

6. Der Wärmetausch

Die bisherigen Kapitel dieses Buches beschäftigten sich mit den Eigenschaften von Dampf und mit der Dampfverteilung. So sind wir nun beim Wärmeverbraucher angekommen:

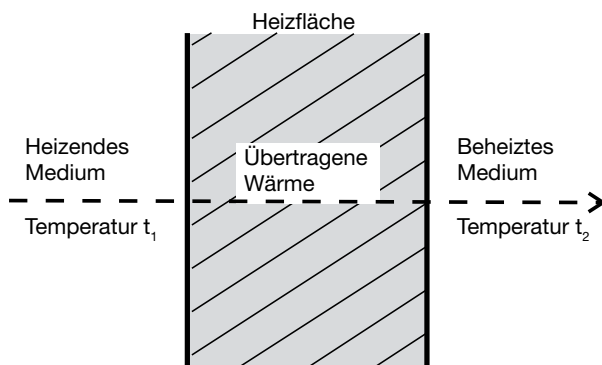
Im „Verbraucher“ wird dem Dampf die Wärmeenergie entnommen und dem Produkt bzw. dem Prozess zugeführt. Vom Standpunkt der Energieversorgung wird der Verbraucher deshalb allgemein als „Wärmetauscher“ bezeichnet. Dabei ist hier natürlich der beabsichtigte Wärmetausch gemeint, nicht etwa der ungewollte, aber nicht zu verhindernde Wärmeverlust z. B. der Dampfleitungen.

Ausführlichere Informationen zum Wärmetausch und zu Wärmetauschern finden Sie in unseren „Grundlagen des Einsatzes von Wärmetauschern in Dampfanlagen“.

6.1 Wärmetauscher

Es würde den Rahmen dieses Buches, der ja dem Kreislauf Dampf und Kondensat gewidmet ist, weit sprengen, wollten wir auf die Wärmetauscher im Einzelnen eingehen. Der Wärmetausch ist ja nicht Selbstzweck, sondern dient einer Aufgabe; diese Aufgabe bestimmt deshalb die konstruktiven Einzelheiten des Wärmetauschers und die Ausführungsmöglichkeiten sind so vielgestaltig wie die Zahl der Anwendungen. Deshalb wollen wir uns hier nicht mit der Berechnung und der Ausführung von Wärmetauschern befassen, so wichtig und interessant diese technischen Fragen auch sind, sondern uns auf die Betriebsweise und die Betriebsbedingungen im Hinblick auf Dampf und Kondensat beschränken.

Dampfbetriebene Wärmetauscher haben die Aufgabe, Wärmeenergie von Dampf durch die Heizfläche auf einen anderen Stoff zu übertragen. Schematisch ist das in der folgenden Abbildung dargestellt:



In der Mehrzahl der Fälle soll ein Wärmetauscher bestimmter Baugröße eine möglichst hohe Leistung haben, damit man, einfach gesagt, mit möglichst geringen Anschaffungskosten möglichst viel erreicht.

Nochmals: Wärmetauscher sollen Wärme übertragen. Deshalb gibt man die „Leistung eines Wärmetauschers“ durch den Wärmestrom \dot{Q} in W (Watt) oder kW (Kilowatt) an. Dabei erinnern wir uns daran, dass $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ und $1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/s}$ ist.

Wieviel Dampf in kg/h benötigt eigentlich ein Wärmetauscher? Berechnen lässt sich das mit der Formel

$$\dot{m} = \dot{Q} \cdot 3600 / \Delta h_v$$

\dot{m} Dampfmenge in kg/h

\dot{Q} Leistung in kW

Δh_v Verdampfungs-/Kondensationswärme in kJ/kg

Als Faustformel kann in den üblichen industriellen Anwendungen $\dot{m} = 1,7 \cdot \dot{Q}$ verwendet werden. Ein 500-kW-Wärmetauscher benötigt also 850 kg/h Dampf.

Wovon hängt die Leistung eines Wärmetauschers ab? Betrachten wir als einfaches Beispiel den Heizkörper im Wohnzimmer: Je höher die Temperatur des Heizungswassers und je größer der Heizkörper ist, desto größer ist die Heizleistung, der Wärmestrom.

Was aus dem Heizkörper ins Zimmer kommt geht durch das Fenster wieder hinaus: je größer die Fensterfläche und je größer der Unterschied zwischen Raum- und Außentemperatur, desto schneller.

Wir wissen aber auch, dass bei gleicher Größe und gleichem Temperaturunterschied ein Doppelfenster weniger Wärme durchlässt als eine einfache Verglasung. Die Leistung eines Wärmetauschers hängt also noch von weiteren Größen ab – leider von ziemlich vielen: Wanddicke, Material und Oberflächenbeschaffenheit der Heizfläche, Dicke des Kondensatfilms, Strömungsgeschwindigkeit der Stoffe, Ablagerungen auf der Heizfläche, usw. usw.

Man hat für diese Einflüsse Erfahrungswerte und kann deshalb unter bestimmten Annahmen und mit beträchtlichen Sicherheitszuschlägen Wärmetauscher berechnen. Für die tatsächliche Leistung des Apparats fasst man alle diese Faktoren in dem „Wärmedurchgangskoeffizienten“ k zusammen und stellt fest:

Wärmedurchgangskoeffizient k :

Pro Quadratmeter Heizfläche und je Grad Temperaturdifferenz zwischen heizendem und beheiztem Stoff überträgt der Wärmetauscher x kJ pro Sekunde. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird deshalb angegeben in der Dimension $\text{W/m}^2 \text{ K}$.

In diesem wichtigen k -Wert steckt also sowohl die Geschicklichkeit des Wärmetauscher-Konstrukteurs als auch die Sorgfalt des Betreibers der Anlage: Günstige Strömungsverhältnisse einerseits, richtige Installation, gute Entlüftung,

Sauberhaltung der Heizfläche andererseits sind von entscheidender Wichtigkeit für die Leistung von Wärmetauschern.

Fassen wir zusammen:

Der Wärmestrom \dot{Q} (W) eines Wärmetauschers steigt mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten k , mit der Größe der Heizfläche A (m²) und mit der Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$ (K) zwischen heizendem und beheiztem Stoff. Als „Wärmetauscherformel“ oder „Wärmedurchgangsformel“ geschrieben:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \quad (W)$$

Die Formel kann auch $k = \dot{Q} / A (t_1 - t_2)$ geschrieben werden. Daraus ist ersichtlich, dass der k -Wert in (W/m² K) gemessen wird.

Wie Sie sehen, ergibt sich dieser Zusammenhang zwangsläufig aus den Umständen. Es handelt sich um ein Naturgesetz, das ganz allgemein für die Wärmeübertragung von einem Stoff durch eine Wand an einen anderen Stoff gilt: für den Wärmeverlust Ihrer Wohnung ebenso wie für den Wärmetauscher in der Raffinerie.

Ob dieses Gesetz nun neu für Sie ist oder schon lange zum festen Bestand Ihres Wissens gehört – bei der Beurteilung der Vorgänge im Dampf-Kondensat-Netz müssen wir es stets vor Augen haben und zu Rate ziehen.

6.2 Der Wärmedurchgangskoeffizient k

Mit dem im vorigen Kapitel eingeführten Wärmedurchgangskoeffizienten, auch kurz „ k -Wert“ genannt, haben wir uns zwar zunächst vor der Berücksichtigung von Einzelheiten der Wärmetauscher gedrückt; da der k -Wert aber die Leistung eines Wärmetauschers ganz entscheidend beeinflusst, ergibt sich nun die Frage: Wie groß ist k ?

Im Grunde ist das Problem durch den k -Wert natürlich nicht einfacher geworden: Für die Berechnung eines Wärmetauschers ist die Berücksichtigung der Einzelheiten nicht zu umgehen.

Für eine überschlägige Berechnung des Kondensatanfalls von dampfbetriebenen Wärmetauschern kann man folgende k -Werte zugrunde legen:

beheiztes Medium	k -Wert W/m ² · K
Luft	10
Öl	100
Wasser	1000

Merken wir uns dazu noch den ungefähren k -Wert für den Wärmeübergang von Wasser durch eine Wand auf Wasser:

$$k_{(\text{Wasser/Wasser})} = 300 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Heizmedium (Stoff 1)	Beheiztes Medium (Stoff 2)	Umlauf	k -Wert [W/m ² · K]
Gas	Gas 1 bar	erzwungen	5–10
Gas	Gas 200 bar	erzwungen	100–400
Flüssigkeit	Gas 1 bar	erzwungen	10–40
Flüssigkeit	Gas 200 bar	erzwungen	200–600
Flüssigkeit	Flüssigkeit	natürlich	50–600
Flüssigkeit	Flüssigkeit	erzwungen	100–1200
Dampf	Gas	natürlich	5–10
Dampf	Gas	erzwungen	15–60
Dampf	Flüssigkeit	natürlich	100–1000
Dampf	Flüssigkeit	erzwungen	600–3000

Aus diesen Zahlenwerten können wir zunächst zwei wichtige Folgerungen ziehen:

Von Dampf geht die Wärme an Wasser hundertmal besser als an Luft. Das ist einer der Gründe, warum Dampfanlagen und Wärmetauscher gut entlüftet werden müssen. Schlecht entlüftete Anlagen haben eine schlechte Leistung. Und weiter:

Von Dampf geht die Wärme an Wasser dreimal besser als von Wasser durch die Heizfläche an Wasser. Das ist einer der Gründe, warum das Kondensat so schnell wie möglich aus dem Wärmetauscher entfernt werden sollte. Schlecht entwässerte Wärmetauscher haben eine geringere Leistung.

Eine Ausnahme von der letzten Regel bilden nur billige Wärmetauscher wie Heizschlangen, Raumheizkörper, Begleitheizungen: Bei diesen Anlagen kann man das Kondensat anstauen, um die Kondensatwärme auszunutzen; den geringeren k -Wert und die niedrigere Temperatur gleicht man durch Vergrößerung der Heizfläche A aus, so dass man nach $\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$ dennoch die benötigte Leistung erhält.

6.3 Ungeregelte Wärmetauscher

Sie wissen, dass der Dampf ein viel größeres Volumen einnimmt als das Kondensat. Wenn 1 Liter Dampf bei $p_e = 5$ bar kondensiert, entsteht nur ein Teelöffel voll Kondensat (Spalte 7 der Dampftafel: Bei 5 bar ist das Volumen des Dampfes rund $0,32 / 0,001 = 320$ mal größer als das Volumen der gleichen Gewichtsmenge Kondensat).

Durch die Kondensation des Dampfes entsteht also im Dampfraum ein „Loch“, in das sofort Dampf nachströmt. Das ist ja einer der Vorteile des Dampfes: dass er nicht gepumpt werden muss, sondern freiwillig dorthin strömt, wo er benötigt wird.

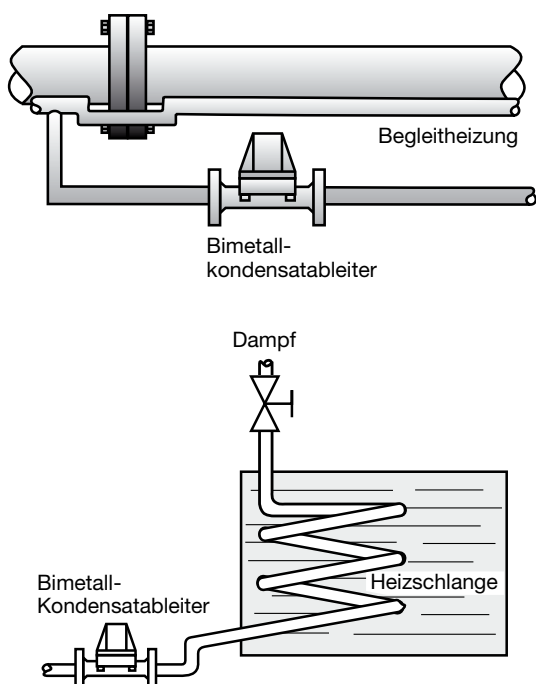
Die Erklärung mit dem „Loch“ ist nicht wörtlich gemeint. Dampf ist ja sehr beweglich; sowie Dampf kondensiert, verringert sich der Druck an der Kondensationsstelle etwas, und neuer Dampf strömt nach. Wird dieses Nachströmen nicht durch zu kleine Zuleitungen oder enge Querschnitte

des Dampftraumes behindert, dann sinkt der Druck im Kondensationsbereich nur wenig unter den Dampfdruck in der Leitung. Da mit dem Druck des kondensierenden Dampfes seine Temperatur fest verbunden ist, ist auch die Temperatur im Dampfraum etwa konstant.

Wie steht es aber mit der Temperatur des beheizten Stoffes? Mit einem der üblichen elektrischen Raumheizgeräte können Sie ein kleines Zimmer schnell erwärmen – stellen Sie das gleiche Gerät aber in einen großen Saal, dann ist sein Einfluss unmerklich gering, weil die Geräteleistung zu klein ist im Vergleich zum Bedarf. Gleiches, nur nicht so extrem, geschieht an jedem unregulierten Wärmetauscher, der Stoffe erwärmen soll: Bei geringem Wärmebedarf erhält der beheizte Stoff eine höhere Temperatur; bei steigendem Wärmebedarf (z. B. durch vergrößerte Abnahme oder durch niedrigere Anfangstemperatur des Stoffes) sinkt die Temperatur des beheizten Stoffes.

In manchen Anwendungsfällen ist diese Erscheinung durchaus zulässig. Soll z. B. ein Schmierölbehälter beheizt werden, um das Öl pumpfähig zu halten, so genügt es, eine für die tiefste mögliche Außentemperatur ausreichende Dampfheizung in Form einer Heizschlange vorzusehen. Bei höheren Außentemperaturen wird das Öl dann zwar stärker erwärmt als für die Pumpfähigkeit nötig wäre, doch schadet das dem Öl nicht.

Besonders einfach können solche unregulierten Begleitheizungen mit Bimetall-Kondensatableitern ausgeführt werden.



6.4 Geregelte Wärmetauscher

Die nähere Betrachtung des letzten Beispiels führt uns aber schon einen Schritt weiter: Wir nahmen an, dass die höhere Öltemperatur nicht schadet – sie nützt aber auch nicht, ist also unnötig. Das heißt, die zwangsläufig für die tiefste Außentemperatur ausgelegte Tankbeheizung ist während vielleicht 95% der Heizzeit unnötig stark, verbraucht deshalb mehr Dampf als nötig wäre, ist zu teuer. Es ist beim Öltank also nicht anders als bei der Beheizung von Wohngebäuden: Ungeregelte Heizungen führen zu schockierenden Heizungsrechnungen. (Die Tankbeheizung wird allerdings nicht vom Gehalt des Betriebsingenieurs abgezogen. Für einen einzigen Tank von 8 m Höhe und 4 m Durchmesser, ohne Isolation, wären das bei einer nur 5 K höheren Tanktemperatur als nötig etwa 250 € monatlich unnötige Betriebsausgaben – ausgerechnet mit Hilfe unserer Wärmetauscherformel mit $k = 10$ und Dampfkosten von 30 € je Tonne.)

In unserem Beispiel nahmen wir an, dass höhere Temperatur dem Öl nicht schadet. In der Praxis gibt es aber viele Stoffe, die einerseits beheizt werden müssen, andererseits aber eine bestimmte Temperatur nicht überschreiten dürfen, weil sie sonst verdampfen, sich zersetzen oder andere verbotene Dinge tun. Ein einfaches Beispiel hierfür ist ein dampfbeheizter Warmwasserboiler. Bleibt die Heizschlange stets unter Dampfdruck von $p_e = 5 \text{ bar}/159^\circ\text{C}$, dann wird das Boilerwasser bei geringer Entnahme zu kochen beginnen. Ergebnis: Der Druck im Warmwassersystem steigt auf $p_e = 5 \text{ bar}$ oder ein Sicherheitsventil bläst dauernd und stark Dampf ab und damit Geld in den Himmel.

Schließlich ist es noch häufig der Fall, dass die Temperatur des beheizten Stoffes auch bei schwankendem Verbrauch nur wenig schwanken darf. Lufterhitzer sind dafür ein einfaches Beispiel: Bei der Raumbeheizung wird ein Temperaturfühler im Raum die Kondensation im Lufterhitzer so steuern, dass die Raumtemperatur trotz Sonneneinstrahlung, Windanfall und schwankender Außentemperatur nur unmerklich schwankt. Soll dagegen ein empfindliches Produkt bei höherer Temperatur im Luftstrom getrocknet werden, dann kann eine Temperaturregelung mit Fühler im Luftstrom für eine Lufttemperatur sorgen, die um nicht mehr als einige Zehntel Grad vom gewünschten Wert abweicht.

Fassen wir diese Gesichtspunkte zusammen:

Wärmetauscher müssen geregelt werden, wenn

- **größere Temperaturschwankungen unzulässig sind**
- **bestimmte Temperaturen nicht über- oder unterschritten werden dürfen**
- **die Anlage mit größtmöglicher Wirtschaftlichkeit arbeiten soll.**