

DIE DAMPFKÜHLUNG

1) Allgemeines:

Dampfkühlungen werden benötigt, um überhitzten Dampf (Heißdampf) auf Sattdampf-temperatur abzukühlen. Die Verwendung von Dampf, dessen Temperatur nahe der Sattdampf-temperatur liegt, ist auf Grund des besseren Wärmeübergangs z. B. für Wärmetauscherprozesse unbedingt empfehlenswert.

Wer meint, je heißer der Dampf desto besser, der irrt gewaltig.

Wo kommt der überhitzte Dampf her?

Überhitzter Dampf entsteht bei der Dampferzeugung im Kraftwerk oder nach Druckreduzierungen.

Jede Druckreduzierung geht einher mit einer Temperaturreduzierung. Nur verringert sich die Temperatur nie in demselben Maße wie der Druck.

Wird z. B. Dampf mit 8 barü und 180°C mit Hilfe eines Druckreduzierventils auf einen Druck von 1 barü reduziert, um vermeintlich eine Temperatur von 120°C (Sattdampf) zu erreichen, so entsteht hinter der Druckreduzierung in Wirklichkeit eine Temperatur von ca. 170°C.

Bei Temperaturen ab 15-20°C über Sattdampf-temperatur spricht man schon von einer Überhitzung. Dampf mit einer Temperatur von 5°C - 10°C über Sattdampf-temperatur sind bei technischen Anwendungen üblich.

Eine Dampfkühlung ist deshalb oftmals erforderlich.

Natürlich lassen sich entsprechende Geräte auch käuflich erwerben. Hier soll eine einfache technische Lösung der Marke Eigenbau beschrieben werden, welche kostengünstig ist und sich in der Praxis sehr gut bewährt hat.

► BEISPIEL ÜBERHITZUNG:

Dampf mit einem Dampfdruck von 5 barü und einer Dampftemperatur von 190°C ist ca. 30°C überhitzt, weil die Sattdampf-temperatur von Dampf mit 5 barü nur ca. 160°C beträgt.

D.h. die Überhitzung beträgt ca. 30°C.

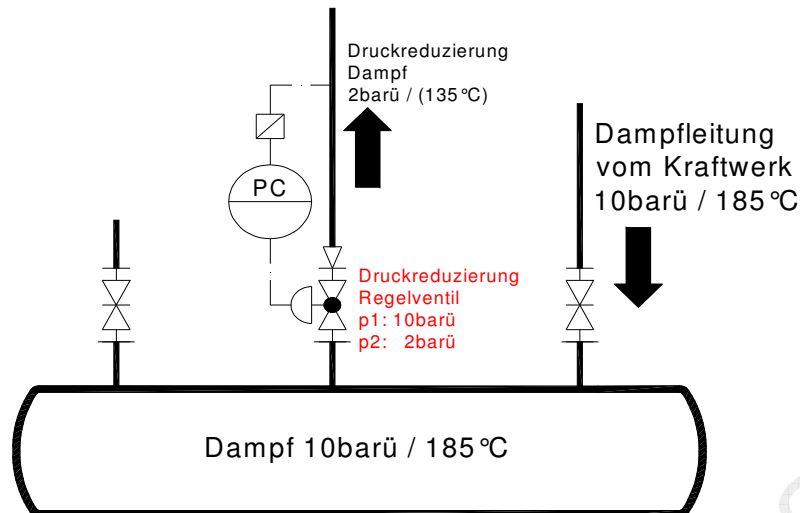
► BEISPIEL FÜR ÜBERHITZUNG NACH EINER DRUCKREDUZIERUNG:

Dampf mit einem Dampfdruck von 10 barü und einer Temperatur von 185°C wird auf einen Druck von 2,0 barü reduziert.

Die Überhitzung beträgt 50°C. ($185^\circ\text{C} - 135^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$)

Dieser Wert ist nicht so ganz genau, da die Dampftemperatur nach der Druckreduzierung mit Hilfe von z.B. Diagrammen genauer hätte bestimmt werden müssen.

Für die weiteren Berechnungen ist dieser Wert aber ausreichend.



2) Verfahren der Dampfkühlung

Über spezielle technische Einrichtungen wird dem Dampf Kondensat zugeführt. Es gibt verschiedene Verfahren, aber oftmals wird das Kondensat mit einer Pumpe und mittels Düsen in die Rohrleitung gespritzt (verdüst). Das Kondensat mit der Temperatur von 80°C bis 110°C verdampft und der Heißdampf verliert an Energie. Der Heißdampf kühlt auf Satt-dampftemperatur ab.

→ Die Kondensatmenge, welche in die Dampfphase übergeht, addiert sich zur Dampfmenge in der Rohrleitung. (bei Rohrdimensionierung beachten)

Je nach Rohrleitungsgeometrie und der Art der Düsen, verdampft nicht die gesamte Menge des eingedüsten Kondensats. Deshalb muss in der Rohrleitung in einer Entfernung von ca. 10-20 m hinter der Eindüsung eine ausreichende Kondensatentwässerung vorgesehen werden. (Kapitel Kondensatableiter).

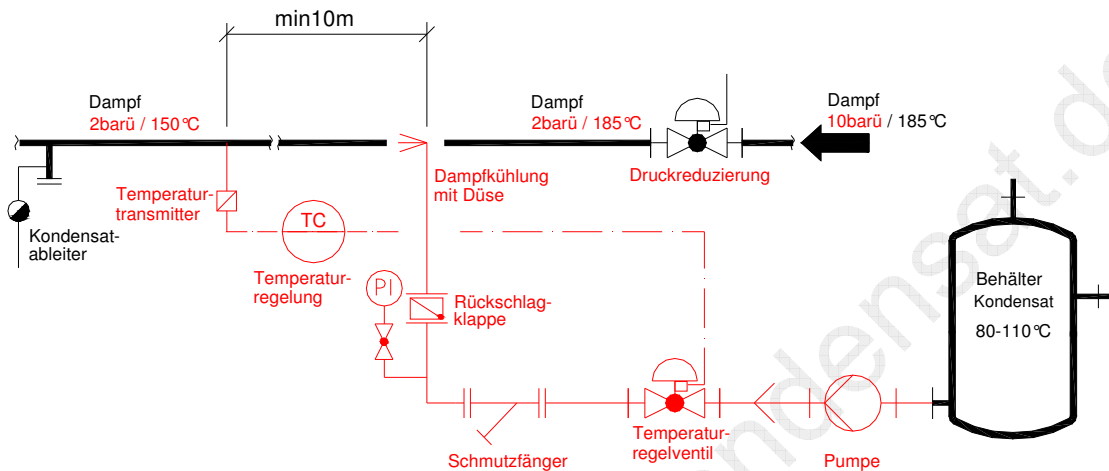
3) Optimale Bedingungen für eine Dampfkühlung:

Für den Übergang des Kondensats in die Dampfphase ist die Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung mit entscheidend. In der Dampfleitung sollten bei allen Betriebsbedingungen Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen, welche der Auslegung einer Dampfleitung entsprechen. Generell gilt, je höher die Strömungsgeschwindigkeit, je größer die Turbulenz in der Rohrleitung und umso besser ist die „Kondensataufnahme“. Bei richtiger Auslegung sinkt die Strömungsgeschwindigkeit des Dampfes in der Rohrleitung nicht unter 10 m/s. Bei Betriebsweisen von Teil- und Vollast, d.h. mehr und weniger Dampf in der Rohrleitung, müssen die Menge des zu verdüsenden Kondensates und die Anzahl der Düsen diesen wechselnden Bedingungen angepasst werden. (dazu später mehr)

Hinter einer Dampfkühlung sollten mindestens 6 m gerade Rohrstrecke ohne Einbauten vorhanden sein. Mit Einbauten sind Armaturen und auch Rohrbögen gemeint. Ein 90°-Rohrbogen kurz hinter der Dampfkühlung wirkt wie eine Prallscheibe. Ein Großteil des Kondensates würde dadurch ungenutzt in die Rohrleitung abfließen. Bei kleinen zu verdüsenden Kondensatmengen und kleinen Rohrdurchmessern sind auch kürzere Rohrstrecken möglich.

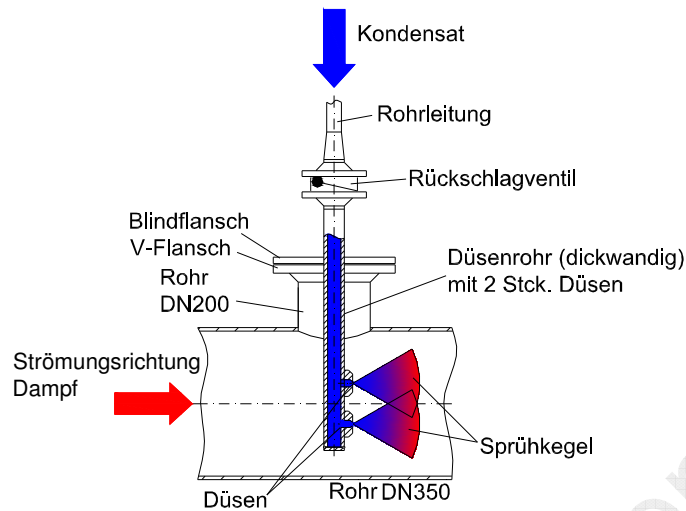
4) Aufbau einer Dampfkühlung mittels Düsen

a. Aufbau einer Dampfkühlung mittels Düsen hinter einer Druckreduzierung

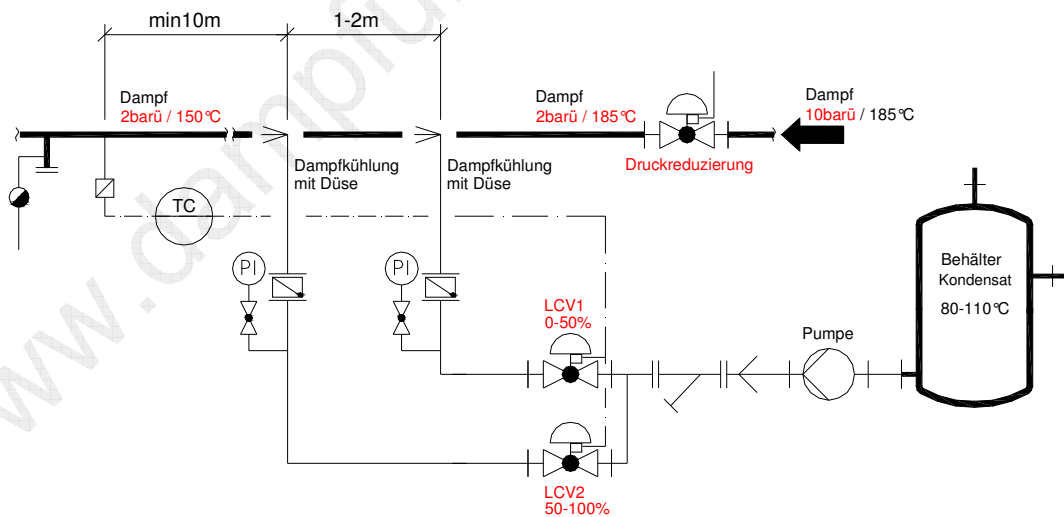


- **Temperaturregelkreis:**
Bestehend aus Temperaturtransmitter, Temperaturregler, Temperaturregelventil
- **Dampfkühlung mit Düse:**
Bestehend aus Düsenrohr mit Düse
- **Rückschlagklappe:**
Soll bei einer Fehlfunktion verhindern, dass Dampf in den Kondensatbehälter strömt.
- **Manometer, zur Kontrolle des Drucks direkt vor der Eindüsung**
- **Schmutzfänger:**
Soll die Düsen der Dampfkühlung vor Verschmutzung schützen. (könnte auch vor das Temperaturregelventil montiert werden)
- **Kondensatableiter:**
Muss das Kondensat abführen, welches nicht in die Dampfphase übergeht. (Kondensat, welches sich auf Grund der Betriebssituation, der Rohrgeometrie und der Art der Düsen „ungenutzt“ in der Rohrleitung sammelt, *siehe auch Kapitel Kondensatableiter*)
- **Kondensatpumpe: (Aufbau Pumpenstation siehe Kapitel zu Kondensatpumpen)**
Es muss je nach Anwendungsfall geprüft werden, ob nicht auch eine vorhandene Kondensatpumpe für die Dampfkühlung eingesetzt werden kann. (es ist damit eine Pumpe gemeint, die schon im Einsatz ist und ein Teilstrom der Fördermenge für die Dampfkühlung verwendet werden kann)

b. **Montage des Düsenrohres in der Dampfleitung**



c. **Aufbau einer Dampfkühlung mittels Düsen hinter einer Druckreduzierung für den Betrieb mit stark schwankenden Dampfmenngen**



In der Abbildung ist der Aufbau einer Dampfkühlung dargestellt, welche man bei stark unterschiedlichen Dampfmenngen anwenden kann. Zusätzlich kommt ein zweites Düsenrohr mit einem Temperaturregelventil zum Einsatz.

Der Temperaturregler steuert nun zwei Temperaturregelventile an. Bei geringen Dampfmengen öffnet zunächst das Regelventil LCV1. Bei 50% Reglerausgang ist das Ventil 100% geöffnet. Steigt die Dampfmenge an, reicht die Kondensatmenge zur Kühlung nicht mehr aus. Das zweite Regelventil beginnt zu öffnen, da der Reglerausgang über die 50% steigt. Bei 100% Reglerausgang ist das Ventil LCV2 auch 100% geöffnet. Verringert sich die Dampfmenge, schließen beide Temperaturregelventile in umgekehrter Reihenfolge.

Warum kommen nun 2 Düsenrohre zum Einsatz?

Wird bei der rechnerischen Auslegung der Dampfkühlung eine bestimmte Kondensatmenge zur Eindüsung ermittelt, so wird anschließend ein Hersteller zu den Düsen angefragt. (Bei den Düsen müssen Profis ran.) Bei größeren Kondensatmengen wird diese Menge dann meist über mehrere Düsen verteilt. D. h., bei einer Kondensatmenge von z.B. 5 t/h wird dann der Einsatz von mehreren Düsen vorgeschlagen. Bei einer Rohrleitung DN200 passen dann aber nicht z. B. 5 Düsen übereinander in das Rohr.

Für die Montage der Düsen ist zu wenig Platz im Rohr. Die oberste und unterste Düse wäre zu dicht an der Rohrleitung DN200. Bei einem Sprühkegel der Düsen von 30°-60° würde das Kondensat der obersten und untersten Düse gegen die Rohrleitung prallen. Diese Düsen wären zum Teil unwirksam. Deshalb könnte man dann die 5 Düsen an 2 Düsenrohre montieren. (siehe Abbildung zuvor)

Die Montage von mehreren Düsenrohren ist auch denkbar, wenn die Dampfmenge in der Rohrleitung so stark schwankt, dass Düsen mit unterschiedlichem Sprühkegel und unterschiedlicher Tröpfchengröße zum Einsatz kommen müssen, um den Prozess der Kühlung aufrecht zu erhalten.

5) Thermodynamische Auslegung einer Dampfkühlung

Für den Aufbau einer durchdachten Anordnung einer Dampfkühlung sind keine besonderen thermodynamischen Kenntnisse notwendig. Für die richtige Auslegung müssen wir nun aber ein paar einfache Berechnungen durchführen. Dazu wird eine Tabelle oder ein Diagramm benötigt, welche die Zustände des Wasserdampfes bei verschiedenen Drücken und Temperaturen darstellt. Dazu sollte man sich im Internet oder in Nachschlagewerken entsprechende Informationen beschaffen. (z.B. VDI-Wärmeatlas)

► BEISPIEL:

Welche Kondensatmenge ist erforderlich, um 20 t/h Dampf mit einem Druck von 2 bar_ü und einer Temperatur von 185 °C auf eine Temperatur von 150 °C abzukühlen? Kondensat mit 100 °C würde zum Eindüsen zur Verfügung stehen.

- *(nochmaliger Hinweis: Bei jeder Druckreduzierung verringert sich auch die Temperatur. Diese Temperaturverringerung ist aber im Verhältnis zur Druckreduzierung geringer und soll für die Auslegung der Dampfkühlung nicht weiter betrachtet werden.)*

So geht's:

Der Druck wird für die weiteren Berechnungen nur benötigt, um in einem Nachschlagewerk den Wert für die richtige Enthalpie des Dampfes zu ermitteln. Die Enthalpie gibt den Wärmeinhalt des Dampfes bei 2 barü und einer Temperatur von 185 °C bzw. 150 °C an.

Enthalpie Dampf vor Kühlung bei 2 barü / 185 °C: $h_1 = \text{ca. } 2830 \text{ kJ/kg}^{(1)}$

Enthalpie Dampf nach Kühlung bei 2 barü / 150 °C: $h_2 = \text{ca. } 2760 \text{ kJ/kg}$

Anschließend wird die Enthalpie (Wärmeinhalt) des einzudüsenden Kondensats benötigt. Hier hilft wieder eine Tabelle, in welchem Angaben zu den Zuständen von Wasser zu finden sind. (siehe Anhang)

Enthalpie Kondensat bei 100 °C $h_w = \text{ca. } 417 \text{ kJ/kg}^{(1)}$

Die Enthalpie des Kondensats ist nicht vom Druck abhängig. Deshalb wird nur die Temperatur benötigt. Anders ist es beim Dampf. Hier müssen immer der Druck und die Temperatur bekannt sein.

Berechnung:

$$h_1 = 2830 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2760 \text{ kJ/kg}$$

$$h_w = 417 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Menge Dampf MD:} = 20 \text{ t/h}$$

$$\text{Menge Kondensat MK:} = \text{ist gesucht}$$

$$MK = MD \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_w}$$

$$MK = MD * 0,0298$$

$$MK = 20 \text{ t/h} * 0,03$$

$$\underline{MK = 0,6 \text{ t/h} \text{ (600 kg/h Kondensat)}}$$

⁽¹⁾ Es sind deshalb „ca.- Werte“ aufgeführt, da man in manchen Tabellen die Angaben zur Enthalpie nicht für jede Temperatur finden kann. Die Temperatur von 185 °C liegt zwischen 180 °C und 190 °C. Für diese beiden Temperaturen ist der Wärmeinhalt angegeben. D.h., der Planer muss dann den ungefähren Wert mitteln. Es wäre aber auch möglich die Enthalpie von 190 °C einzusetzen.

Ergebnis:

Zum Kühlen von 20 t/h Dampf mit einer Temperatur von 185 °C auf eine Temperatur von 150 °C werden (nur) 0,6 t/h Kondensat benötigt.

Bei einer Menge von 20 t/h Dampf und einem Druck von 2 barü wird eine Rohrleitung mit einer Nennweite von DN350 / (37 m/s) benötigt. Die errechneten 0,6 t/h Kondensat könnte man mit Hilfe einer Düse in der Rohrleitung verdüsen.

6) Pumpe für die Dampfkühlung

In den oberen Abschnitten wird über „Düsen“ und „Verdüsen“ berichtet. Um Kondensat zu verdüsen, ist ein entsprechender Druck notwendig. Für eine Dampfkühlung sollte der Kondensatdruck vor der Düse ca. 5 bar über dem Druck in der Dampfleitung liegen.

► **BEISPIEL:**

Dampfdruck in der Rohrleitung = 2 barü
Druck vor der Düse: = 7 barü (2+5)

Es gibt auch Anwendungsfälle, bei welchen ein Differenzdruck zwischen dem Druck vor und nach der Düse lt. Düsenhersteller von nur einem Bar ausreicht. Es muss nicht immer eine neue Pumpe gekauft werden. Eventuell kann eine vorhandene Pumpe genutzt werden, indem ein Teilstrom zur Dampfkühlung verwendet wird.

7) Probleme mit Dampfkühlungen

Problematisch sind die Inbetriebnahmebedingungen. Ein Anfahren und wieder Abstellen bzw. eine Fahrweise mit sehr wenig Dampf führt zu geringen Strömungsgeschwindigkeiten in der Rohrleitung. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist dann meist auch keine Kühlung notwendig. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss aber die Dampfkühlung funktionieren. Im unten aufgeführten Beispiel wird solch eine Ausnahmesituation beschrieben.

► **BEISPIEL:**

Eine Anlage wird durch eine Rohrleitung mit einer Länge von 150 m mit Dampf versorgt. Der Dampfdruck wird mit einem Regelventil zu Beginn der Rohrleitung von 10 barü/185 °C auf 2 barü reduziert. Direkt hinter der Druckreduzierung ist eine Dampfkühlung montiert, weil für den Prozess einer Anlage die optimale Betriebsbedingung - Dampf mit einer Temperatur von 150 °C – benötigt wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist an dieser Anlage ein Überschreiten der Temperatur von 185 °C nicht zulässig. Durch Schwierigkeiten während der Inbetriebnahme kommt es dann aber zu längeren Verzögerungen. Das zu beheizende Produkt ist noch nicht im Anlagenteil. D.h., in der Dampfleitung strömt fast kein Dampf.

Diese Situation könnte dann zu Problemen führen. Der Temperaturtransmitter misst eine Temperatur von 185 °C und der Temperaturregler gibt an den Stellungsregler des Temperaturregelventils das Signal zu öffnen.

Der Temperaturtransmitter kann aber nur die Temperatur direkt am Temperaturtransmitter messen. Nun öffnet das Temperaturregelventil bis der gewünschte Sollwert von 150°C erreicht ist. Der Dampf im Bereich der Dampfkühlung kühlt ab und das Temperaturregelventil schließt nun wieder, da kein Dampf, der zu kühlen wäre, nachströmt.

D.h., die Dampfkühlung funktioniert und kühlt, aber die Temperatur direkt an der Anlage verändert sich nicht, da der abgekühlte Dampf nicht bis zur Anlage strömt.

Nun könnte der Temperaturtransmitter auch direkt an der zu beheizenden Anlage montiert werden, um direkt an der Anlage zu messen.

Gute Idee, aber auch das könnte wieder zu Problemen führen. Die Dampfkühlung würde wieder Kondensat in die Rohrleitung einspritzen und den Dampf in diesem Bereich abkühlen. Nur würde diesmal diese Abkühlung vom Temperaturtransmitter nicht bemerkt (gemessen) werden, weil dieser zu weit entfernt ist und der abgekühlte Dampf gar nicht oder nur sehr langsam bis zum Temperaturtransmitter strömt.

Die Dampfkühlung würde große Mengen an Kondensat in die Rohrleitung einspritzen, welches vom Dampf nicht aufgenommen werden kann. Das Kondensat sammelt sich in der Rohrleitung.

Eben geschilderte Probleme sind Ausnahmesituationen, an welchen sich aber gut die Problematik einer Dampfkühlung erklären lässt. Der Planer einer Dampfkühlung sollte diese Situationen aber auch in seine Überlegungen mit einbeziehen.

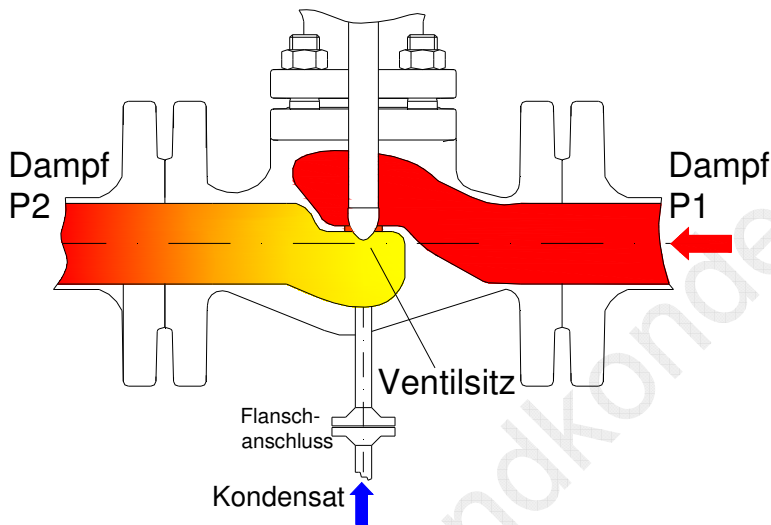
8) Zusammenfassung:

- ⇒ Auf Grund des schlechteren Wärmeübergangs ist Heißdampf das bessere Medium für den Wärmetransport.
- ⇒ Auf Grund des guten Wärmeüberganges ist Sattdampf das bessere Medium zur Wärmeübertragung.
- ⇒ Für die meisten industriellen Anwendungen wird Sattdampf verwendet.
- ⇒ Mit der Anfertigung eines Düsenrohres und der Montage mittels eines Stutzens in der Rohrleitung kann man sich eine sehr gut funktionierende Dampfkühlung selber bauen.
- ⇒ Die Düsen sollten möglichst in der Mitte der Dampf-Rohrleitung montiert werden.
- ⇒ Zu beachten sind die Strömungsgeschwindigkeiten in der Dampf-Rohrleitung und eine möglichst gerade Rohrstrecke von minimal 6 Metern.
- ⇒ Ebenso ist ein eventueller Betrieb der Dampfkühlung mit unterschiedlichsten Dampfmenzen zu berücksichtigen.
- ⇒ Der Druck des Kondensates vor den Düsen sollte je nach Menge des Kondensates ca. 5 bar über dem Dampfdruck in der Rohrleitung liegen.
- ⇒ Die oben beschriebene Dampfkühlung ist bis auf die regelmäßige Reinigung des Schmutzfängers vor der Düse wartungsfrei.

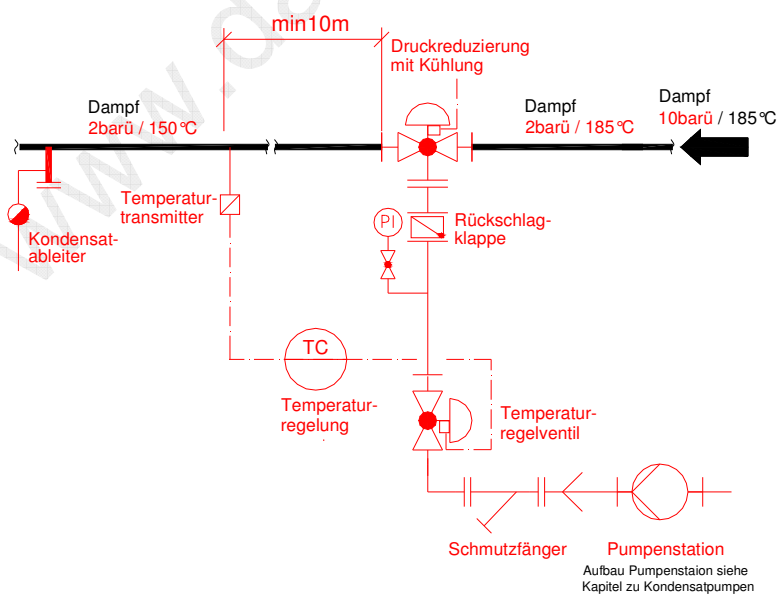
9) Weitere Arten der Dampfkühlung:

Im Abschnitt Oben, wurde ausführlich eine Dampfkühlung der Marke Eigenbau beschrieben um das Prinzip der Dampfkühlung zu erklären. Es gibt aber auch noch andere Möglichkeiten Heißdampf auf Sattdampf temperatur abzukühlen. Oftmals finden auch Druckreduzierventile Anwendung, bei welchen direkt im Ventil das Kondensat eingedüst wird. Die feine Zerstäubung des Kondensats erfolgt dabei nicht durch Düsen, sondern auf Grund der sehr hohen Turbulenz am Ventilsitz. Bei Geschwindigkeiten bis über Schallgeschwindigkeit wird das einströmende Kondensat regelrecht in feinste Tröpfchen „zerrissen“.

Druckreduzierventil



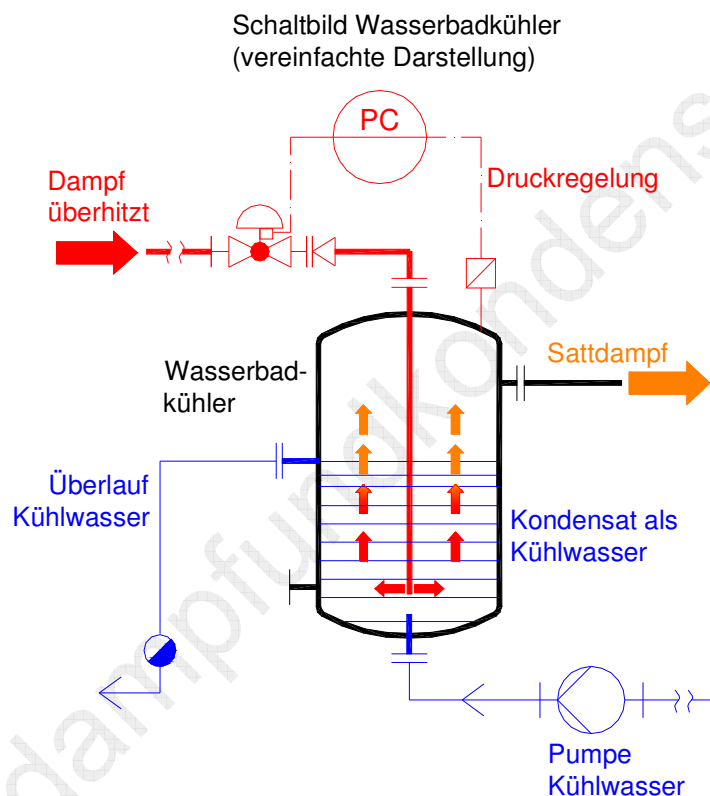
Ein Vorteil dieser Anwendung ist der geringere Differenzdruck zwischen dem benötigten Kondensat zur Kühlung und dem Dampfdruck, weil die Verdüsung nicht durch eine oder mehrere Düsen erfolgt. Je nach Anwendung genügt oftmals ein Druck von 0,1 bis 0,5 barü. D.h., bei einem Dampfdruck von 5 barü, wäre ein Kondensatdruck von 5,1 barü bis 5,5 barü ausreichend. Die Kondensatpumpe könnte kleiner gewählt werden.



Ob eine Dampfkühlung mit Düsen oder ein Druckreduzierventil mit integrierter Dampfkühlung eingesetzt wird, entscheidet ein Kostenvergleich beider Varianten. Die thermodynamische Auslegung ist aber gleich.

Der Wasserbadkühler

Der Verfasser hat so ein Gerät noch nie eingesetzt. Deshalb wurde der Wasserbadkühler in einer früheren Version der Homepage nicht beschrieben bzw. es wurde der Eindruck erweckt, dass dieses Gerät ein Relikt aus der letzten Eiszeit wäre. Dies scheint aber nicht zu stimmen. Wasserbadkühler werden immer noch sehr oft verwendet.



Funktion eines Wasserbadkühlers

Überhitzter Dampf strömt unter Niveau in einen mit Wasser gefüllten Behälter. Mit Hilfe spezieller Einrichtungen am Ende des Einströmröhres wird die einströmende Dampfmenge in kleine Dampfblasen zerlegt. Dadurch verkleinert sich die Grenzfläche zwischen den Dampfblasen und dem Kühlwasser. Bei großen Dampfblasen würde es vor allem bei Inbetriebnahme zu weithin hörbaren Dampfschlägen kommen (*Dampfschläge, siehe auch Kapitel zu Kondensatableiter*).

Unter Abgabe von Wärme an das Kühlwasser kühlt sich der Dampf ab. Ein Teil des Kühlwassers wird dadurch verdampft. Aus 2 t/h einströmenden überhitzten Dampf, werden je nach Überhitzung z.B. 2,1 t/h Sattdampf. Die Abkühlung erfolgt genau auf Sattdampf-temperatur.

Die gewünschte Temperatur wird über den Druck geregelt. Aus dem *Kapitel „Dampf und Druck“* ist bekannt, dass eine **Abhängigkeit zwischen Dampfdruck und Dampftemperatur bei Sattedampf** besteht.

Je nach gewünschter Temperatur, wird an der Druckregelung ein entsprechender Druck eingestellt. Bei einem Sollwert von 2,0 bar_ü im Wasserbadkühler, erhält man Sattedampf mit einer Temperatur von 133 °C.

Das Kühlwasser für das Wasserbad wird mit Hilfe einer Pumpe in den unter Druck stehenden Behälter gedrückt. Überschüssiges Kühlwasser läuft am Überlauf ab.

Der Wasserbadkühler ist im Vergleich zur Einspritzung mit Hilfe eines Düsenstockes oder eines speziellen Druckreduzierventils die teuerste Variante.