.	Hybrider Trockenkühler	Pkt.
Platzbedarf LxBxH (Grundfläche)	3	2.7x3.5x3.5(9.45m²)	10	5.3x2.8x3.75(14.8m³)	9	2x6.7x.3.2x3.5(42.9m²)	5	5.4x2.44x3.7(13.18m²)	9
Betriebsgewicht	3	5825 kg	10	12000 kg	3	11000 kg	3	6640 kg	9
Wasserbedarf Verdunstung		7885 to/Jahr		7885 to/Jahr		2300 to/Jahr		2547 to/Jahr	
Wasserbedarf Abschlämmung		7885 to/Jahr		7885 to/Jahr		0		849 to/Jahr	
Spritzwasserverlust		0.79 to/Jahr		0		0		0	
Gesamtwasserbedarf (Summe)	4	15770 to/Jahr	2	15770 to/Jahr	2	2300 to/Jahr	10	3396 to/Jahr	8
Kontamination Kreislaufwasser	3	ja	2	nein	10	nein	10	nein	10
Strombedarf Ventilator	4	3.5 kW	10	27 kW	2	28,8	2	8.4 kW	7
Strombedarf Frostschutzheizung	3	2.0 kW	3	2.0 kW	3	0	10	0	10
Strombedarf interne Pumpe	3	0	10	3.6 kW	4	5,0	3	0,55	7
Schwadenbildung	4	ja	2	ja	2	nein	10	nein	10
Anzahl Ventilatoren	2	1	4	1	4	6	2	2	7
Serviceaufwand	2	2 Tage / Jahr	7	3 Tage / Jahr	6	2 Tag / Jahr	7	2 Tage / Jahr	7
Korrosionsschutz	4	gut	7	gut	7	befriedigend	5	sehr gut	8
Punkte _{tot} =Summe Gew.Fakt.xPkt.	35		211		159		219		295

Tabelle 9 Technische Bewertung der Kühlsysteme

Demnach ist die fünffache Wassermenge in den Luftstrom einzubringen, als theoretisch erforderlich ist, um die Lufttemperatur auf annähernd Feuchtkugeltemperatur zu senken. Weitere technische Daten gehen aus den nachstehenden Tabellen 5 und 6 sowie aus den Tabellen der technischen und wirtschaftlichen Bewertung (Tabellen 9 und 10) hervor.

Der hybride Trockenrückkühler

Zur Standardausrüstung des hybriden Trockenrückkühlers gehören unter anderem drehzahlregulierte Ventilatorantriebe mittels Frequenzumformer. Dies ermöglicht eine optimale Energienutzung und führt zu minimalem Stromverbrauch. Das Wasserbecken ist klein gehalten, damit die auszutauschende Wassermenge nach der Eindickung möglichst gering ist. In der kühlen Jahreszeit kann der Kühler trocken gefahren werden, womit absolute Schwa-

denfreiheit gewährleistet werden kann. Bei sachgerechter Pflege haben diese Apparate eine Lebensdauer von 20 bis 25 Jahre. Weitere technische Daten gehen aus den nachstehenden Tabellen 7 und 8 sowie aus den Tabellen der technischen und wirtschaftlichen Bewertung (Tabellen 9 und 10) hervor.

Vergleich der Kühlsysteme

Die ausgewählten Kühlsysteme werden nun nach technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen gemäß voran beschriebenem Verfahren.

Berechnung der technischen Wertigkeit

$$P_{max} = Gew. Fakt. \times Pkt_{max} = 35 \cdot 10 = 350$$

$$W_{T1} = p_1/p_{max} = \frac{211}{350} = 0,6$$

$$W_{T2} = p_2/p_{max} = \frac{159}{350} = 0,45$$

$$W_{T3} = p_3/p_{max} = \frac{219}{350} = 0,62$$

$$W_{T4} = p_4/p_{max} = \frac{295}{350} = 0,84$$

Die wirtschaftliche Wertigkeit

Für die wirtschaftliche Bewertung werden nur Kosten verursachende Kriterien eingesetzt. Als Vergleichsgröße dienen die Jahreskosten jeder Anlage. Das ist die Größe, welche für den Betreiber von besonderem Interesse ist. Hierbei kommt für die Abschreibung und Verzinsung des eingesetzten Kapitals die Annuitätsmethode zur Anwendung.

Tabelle 10 Jahreskostenvergleich der verschiedenen Rückkühlsysteme (wirtschaftliche Bewertung)

Kostenart		Jahreskosten			
		Anlage 1 Verdunstungs- Kühler offen	Anlage 2 Verdunstungs- Kühler geschlossen	Anlage 3 Trockenkühler befeuchtet	Anlage 4 Hybrider Trockenkühler
Anschaffungswert einschl. Montage u. IBS	DM	34200,00	75000,00	181350,00	145000,00
Abschreibungszeit	Jahre	15	15	15	15
Zinssatz	%	5	5	5	5
Annuität	%	9,63	9,63	9,63	9,63
Wasserkosten	DM/m ³	4,39	4,39	4,39	4,39
Abwasserkosten	DM/m ³	3,45	3,45	3,45	3,45
Enthärtung/Chemikalien	DM/m ³	1,20	1,20	1,20	1,20
Zulässige Eindickung		2	2	0	3
Stromkosten	DM/kWh	0,25	0,25	0,25	0,25
Wasserkosten total	DM/Jahr	142560,00	142560,00	20792,00	30699,00
Stromkosten	DM/Jahr	3102,00	30630,00	38845,00	11168,50
Instandhaltungskosten	DM/Jahr	2500,00	3750,00	2500,00	2500,00
Kapitalkosten	DM/Jahr	3293,50	7222,50	17465,00	13963,50
Summe der Jahreskosten	DM/Jahr	151455,50	184162,50	79602,00	58331,00

Annuität $A = b_0 \times q^n (p-1)/q^n - 1$
 Zinsfaktor $q = 1 + p/100$
 dabei ist b_0 das eingesetzte Kapital
 q der Zinsfaktor
 n Abschreibung in Jahren
 p Zinsfuß

Für die Bestimmung der Annuität wurden gewählt:

Abschreibung $n = 15$ Jahre
 Zinsfuß $p = 5\%$

Eingesetztes Kapital = Anschaffungswert der jeweiligen Kühlanlage

Nachfolgend wird der Annuitätssatz $a(\%)$ berechnet, welcher anschließend in die Tabelle 10 des Jahreskostenvergleichs eingesetzt wird und die Berechnung der jeweiligen Kapitalkosten ermöglicht.

$$q = 1 + p/100 = 1 + 5/100 = 1,05$$

$$a = (q^n \times q - 1/q^n - 1) \times 100 = (1,05^{15} \times 1,05 - 1/1,05^{15} - 1) = 9,63\%$$

Für den Kapitaleinsatz des offenen Verdunstungskühlers von 34 200,00 DM ergeben sich damit Jahreskapitalkosten für Verzinsung und Abschreibung (vorschüssig) von:

$$K_j = 34\ 200,00/100 \times 9,63 = \text{DM } 3274,20$$

Wasserkosten, Stromkosten (Stadt Frankfurt a. M.) usw. gehen aus Tabelle 10 hervor.

Berechnung der wirtschaftlichen Wertigkeit

Für die Berechnung der wirtschaftlichen Wertigkeit müssen die idealen Jahreskosten festgelegt werden. Wie bereits vorhergehend erwähnt, sollen dies 80 % der

zulässigen Kosten sein. In diesem Fall wird als Basis von den geringsten Jahreskosten aller Varianten ausgegangen. Dieser beträgt beim hybriden Trockenkühler 58 331,00 DM, demnach errechnen sich die Ideal-Jahreskosten mit

$$K_j = 0,8 \times K_{\text{var.min}} = 58\ 331 \times 0,8 = 46\ 665,00 \text{ DM}$$

Damit ergeben sich für die verschiedenen Lösungsvarianten folgende Werte:

$$K_{W1} = K_j/K_1 = \frac{46\ 665}{151\ 455} = 0,31$$

$$K_{W2} = K_j/K_2 = \frac{46\ 665}{184\ 162} = 0,25$$

$$K_{W3} = K_j/K_3 = \frac{46\ 665}{79\ 602} = 0,58$$

$$K_{W4} = K_j/K_4 = \frac{46\ 665}{58\ 331} = 0,8$$

Die berechneten Werte aus technischer und wirtschaftlicher Bewertung werden nun zur besseren Übersicht in das S-Diagramm (S steht für Stärke) übertragen.

Interpretation der Ergebnisse

Die Ideallösung ist gekennzeichnet durch den Punkt Si. Eine technisch und wirtschaftlich ausgewogene Lösung liegt auf oder in der Nähe der strichlinierten Linie zwischen Koordinatenursprung und Si. Jeder Punkt auf dieser Linie ist ein Punkt gleicher technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit.

Wie aus dem S-Diagramm ersichtlich ist, stellt die Lösung mit dem hybriden Rückkühler (S4) in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht die beste Lösung dar.

Maßgebend für dieses Ergebnis sind vor allem die Wasserkosten, auch die

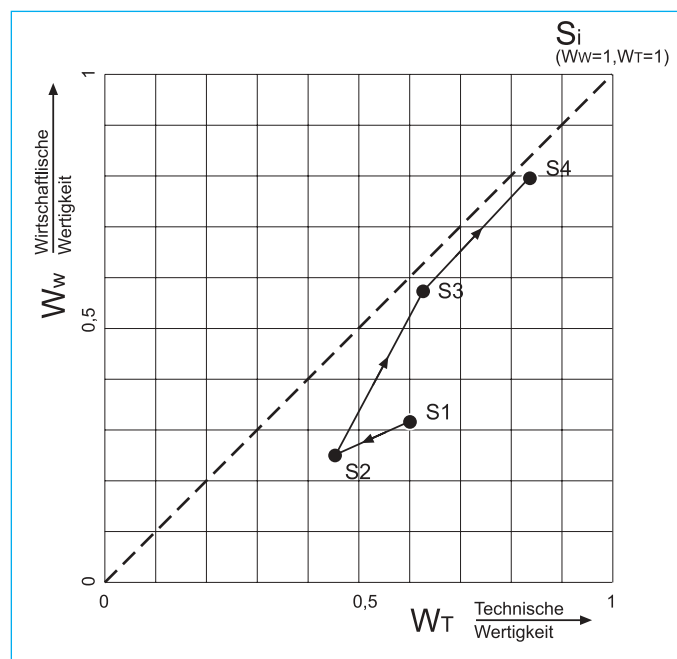


Bild 10 S-Diagramm

Bild 11 Ausführungsbeispiel hybride Trockenrückkühlanlage



Trockenrückkühler sollten dort eingesetzt werden, wo es die thermische Aufgabe erlaubt, d. h. wo die Kühlmediumaustrittstemperatur einige Grade über der maximal möglichen Außenlufttemperatur liegt.

Auch wenn man über die Zuteilung der Punkte bei der technischen Bewertung streiten kann, so gibt es bei den Kosten nichts zu diskutieren. Auch gewisse Fehler bei den Daten und in der Bewertung würden das Resultat nicht grundsätzlich ändern.

Ferner wird deutlich, daß vor einem Investitionsentscheid eine Betriebskostenrechnung unerlässlich ist und es liegt in der Verantwortung des planenden Ingenieurs, die optimale Lösung zu finden. □

Stromkosten fallen nicht unerheblich ins Gewicht.

Obschon der Trockenkühler mit Befuchtung am wenigsten Wasser benötigt, stellt dieser Kühler in verschiedener Hinsicht nicht die optimale Lösung dar, denn grundsätzlich sind solche Kühler nicht für den feuchten Betrieb ausgeführt. Unter ungünstigen Bedingungen oder bei schlechter Wasserqualität sind Korrosions-Probleme zu befürchten. Derartige Apparatekonfigurationen sollten nur für die Abdeckung von Notfallsituationen eingesetzt werden, bzw. für ganz wenige Betriebsstunden im Jahr.

Offener und geschlossener Kühlturm fallen durch die hohen Wasserkosten auf. In Regionen mit hohen Wasserkosten können solche Geräte nicht wirtschaftlich eingesetzt werden, auch wenn die Anschaffungskosten vergleichsweise sehr niedrig liegen.

Die Wasserkosten werden auch in Zukunft steigen, denn „Wasser“ wird eines der brennendsten Probleme der Menschheit werden im neuen Jahrtausend. Deutlich wird dies auch an der Wasserpreisentwicklung der Stadt Frankfurt a. M. seit 1980 entsprechend der Graphik (Bild 12).

Resümee

Die Untersuchung fällt eindeutig und klar zugunsten des hybriden Trockenrückkühlers aus, dank der geringen Verbrauchsdaten für Wasser und Strom. Der vermeintlich billigste Kühler ist unter Berücksichtigung der Betriebskosten mit der teuerste. Diese Apparate finden dort ihren berechtigten Einsatz, wo Wasser billig ist und in genügender Menge zur Verfügung steht.

Jahr	Wasserbezug, DM	Abwasser, DM	Gesamtpreis, DM
1980	1,70	0,72	2,42
1982	2,00	1,06	3,06
1983	2,10	1,43	3,53
1984	2,15	1,43	3,58
1984	2,15	1,49	3,64
1986	2,15	1,70	3,85
1987	2,15	2,35	4,50
1988	2,15	2,50	4,65
1988	2,35	2,50	4,85
1991	2,60	2,50	5,10
1992	2,95	2,50	5,45
1992	3,15	2,50	5,65
1993	3,05	2,50	5,55
1994	3,70	2,80	6,50
1995	3,70	3,45	7,15
1996	4,00	3,45	7,45
1998	4,10	3,45	7,55
1999	4,39	3,45	7,84

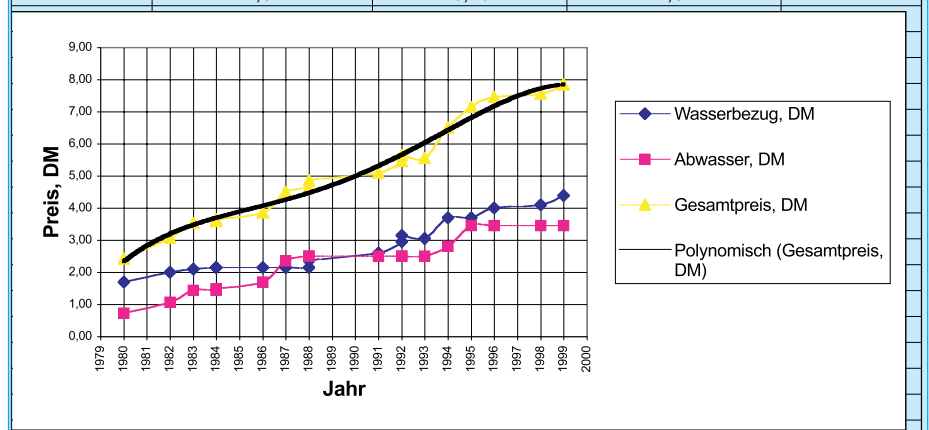


Bild 12 Graphik Wasserpreisentwicklung der Stadt Frankfurt seit 1980; Preise in DM/m³