

Dampfbefeuchtung: Reduzierung von Energieverbrauch, Luftstromerwärmung und Kondensatbildung

von Lynne Wasner und Jim Lundgreen, Senior Mechanical Design
Engineer DRI-STEEM Corporation

Heutige Immobilienbesitzer fordern die Rechnungslegung für alle eingesetzten Geldmittel in der Konstruktion und dem Betrieb von neuen oder renovierten Gebäuden. Die Einhaltung von Umweltschutzvorgaben erfordert messbare Gebäudeleistungsdaten, da man bekanntermaßen nicht verbessern kann was man nicht messen kann.

Kommerzielle und industrielle Dampfbefeuchtung ist ein wichtiger Bestandteil für viele Fertigungsverfahren wie z.B. der Herstellung von Halbleitern, in Druckereien und in Gebäuden mit medizinischen Einrichtungen. Aufgrund der erheblichen Anzahl von großen Gebäuden, welche eine Dampfbefeuchtung erfordern, sind Fortschritte in der Messung und Verbesserung der Energieeffizienz und des Wasserverbrauchs dieser Gebäudesysteme zeitgemäß. Neuerliche Fortschritte in der Materialentwicklung und Fertigungsprozesse rücken dies wieder in den Vordergrund, speziell der Energie- und Wasserverlust bei Dampfeinblasung in kalte Luftströme. Diese Studie befasst sich mit diesen Werkstoffen einschließlich deren Kenndaten.

Grundlagen der Dampfverteilung

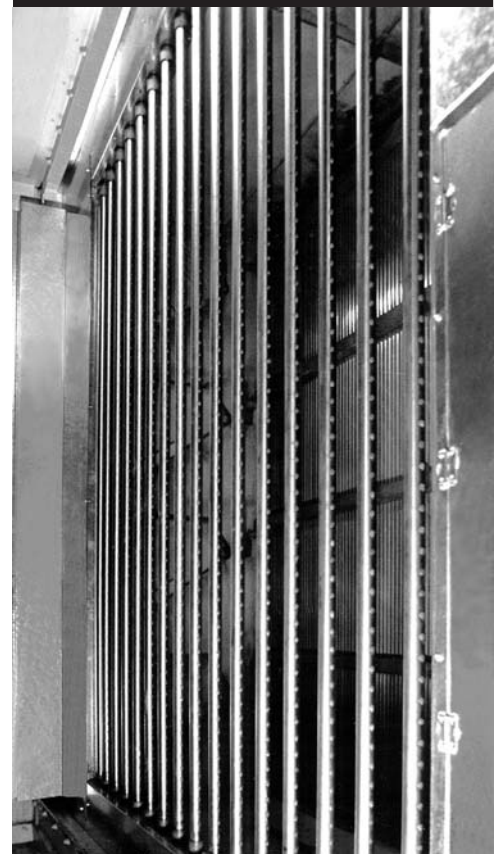
Befeuchtung mit Dampf erfordert zwei wichtige Funktionen: Dampferzeugung und Dampfverteilung.

Direkte Dampfeinblasseysteme injizieren Dampf in einen Luftkanal oder Luftverteiler, der von betriebseigenen Kesseln oder sonstigen Dampferzeugern erzeugt wird. Nur in direkten Dampfeinblasanlagen kommt dabei die Verteilung von Druckdampf zum Einsatz.

Dampf zur Befeuchtung kann aber auch in einem drucklosen Kessel erzeugt werden, der an ein Verteilsystem angeschlossen ist. Diese Art von Dampf wird oft als druckloser Dampf bezeichnet, da der Dampfkessel mit oder Nahe am Luftdruck arbeitet.

Gleichgültig ob nun Druckdampf oder druckloser Dampf einströmt, die Funktion eines Verteilmoduls unterscheidet sich nicht; Dampf kommt vom Dampferzeuger, Dampf wird in den

Abbildung 1-1
Typisches Dampfverteilsystem



Dargestellt ist ein typisches Dampfverteilmul mit ungedämmten Edelstahl-Verteilrohren montiert über die gesamte Breite und Höhe eines Luftverteilers. Diese Verteilrohre injizieren Dampf beidseitig, senkrecht zum Luftstrom.

Es kann nur eine Variable, nämlich die Wärmeleitfähigkeit der Verteilrohre geändert werden, um die Wärmeübertragung zu reduzieren. Dies lässt mit einer Wärmedämmung erreichen.

**Abbildung 2-1:
Verteilmodul mit
PVDF-gedämmten Rohren**



Luftstrom über kalibrierte Düsen in Edelstahl-Verteilrohre injiziert und Kondensat wird zu einem Bodenablauf oder über ein Rohr zum Dampferzeuger abgeleitet. (Anmerkung: Nicht alle Dampferzeuger sind für den Rücklauf von Kondensat ausgelegt.)

Dampfverteilmodule sind erhältlich in einer Vielzahl von Konfigurationen entsprechend den gewünschten Absorptions- und Leistungsanforderungen. Gleichgültig ob ein 30 cm Rohr oder ein 3 m Modul, die Aufgabe eines Verteilsystems ist immer gleich, nämlich Dampf in den Luftstrom verteilen.

Es erscheint ein einfacher Prozess, aber hinter dem effektiven Design eines Verteilmoduls verbirgt sich eine erhebliche Ingenieurleistung, primär um die komplexen Eigenschaften von Dampf zu berücksichtigen, wenn dieser in einen kalten Luftstrom einströmt.

Heiße Verteilrohre erhitzen die Luft und produzieren Kondensat

Beim Betrieb werden nicht wärmegeämmte Edelstahl-Verteilrohre heiß, wobei deren Oberflächentemperatur knapp unter 100 °C liegt. Normalerweise injizieren Verteilmodule Dampf in Luftströme die 10-14 °C aufweisen. Kalte Luft welche über heiße Verteilrohre strömt, verursacht etwas Kondensatbildung in den Verteilrohren und setzt gebundene Wärme frei. Diese sogenannte Abwärme wird direkt durch die ungedämmten Verteilrohre an den Luftstrom abgegeben, wobei sich die vorbeiströmende Luft aufheizt. Aufgrund des Verhältnisses zwischen gebundener Wärme und Kondensatmenge ist die Luftstromerwärmung direkt proportional zur anfallenden Kondensatmenge.

Die Aufheizung des Luftstroms führt zu folgenden Verlusten:

- **Jeder Liter anfallendes Kondensat verursacht 2300 kJ Verlust** — Energie die ursprünglich zur Umwandlung von einem Liter Wasser in Dampf erforderlich war.
- **Die Aufheizung des Zuluftstroms erhöht die Kühllast** bei Anwendungen wo simultan befeuchtet und gekühlt wird, wobei unnötigerweise Energie zur Luftabkühlung eingesetzt werden muss.
- **Unnötige Kondensaterzeugung kann dazu führen, dass ein Befeuchtersystem seinen Vorgabewert nicht erreicht**, wenn zuviel des erzeugten Dampfes in Kondensat umgewandelt wird. Dadurch kann ein System mit größerer Befeuchterleistung erforderlich werden.

- **Jeder Liter Kondensat der in den Ablauf fließt, vergeudet Wasseraufbereitungszusätze** (z. B. für enthärtetes Wasser, vollentsalztes Wasser oder Wasser aus Umkehrosmose, Wasser das mit Kesselzusätzen behandelt wurde). Dazu sollte angemerkt werden, nicht alle Dampferzeuger sind für den Rücklauf von Kondensat ausgelegt.
- **Die Erwärmung der Luft mit einem Befeuchter-Verteilssystem ist ineffizient.** Verteilmodule sind nicht als Heizsystem ausgelegt.

Die Wärmeübertragung der Verteilrohre in den Luftstrom ist abhängig von der Luftstromtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Anzahl der Verteilrohre (Rohrmantelfläche) und die Wärmeleitfähigkeit der Verteilrohre. In einer typischen Anwendung werden Lufttemperatur und Strömungsgeschwindigkeit von den HVAC-Systemparametern definiert. Dampfdruck und Anzahl der Verteilrohre sind Teil der Befeuchtungsvorgaben und können nicht ohne eine Minderung der Befeuchtungsleistung reduziert werden. Als einzige Variable kann nur die Wärmeleitfähigkeit der Verteilrohre geändert werden, um die Wärmeübertragung zu reduzieren. Dies lässt sich mit einer Wärmedämmung erzielen.

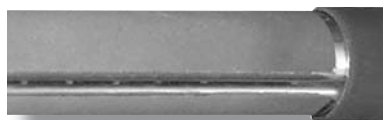
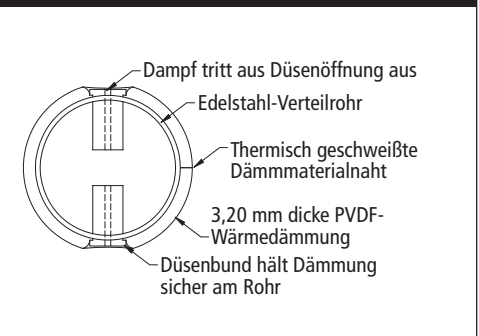
Wärmedämmte Verteilrohre reduzieren die Aufheizung

Eine Verteilrohr-Wärmedämmung muss nicht nur den extremen Bedingungen der Dampfbefeuchtung standhalten, sondern auch strenge Brandschutz- und Rauchgasvorschriften für Luftkanäle einhalten. Des weiteren darf die Dicke der Wärmedämmung keine zu große Auswirkung auf den Luftstrom haben, um einen übermäßigen Druckabfall zu vermeiden. Es bieten sich zwei Methoden der Verteilrohr-Wärmedämmung an: Aufspritzen einer Wärmedämmung auf die Verteilrohre oder Anbringen einer PVDF-Wärmedämmung.

Eine Wärmedämmbeschichtung (bekannt als "TIC" oder "keramische Wärmedämmung") wird werkseitig flüssig oder zähflüssig auf ein Verteilrohr aufgebracht und dann getrocknet oder ausgehärtet und ergibt eine Schicht von normalerweise 0,75 mm Dicke (die maximale Dicke einer Auftragsschicht).

Polyvinylidenfluorid (PVDF) Wärmedämmung, eine dichte geschlossenzellige Dämmung 3,2 mm dick, wird auch werkseitig auf Verteilrohre installiert.

**Abbildung 3-1:
Querschnitt eines PVDF-gedämmten
Verteilrohrs**



Verteilrohr mit herkömmlicher
Wärmedämmung



Verteilrohr mit PVDF-
Wärmedämmung

Grundlagen der Wärmeübertragung und Wärmedämmbeschichtungen (TIC)

Wärmeübertragung erfolgt auf drei Wegen: Leitung, Konvektion, Strahlung.

Wärmeleitung ist die Übertragung von thermischer Energie in Festkörpern und Flüssigkeiten in Ruhe wie z.B. durch ein Edelstahl-Verteilrohr.

Konvektion beschreibt die thermische Energieübertragung zwischen einer festen Oberfläche und einer Flüssigkeit, die sich über die Oberfläche bewegt, wie z.B. Luft, die über ein heißes Verteilrohr strömt.

Strahlung ist thermische Energieübertragung anhand von elektromagnetischen Wellen auch durch Vakuum und erfordert kein Medium. Die Wärmeabgabe über Strahlung von einem Verteilrohr beträgt nur 1-2% der Gesamt-Wärmeabgabe der Konvektion. Die Wärmeabgabe über Strahlung ist stark abhängig vom Abstrahlungsvermögen und Temperatur der Oberfläche zur vierten Potenz. Z. B. ein 1 m Stück DN40 Rohr mit einem Oberflächen-Abstrahlungsvermögen von 0,3 und einer Oberflächentemperatur von 99,7 °C erzeugt nur eine Abstrahlung von 26 W. Die Oberflächentemperatur des Rohrs ist zu gering um einen wesentlichen Beitrag zur Wärmeabgabe zu leisten. Für sehr heiße Oberflächen ist jedoch Abstrahlung die dominante Form der Wärmeübertragung. Zum Beispiel bei einem identischen Rohr mit 500 °C werden ca. 714 W abgestrahlt; 27-mal mehr als bei 99,7 °C.

Wärmedämmbeschichtungen (TIC) sind am effektivsten um die Abstrahlung zu reduzieren, ihr Einsatzgebiet ist daher oft z.B. auf Dächern, um die Wärmeübertragung der Sonneneinstrahlung zu reduzieren. Ein wichtiger Vorteil dieser Anwendung. Bei einer Schichtdicke von 0,25 bis 0,75 mm pro Schicht bietet die Wärmedämmbeschichtung jedoch keinen wirklichen Widerstand bei der Wärmeübertragung durch Wärmeleitung bei einem Dach.

Daher Sorgfalt walten lassen, beim Vergleich der Wirksamkeit von Dämmmaterial. Zuerst den Unterschied zwischen R-Wert (thermischer Widerstand), λ -Koeffizient (Wärmeleitfähigkeit) und die Art der Wärmeübertragung, welche reduziert werden soll, bestimmen (Strahlung, Konvektion, Leitung). Dann erst das entsprechende Dämmmaterial auswählen.

Vergleich von Wärmeleitfähigkeit (λ) und Wärmewiderstand (R) Werten

Der Kennwert Wärmeleitfähigkeit zeigt an, wie gut ein Werkstoff Wärmeenergie überträgt oder leitet. Ein Werkstoff mit einem hohen Wärmeleitfähigkeitswert, wie z.B. Metall leitet Wärme schneller als ein Werkstoff mit einem niedrigen Wärmeleitfähigkeitswert wie z.B. Kunststoff. Werkstoffe, welche der Wärmeleitung widerstehen weisen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf und werden Nichtleiter genannt. Der Wärmeleitfähigkeitswert wird als λ -Koeffizient bezeichnet.

**Tabelle 4-1:
 λ -Koeffizienten und R -Werte**

Dämmung	Dicke	lambda (λ)	R - Wert
	m	W/m•K	Dicke/ λ
Herkömm. Wärmedämmung	7,625•10 ⁻⁴	0,0324	0,0235
PVDF-Dämmung	0,003172	0,0107	0,296

Ein typischer λ -Koeffizient für eine Wärmedämmbeschichtung beträgt 0,0324 W/m•K. Das heißt Wärme wird durch dieses Material mit 0,0324 W pro 1 Grad K Temperaturunterschied (eine Seite des Werkstoffs ist 1 Grad K kühler oder wärmer als die andere Seite) über eine Fläche von 1 m² durch eine Dicke von 1 Meter übertragen.

PVDF-Wärmedämmung weist einen λ -Koeffizient von 0,0107 W/m•K auf.

Der Wärmeleitfähigkeitswert (λ) eines Werkstoffes ist unabhängig von dessen Dicke. Z.B., eine 200 mm dicke Wärmedämmung weist den gleichen λ -Koeffizient auf wie eine 0,75 mm dicke Wärmedämmung: 0,0324 W/m•K.

Der Wärmewiderstandswert (R) eines Werkstoffes ist jedoch abhängig von der Dicke:

$$R = \text{Werkstoffdicke (in m)} / \lambda$$

Daher beträgt der R -Wert einer typischen Wärmedämmung mit einer Dicke von 0,76 mm (0,00076 m):

$$R = 7,625 \cdot 10^{-4} / 0,0324 = 0,0235 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \text{ oder } R = 0,0235$$

Der R -Wert einer PVDF-Wärmedämmung mit einer Dicke von 3,2 mm (0,0032 m) beträgt:

$$R = 0,003172 / 0,0107 = 0,296$$

Um mit einer herkömmlichen Wärmedämmbeschichtung den identischen R -Wert einer PVDF-Wärmedämmung zu erreichen, wäre eine Dicke der Beschichtung von 9,55 mm (0,00955 m) erforderlich:

$$R = 0,00955 / 0,0324 = 0,295$$

Dazu müsste die Wärmedämmbeschichtung um das 12,6-fache dicker sein, um den R -Wert einer 3,2 mm dicken PVDF-Wärmedämmung zu erreichen.

Leistungskurven

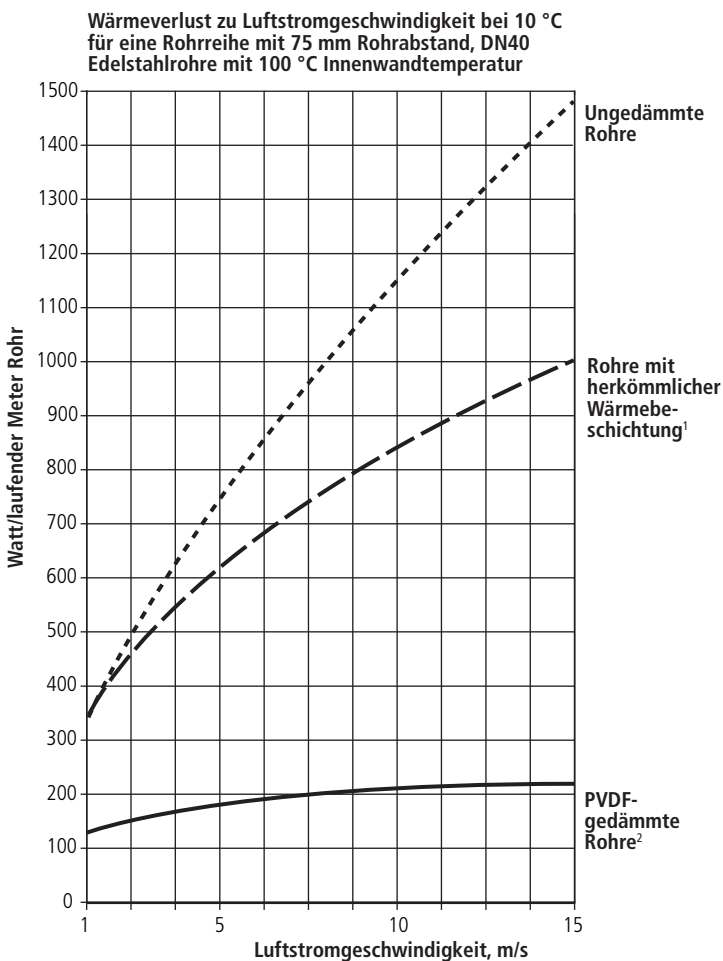
Abbildung 5-1 zeigt die Verteilrohr-Wärmeabgabe im Verhältnis zu unterschiedlichen Luftstromgeschwindigkeiten. Dabei lässt sich feststellen:

- Bei geringer Luftstromgeschwindigkeit ergibt sich ein geringer oder kein Vorteil durch die Wärmedämmung.
- Die Effizienz der Wärmedämmung erhöht sich für beide Arten der Ummantelung bei steigender Luftstromgeschwindigkeit.
- Bei Rohren mit PVDF-Wärmedämmung reduziert sich die Wärmeabgabe mehr als bei Rohren mit einer herkömmlichen Wärmedämmbeschichtung.

Eine 0,75 mm dicke

Wärmedämmbeschichtung müsste in der Dicke um das 12,6-fache erhöht werden um den gleichen R-Wert als eine 3,2 mm PVDF Wärmedämmung zu erreichen.

**Abbildung 5-1:
Verteilrohr-Wärmeabgabe**



Anmerkungen:

Wärmeverlustberechnungen basieren auf folgenden Referenzen:

Zhukauskas, A. 1987. *Convective Heat Transfer in Cross Flow*. In S. Kakac, R.K. Shah, and W. Ang, eds. *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, pp. 6.1-6.45.

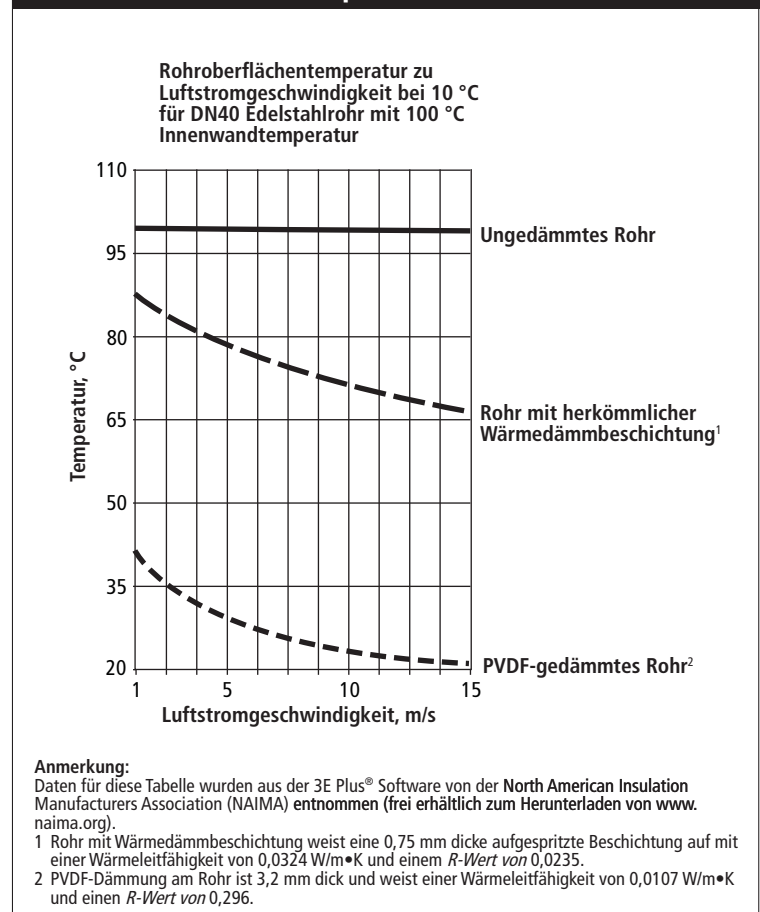
1 Rohr mit Wärmedämmbeschichtung weist eine 0,75 mm dicke aufgespritzte Beschichtung auf, mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,0324 W/m•K und einem R-Wert von 0,0235.

2 PVDF-Dämmung am Rohr ist 3,2 mm dick und weist eine Wärmeleitfähigkeit von 0,0107 W/m•K und einen R-Wert von 0,296 auf.

Die Aufheizung der Luft ergibt sich durch die vorbeiströmende kalte Luft über die heißen Verteilrohre. Kann die Rohroberflächentemperatur durch eine Wärmedämmung reduziert werden, erfolgt weniger Wärmeabstrahlung in den kalten Luftstrom. Abbildung 6-1 zeigt den Einfluss der Luftstromgeschwindigkeit an der äußeren Oberflächentemperatur eines Verteilrohrs bei konstanter Rohrinnenwandtemperatur von 100 °C:

- Für ein ungedämmtes Rohr bleibt die Oberflächentemperatur praktisch konstant, unabhängig von der Luftstromgeschwindigkeit (Oberflächentemperatur 99,8 - 99,4 °C)
- Bei einem Rohr mit herkömmlicher Wärmedämmbeschichtung fällt die Oberflächentemperatur bei ansteigender Luftstromgeschwindigkeit (Oberflächentemperatur 86,1 - 66,7 °C)
- Bei einem Rohr mit PVDF-Wärmedämmung fällt die Oberflächentemperatur bei ansteigender Luftstromgeschwindigkeit, (Oberflächentemperatur 40,6 - 21,7 °C)

**Abbildung 6-1:
Verteilrohr-Oberflächentemperatur**



Die nachfolgende Musterberechnung zeigt anhand eines typischen Befeuchtersystems, welche Energie- und Wassereinsparungen pro Jahr möglich sind. Mit Hilfe der Tabellen auf den nachfolgenden Seiten können Sie die möglichen Einsparungen für Ihr System berechnen.

Musterberechnung

Berechnet werden für ungedämmte Verteilrohre, Verteilrohre mit herkömmlicher Wärmedämmbeschichtung und Verteilrohre mit PVDF-Wärmedämmung folgende Werte:

- Wärmeabgabe in Joules
- Kondensatmenge in kg/h
- Gesamtaufheizung des Luftstroms in °C

Berechnung der eingesparten Energiemenge pro Jahr bei Einsatz von Verteilrohren mit PVDF-Wärmedämmung anstelle von ungedämmten Verteilrohren.

System- und Betriebsbedingungen:

- Relative Feuchte vor Befeuchter: 20%
- Relative Feuchte nach Befeuchter: 60%
- Luftkanal-Luftstromgeschwindigkeit: 5,1 m/s
- Befeuchtungsleistung: 197,5 kg/h
- Dampfverteilmul: Modulabmessungen B 1830 × H 1220 mm mit DN40 (1½") Verteilrohrdurchmesser mit 75 mm Zwischenabstand; 23 Rohre 1220 mm lang
- Lufttemperatur nach Verteilmul: 13 °C
- Dampfdruck: Luftdruck auf Meereshöhe (101,3 kPa)
- Befeuchtersystem Betriebsstunden: 2000 h/Jahr

Lösung zu Musterberechnung

1. Aus Tabelle 10-1 die Wärmeabgabe pro laufenden Meter

Rohr bestimmen:

- a. Ungedämmte Verteilrohre:
732 W/m
- b. Verteilrohre mit herkömmlicher Wärmedämmung:
623 W/m
- c. Verteilrohre mit PVDF-Wärmedämmung:
182 W/m

2. Gesamtlänge der Verteilrohre bestimmen.

Das Dampfverteilmul weist 23 Rohre auf. Jedes Rohr ist 1220 mm lang, was eine Gesamtlänge von 28,06 m ergibt. (23 Rohre × 1,220 m)

Quellen der Zulufterwärmung

Die Erwärmung der Zuluft aus freier Wärme vom in die Luft injizierten Dampf kann nicht reduziert werden, da es dabei um eine natürliche Eigenschaft von Dampf handelt.

Jedoch lässt sich die Übertragungswärme von heißen Verteilrohren auf einen kalten Luftstrom mit dem Einsatz von wärmegeprägten Verteilrohren erheblich reduzieren.

Für weitere Informationen, siehe letzte Seite dieses Dokumentes.

3. Berechnung der Gesamt-Wärmeabgabe:

- a. Ungedämmte Verteilrohre:
 $28,06 \text{ m Rohr} \times 732 \text{ W/m}$
 $= 20540 \text{ W Gesamt-Wärmeabgabe}$
- b. Verteilrohre mit herkömmlicher Wärmedämmung:
 $28,06 \text{ m Rohr} \times 623 \text{ W/m}$
 $= 17481 \text{ W Gesamt-Wärmeabgabe}$
- c. Verteilrohre mit PVDF-Wärmedämmung:
 $28,06 \text{ m Rohr} \times 182 \text{ W/m für PVDF}$
 $= 5107 \text{ W Gesamt-Wärmeabgabe}$

4. Berechnung der Kondensatmenge pro Stunde:

(Die Verdunstungswärme und Kondensierung für Wasser beträgt 2256076 J/kg)

- a. Ungedämmte Verteilrohre:
 $(20540 \text{ W}) / (2256076 \text{ J/kg}) = 32,78 \text{ kg/h Kondensat}$
- b. Verteilrohre mit herkömmlicher Wärmedämmung:
 $(17481 \text{ W}) / (2256076 \text{ J/kg}) = 27,89 \text{ kg/h Kondensat}$
- c. Verteilrohre mit PVDF-Wärmedämmung:
 $(5107 \text{ W}) / (2256076 \text{ J/kg}) = 8,15 \text{ kg/h Kondensat}$

5. Anhand Tabelle 11-1 die gesamte Luftstromaufheizung bestimmen:

Wärme aus Dampf + Wärme von Verteilrohren =
Gesamtaufheizung

- a. Ungedämmte Verteilrohre: $0,59 + 1,43 = 2,02 \text{ °C}$
- b. Verteilrohre mit herkömmlicher Wärmedämmung:
 $0,59 + 1,22 = 1,81 \text{ °C}$
- c. Verteilrohre mit PVDF-Wärmedämmung: $0,59 + 0,36 = 0,95 \text{ °C}$

6. Berechnung der jährlichen Energieeinsparungen in Joules mit PVDF-Wärmedämmung anstelle von ungedämmten Rohren. Angenommen werden 2000 Betriebsstunden pro Jahr. Jährliche Wärmeabgabe von ungedämmten Rohren minus der jährlichen Wärmeabgabe von wärmegeprägten Rohren = jährliche Energieeinsparungen

$$\frac{(20540 \text{ W} \times 2000 \text{ h/yr}) - (5107 \text{ W} \times 2000 \text{ h/yr})}{1000}$$

$$= 30866 \text{ kW/h (1 kW/h = 3600 kJ)}$$

$$(30866 \text{ kW/h} \times 3600 \text{ kJ/Kw}) = 111117600 \text{ kJ}$$

Tabelle 8-1:

Ergebniszusammenfassung für Musterberechnung: 1830 × 1220 mm Verteilmodul; DN40 Verteilrohre mit 75 mm Zwischenabstand; 5,1 m/s Luftstromgeschwindigkeit, Betriebsstunden 2000 h/Jahr

	Nicht gedämmte Rohre	Rohre mit Wärmedämmbeschichtung	Rohre mit PVDF Wärmedämmung	PVDF-gedämmte Rohre im Vergleich mit ungedämmten Rohren	
				Einsparungen	Verbesserung in %
Aufheizung der Zuluft durch Verteilrohre	1,43 °C	1,22 °C	0,36 °C	1,07 °C	75%
Wärmeabgabe pro Stunde	20 540 W	17 481 W	5 107 W	15 433 W	
Wärmeabgabe pro Jahr	147 888 000 kJ/Jahr	125 863 200 kJ/Jahr	36 770 400 kJ/Jahr	111 117 600 kJ/Jahr	
Kondensatmenge pro Stunde	32,78 L/h	27,89 L/h	8,15 L/h	24,63 L/h	
Kondensatmenge pro Jahr	65 560 L/Jahr	55 780 L/Jahr	16 300 L/Jahr	49 260 L/Jahr	

Was heißt Messung der "Effizienz"?

Die Spalte mit dem Titel "Effizienz" in Tabelle 10-1 beschreibt die Effizienz eines wärmedämmten Rohres im Vergleich zu einem ungedämmten Rohr, basierend auf Oberflächentemperatur, Wärmeabgabe und Kondensatmenge pro Meter Rohr. Dabei ändert sich die Effizienz mit der Luftstromgeschwindigkeit sowie der Lufttemperatur. In der Tabelle wird die Lufttemperatur als konstant aufgeführt.

Die Effizienzen in Tabelle 10-1 gelten nur für die Verteilrohre und nicht für die Dampfsammler.

Die Effizienzen ändern sich nicht bei wechselnder Dampfleistung. Strömt heißer Dampf durch ein Rohr entsteht Kondensat und es wird Wärme abgegeben entsprechend den Angaben in der Tabelle, unabhängig von der Dampfleistung (Abbildung 9-1).

Daher die Effizienz nicht auf die Dampfleistung beziehen. Wie sich aus Abbildung 9-1 ersehen lässt, produziert ein mit PVDF gedämmtes Rohr bei einer Dampfleistung von 100 kg/h 8,13 l/h Kondensat (8,13% der Leistung) und bei einer Dampfleistung von 500 kg/h immer noch 8,13 l/h Kondensat (1,63% der Dampfleistung).

Zusammenfassung

Die naheliegende Lösung des Problems der unerwünschten Aufheizung von Luftverteilern und Kanälen aus der Dampfbefeuchtung und die dadurch resultierenden Verluste ist eine Wärmedämmung der Verteilrohre. Rohre mit einer herkömmlichen Wärmedämmbeschichtung erzielen eine Dämmung bei sehr hohen Luftstromgeschwindigkeiten (15 m/s) jedoch sehr geringe oder keine Vorteile bei niedrigen Luftstromgeschwindigkeiten. Bei typischen Luftstromgeschwindigkeiten von 2,5–5 m/s können mit der PVDF-Wärmedämmung Einsparungen von 67-75% erzielt werden. Die Vorteile dieser Effizienz sind beträchtlich: eine größere Reduzierung der Aufheizung des Luftstroms sowie einer Reduzierung der Kondensatmenge im Verteilrohr, was zu erheblichen Einsparungen von Energie und Wasserverbrauch zur Folge hat.

**Abbildung 9-1:
Kondensatverlust zu Dampfleistung**

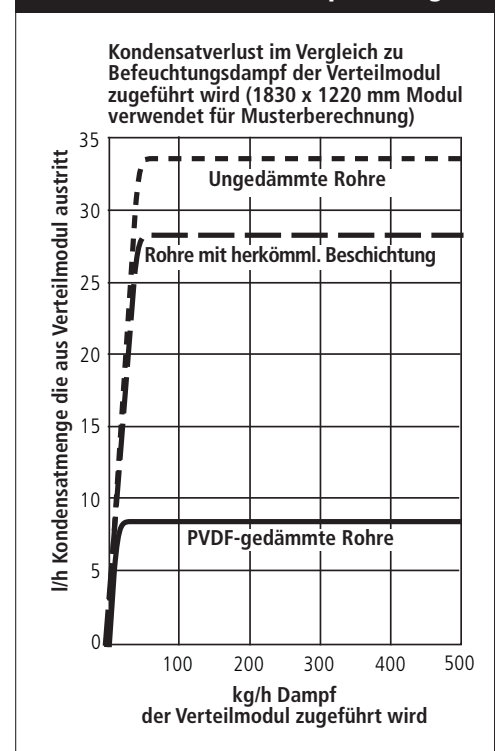


Tabelle 10-1:**Wärmeabgabe eines 1830 × 1220 mm Verteilmoduls mit DN40 Verteilrohre mit einem Zwischenabstand von 75 mm**

Luftstrom- geschwindigkeit	Edelstahlrohr (ungedämmt)	Edelstahlrohr mit Wärmedämmbeschichtung		Edelstahlrohr mit PVDF-Wärmedämmung	
	Wärmeabgabe	Wärmeabgabe	Effizienz	Wärmeabgabe	Effizienz
m/s	W / laufender Meter Rohr	W /laufender Meter Rohr	%	W / laufender Meter Rohr	%
1,27	304	319	-5	128	58
2,54	472	448	5	156	67
3,81	610	545	11	172	72
5,08	732	624	15	183	75
6,35	843	691	18	191	77
7,62	946	751	21	197	79
8,89	1043	804	23	203	81
10,16	1134	852	25	207	82
11,43	1222	896	27	210	83
12,70	1306	937	28	213	84
13,97	1387	974	30	216	84
15,24	1466	1009	31	218	85

Anmerkungen:

Wärmeverlustberechnungen basieren auf den folgenden Referenzen: Zhukauskas, A. 1987. *Convective Heat Transfer in Cross Flow*. In S. Kakac, R.K. Shah, and W. Ang, eds.; *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, pp. 6.1-6.45, mit den folgenden Daten:

- DN40 (1½") Edelstahlrohre
- Innenwandtemperatur von Rohr = 100 °C
- Lufttemperatur außerhalb Rohr = 10 °C
- Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmbeschichtung = 0,0324 W/m•K
- R- Wert der Wärmedämmbeschichtung = 0,0235
- Dicke der Wärmedämmbeschichtung = 0,75 mm
- Wärmeleitfähigkeit der PVDF-Dämmung = 0,0107 W/m•K
- R- Wert von PVDF -Dämmung = 0,296
- Dicke der PVDF-Dämmung = 3,2 mm

In Grau gehaltene Zellen beziehen sich auf die Musterberechnung auf Seite 7.

Tabelle 11-1:
Luftstromaufheizung von einem 1830 × 1220 mm Verteilmodul mit DN40 Verteilrohre mit einem Zwischenabstand von 75 mm

Luftstrom-geschw	Luft-temp. nach Modul	Rel. Feuchte vor Modul	Rel. Feuchte nach Modul	Befeuchtungs-leistung	Aufheiz-ung durch Dampf	Edelstahlrohre (ungedämmt)		Edelstahlrohre mit Wärme-dämmbeschichtung		Edelstahlrohre mit PVDF-Dämmung	
						Lufttemp. vor Modul	Aufheiz. du. Rohre	Lufttemp. vor Modul	Aufheiz. du. Rohre	Lufttemp. vor Modul	Aufheiz. du. Rohre
m/s	°C	%	%	kg/h	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
1,27	12,78	20	60	51	0,62	9,8	2,38	9,7	2,49	11,2	1,00
2,54	12,78	20	60	100	0,61	10,3	1,85	10,4	1,76	11,6	0,61
3,81	12,78	20	60	149	0,60	10,6	1,60	10,8	1,43	11,7	0,45
5,08	12,78	20	60	198	0,59	10,7	1,43	11,0	1,22	11,8	0,36
6,35	12,78	20	60	246	0,59	10,9	1,32	11,1	1,09	11,9	0,30
7,62	12,78	20	60	294	0,59	11,0	1,23	11,2	0,98	11,9	0,26
8,89	12,78	20	60	343	0,59	11,0	1,17	11,3	0,90	12,0	0,23
10,16	12,78	20	60	391	0,59	11,1	1,11	11,4	0,83	12,0	0,20
11,43	12,78	20	60	439	0,58	11,1	1,07	11,4	0,78	12,0	0,18
12,70	12,78	20	60	488	0,58	11,2	1,03	11,5	0,74	12,0	0,17
13,97	12,78	20	60	536	0,58	11,2	0,99	11,5	0,70	12,0	0,15
15,24	12,78	20	60	584	0,58	11,3	0,94	11,5	0,65	12,1	0,14

Anmerkungen:

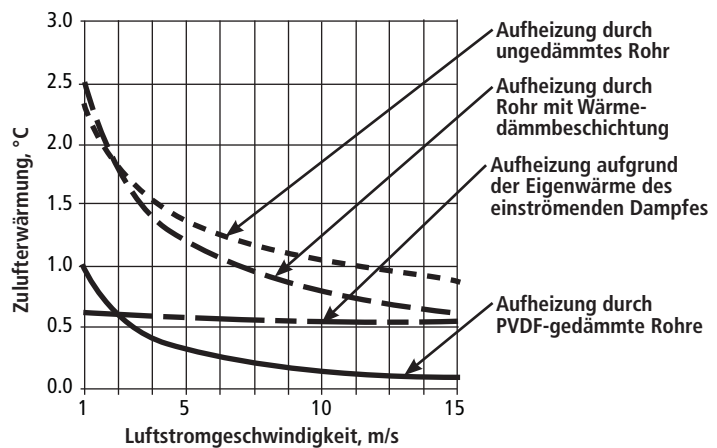
 Wärmeverlustberechnungen basieren auf den folgenden Referenzen: Zhukauskas, A. 1987. *Convective Heat Transfer in Cross Flow*. In S. Kakac, R.K. Shah, and W. Ang, eds.; *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, pp. 6.1-6.45, mit den folgenden Daten:

- DN40 (1½") Edelstahlrohre
- Innenwandtemperatur von Rohr = 100 °C
- Lufttemperatur außerhalb Rohr = 10 °C
- Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmbeschichtung = 0,0324 W/m•K
- R- Wert der Wärmedämmbeschichtung = 0,0235
- Dicke der Wärmedämmbeschichtung = 0,75 mm
- Wärmeleitfähigkeit der PVDF-Dämmung = 0,0107 W/m•K
- R- Wert von PVDF -Dämmung = 0,296
- Dicke der PVDF-Dämmung = 3,2 mm

In Grau gehaltene Zellen beziehen sich auf die Musterberechnung auf Seite 7.

Weitere Informationen auf unserer
Webseite
www.drsteem.com

Abbildung 12-1:
Aufheizung der Zuluft durch Dampf und durch das
Verteilmodul, wie beschrieben in der Musterberechnung auf
Seite 7



Anmerkungen:

Berechnungen der Luftstromaufheizung durch Rohre basieren auf folgenden Referenzen:
Zhukauskas, A. 1987. *Convective Heat Transfer in Cross Flow*. In S. Kakac, R.K. Shah, and W. Ang, eds. *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons, pp. 6.1-6.45.
1 Rohr mit Wärmedämmbeschichtung weist eine 0,75 mm dicke aufgespritzte Beschichtung auf, mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,0324 W/m•K und einem *R-Wert* von 0,0235.
2 PVDF-Dämmung am Rohr ist 3,2 mm dick und weist eine Wärmeleitfähigkeit von 0,0107 W/m•K und einen *R-Wert* von 0,296 auf.



DRI-STEEM Corporation
Zertifiziert gemäß ISO 9001:2000

US-Hauptsitz:
14949 Technology Drive
Eden Prairie, MN 55344
Tel.: +1 952-949-2415
Fax: +1 952-229-3200
E-Mail: sales@drsteem.com

Europa-Niederlassung:
Marc Briers
Grote Hellekensstraat 54 b
B-3520 Zonhoven, Belgium
+3211823595 (Tel.)
+3211817948 (Fax)
E-mail: marc.briers@drsteem.com

DRI-STEEM Corporation praktiziert eine fortwährende Produktentwicklung. Deshalb behalten wir uns Produktänderungen ohne Vorankündigungen vor.

Die aktuellsten Informationen finden Sie auf unserer Webseite www.drsteem.com

DRI-STEEM ist ein eingetragenes Warenzeichen von DRI-STEEM Corporation.

© 2007 DRI-STEEM Corporation

Form-Nr. Heat gain paper German-0307

Reduzierung der Zulufterwärmung

Abbildung 12-1 zeigt wie einströmender Dampf und Verteilrohre zur Aufheizung des Luftstroms im Kanal oder Luftverteiler beitragen.

Die erste Quelle der Aufheizung ist Eigenwärme des einströmenden Dampfes. Diese Aufheizung ist ein Teil der Eigenschaft von Dampf und kann nicht reduziert werden.

Die zweite Quelle der Aufheizung ist die mitgeführte Wärmeübertragung von heißen Verteilrohren in einen kalten Luftstrom. Diese Aufheizung kann durch den Einsatz von wärmedämmten Verteilrohren erheblich reduziert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie von: