

Fachveröffentlichung

Einfluss der Wärmeaustauscherbauart auf Entfeuchtung und Vereisung



*Dr. Franz Summerer, Dipl.-Phys.
Leiter Forschung und Entwicklung*

Themenschwerpunkte:

- Einfluss verschiedener Faktoren auf die Entfeuchtung (Faktoren: Äußerer und innerer Wärmeübergang, Rohranordnung)
- Beschreibung der Auswirkung von Vereisung auf die Leistung
- Welchen Einfluss hat die Wärmeaustauscherfläche auf die Vereisung? Zusammenhang zwischen Größe der Oberfläche und Dicke der Eis- bzw. Reifschicht
- Darstellung der Vorteile von hocheffizienten Verdampfern mit ausreichend dimensionierten Wärmeaustauscherflächen und entsprechend verringerter treibender Temperaturdifferenz; resultierende Kosteneinsparungen

Entfeuchtung und Vereisung sind bei Luftkühlern fast unvermeidbare Begleiterscheinungen, die in der Regel nicht erwünscht sind. Die Entfeuchtung der Luft beeinflusst bei offenen Waren wie etwa Obst und Gemüse die Qualität und die Haltbarkeit der Ware und sollte schon allein aus diesem Grund möglichst gering sein. Bei Verdampfungstemperaturen unter dem Gefrierpunkt führt die Entfeuchtung zudem auch zur Vereisung der Lamellen und somit direkt oder indirekt zu einem erhöhten Energieverbrauch.

Die Bauart eines Luftkühlers, insbesondere die Struktur der Lamelle und die Rohranordnung, hat einen großen Einfluss auf die Entfeuchtungswirkung und auf die Vereisung der Lamelle. Einen ebenso großen Einfluss haben jedoch auch die Betriebsparameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchte und Verdampfungstemperatur. Häufig wird der Einfluss des Luftkühlers falsch bewertet und man setzt bewusst Luftkühler mit schlechten Wärmeübergangskoeffizienten ein, anstatt die Betriebsparameter entsprechend zu verändern. Umgekehrt werden aber auch oft hocheffiziente und damit kostengünstige Luftkühler bei Bedingungen eingesetzt, für die sie nicht geeignet sind.

Dieser Beitrag soll einen Einblick über die Zusammenhänge zwischen Wärmetauscherbauart, Betriebsparameter, Vereisung und Entfeuchtung geben und als Hilfe für die richtige Auswahl dienen.

1 Entfeuchtung

1.1 Theoretische Grundlagen

Kühlt sich Luft an einer kalten Oberfläche ab, so bleibt zunächst die absolute Feuchte konstant, d.h. die relative Feuchte nimmt zu. Wenn schließlich die Taupunkttemperatur der Luft unterschritten ist, so fängt die Feuchte an, auszukondensieren. Die Voraussetzung, dass Feuchte ausgeschieden wird, ist also, dass die Temperatur dieser Oberfläche unter der Taupunkttemperatur liegt.

Bei einem Luftkühler ist diese Oberfläche die Lamelle. Liegt also die Temperatur der Lamellenoberfläche unter der Taupunkttemperatur der eintretenden Luft, so fällt Feuchte aus. Die Luft muss jedoch am Austritt nicht notwendigerweise gesättigt sein, weil nicht der gesamte Luftstrom tatsächlich Kontakt zur Lamelle hat. Im Model teilt man deshalb die durch den Kühler strömende Luft in zwei Anteile auf: Der eine Anteil berührt die Lamelle und kühlt sich bis auf deren Oberflächentemperatur ab. Der zweite Teilstrom geht dagegen ungehindert durch den Luftkühler. Nach dem Luftkühler mischen sich die beiden Teilströme wieder (Abbildung 2).

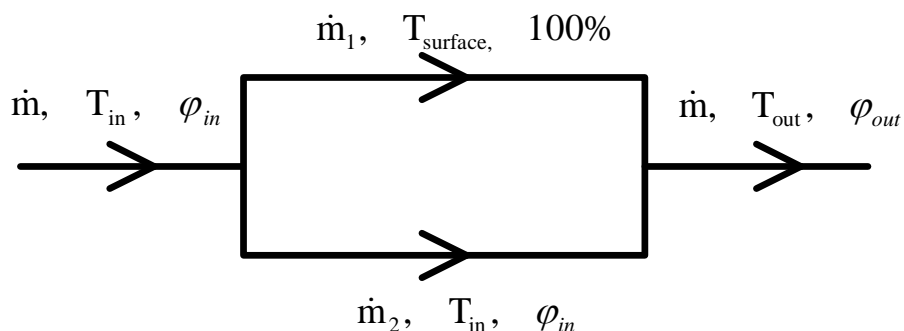


Abbildung 1: Model für die Luftteilströme in einem Luftkühler

Liegt die Oberflächentemperatur $T_{surface}$ unter der Taupunkttemperatur, so wird die Luft des Teilstroms 1 zwangsläufig gesättigt sein, d.h. ihre Feuchte $\varphi_1 = 100\%$. Die Mischung der beiden Teilströme führt dann zum Austrittszustand der Luft. Dieser Zustand liegt im hx-Diagramm auf der Mischungsgeraden.

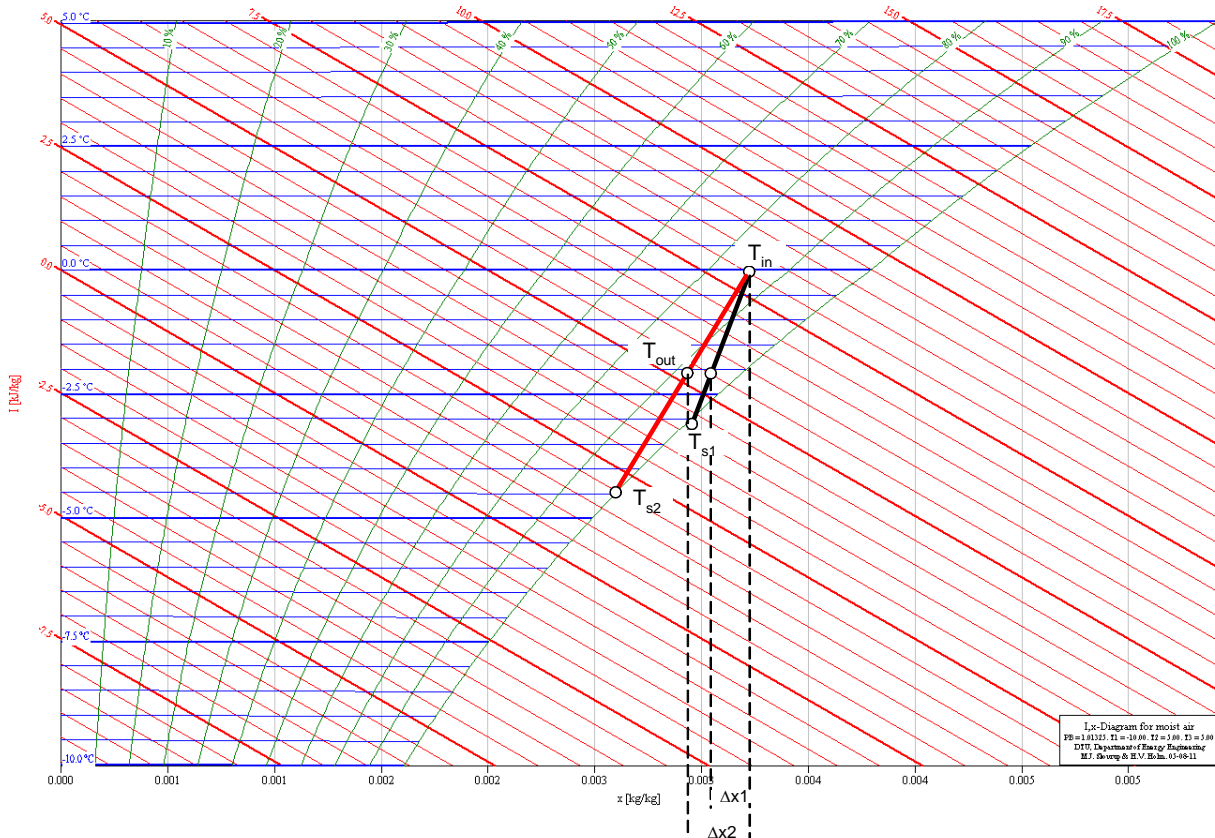


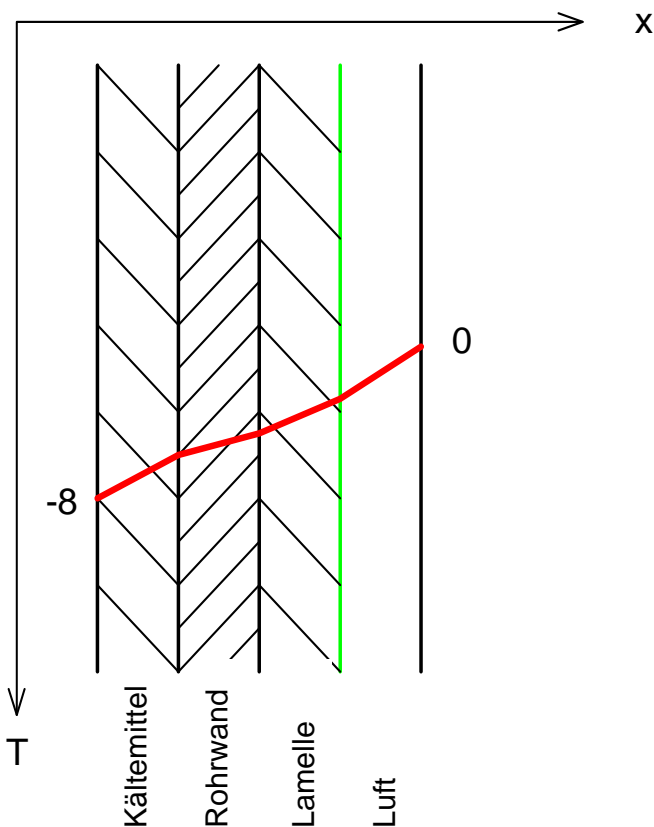
Abbildung 2: Verlauf der Entfeuchtung im hx-Diagramm

Abbildung 2 zeigt diese Mischungsgerade für zwei verschiedene Oberflächentemperaturen T_{s1} und T_{s2} . Im einen Fall liegt die Oberflächentemperatur bei -3°C , im 2. Fall bei -4.5°C . Die Lufttemperatur liegt jeweils bei 0°C , die relative Feuchte bei 85% und die Luftaustrittstemperatur bei -2°C . Man sieht, dass allein aufgrund der geringeren Oberflächentemperatur im Fall 2 die Entfeuchtung größer ist.

Durch die Entfeuchtung kommt es zu einer Leistungssteigerung, weil die Kondensation an der Lamelle zu einem sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten führt. Tatsächlich jedoch ist diese zusätzliche Leistung nutzlos, weil sie nicht zur Luftabkühlung beiträgt. Man unterscheidet deshalb die latente Kälteleistung, die ausschließlich durch die Kondensation bewirkt wird, sowie die sensible Kälteleistung, die durch die Abkühlung der Luft erfolgt. Im Idealfall wird die Kondensationsleistung zusätzlich erbracht, ohne Einbuße an sensibler Kälteleistung, real wird die sensible Kälteleistung jedoch etwas kleiner.

1.2 Einfluss des äußeren Wärmeübergangs auf die Entfeuchtung

Wie in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt, spielt die Oberflächentemperatur der Lamelle eine entscheidende Rolle bei der Entfeuchtung. Durch eine effektivere Lamelle, d.h. eine Lamelle mit hohem Wärmeübergangskoeffizienten, lässt sich bei gleicher Leistungsdichte am Luftkühler die Oberflächentemperatur erhöhen. Dies lässt sich durch folgende einfache Überlegung erklären (Abbildung 3):



Die Wärme hat in einem Luftkühler verschiedene Widerstände zu überwinden: Zunächst von der Luft auf die Lamelle, dann durch die Lamelle zur äußeren Rohrwand, durch die Rohrwand hindurch und schließlich von der inneren Rohrwand auf das Kältemittel.

Je größer der Widerstand bzw. je kleiner der Wärmeübergangskoeffizient durch eine Schicht, umso größer muss bei gleicher Leistungsdichte der Temperaturgradient sein, d.h. der Temperaturverlauf ist steiler.

Erhöht man nun den äußeren (=luftseitigen) Wärmeübergang, indem man beispielsweise die Lamelle stärker strukturiert, so kann die gleiche Leistung je Fläche bei kleinerem Temperaturgradienten übertragen werden (gestrichelte Linie in Abbildung 4).

Abbildung 3: Wärmewiderstände bei einem lamelliertem Wärmeaustauscher

Da sich an allen anderen Wärmewiderständen nichts verändert hat und die gleiche Leistung je Fläche übertragen werden soll, muss sich in diesem Bereich die Linie einfach parallel nach oben verschieben.

Als Resultat ergibt sich eine höhere Verdampfungstemperatur, was sich vorteilhaft auf den COP der Kälteanlage auswirkt. Die höhere Oberflächentemperatur führt aber auch zu weniger Entfeuchtung.

In der Praxis werden Verbesserungen des Wärmedurchgangswertes meistens dazu benutzt, die Leistungsdichte des Luftkühlers zu steigern. In der Regel kann man davon ausgehen, dass ein effizienterer Luftkühler bei der gleichen Temperaturdifferenz eingesetzt wird wie der ineffiziente. Eine Steigerung des äußeren Wärmeüberganges durch eine effizientere Lamelle wird also zu einer höheren Leistungsdichte führen.

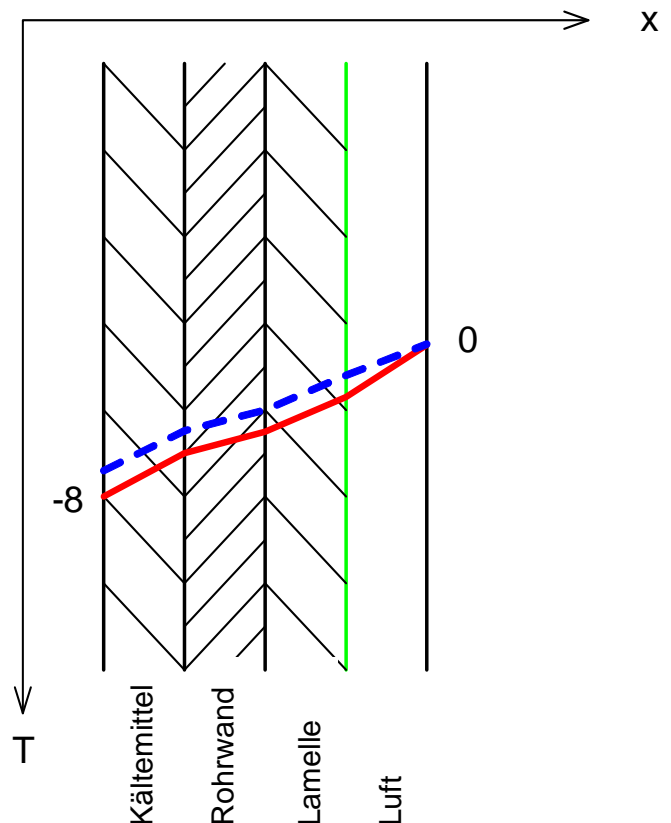


Abbildung 4: Temperaturverlauf bei erhöhtem äußerem Wärmeübergang und gleichbleibender Leistungsdichte

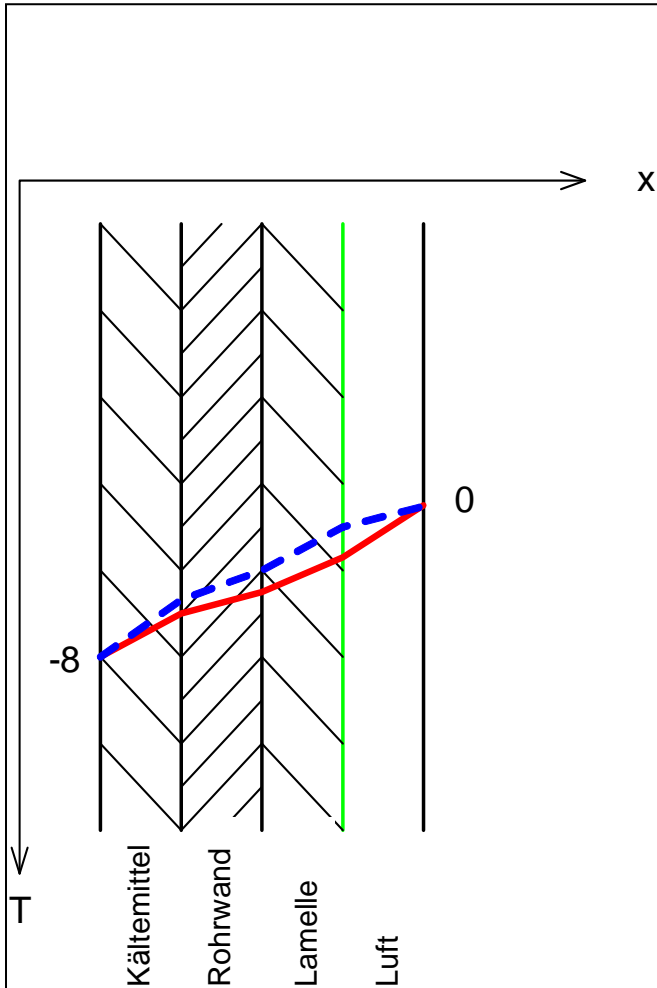


Abbildung 5: Temperaturverlauf bei erhöhtem äußeren Wärmeübergang und erhöhter Leistungsdichte

Ein
e

höhere Leistungsdichte kann vom Kältemittel auf das Rohr und auch durch die folgenden Wärmewiderstände nur übertragen werden, wenn der Temperatur-gradient steigt, da sich ja am Wärmeübergang hier nichts verändert hat. Somit ergibt sich der Verlauf der gestrichelten Linie in Abbildung 5. Trotz höherer Leistungsdichte steigt also die Temperatur der Lamellenoberfläche an und die Entfeuchtung geht zurück.

Eine effektivere Lamelle führt also auch bei gleichbleibender Temperaturdifferenz und somit bei erhöhter Leistungsdichte zu einer geringeren Entfeuchtung. Zu mehr Entfeuchtung durch effizientere Lamellen kann es nur kommen, wenn man nun zusätzlich die absolute Leistung des Luftkühlers bei gleichbleibender Luftmenge erhöht, weil sich in diesem Fall die Luft stärker abkühlt und somit auch die Oberflächentemperatur im Mittel abnehmen kann.

1.3 Einfluss des inneren Wärmeübergangs auf die Entfeuchtung

Der Einfluss des inneren Wärmeübergangs, auf die Oberflächentemperatur und somit auf die Entfeuchtung lässt sich mit der gleichen Symbolik beschreiben. Wird der innere Wärmeübergang erhöht, z.B. durch innenberippte Rohre, so kann man dies entweder dazu nutzen, die Temperaturdifferenz bei gleicher Leistungsdichte zu verkleinern, oder, wie das leider häufig der Fall ist, die Leistungsdichte des Luftkühlers zu erhöhen. Es lässt sich jedoch auch ohne symbolische Darstellung schnell feststellen, dass ohne Änderung des äußeren Wärmeübergangs die gleiche Leistungsdichte nur mit der gleichen Temperaturdifferenz zwischen Luft und Lamelle und somit mit der gleichen Oberflächentemperatur möglich ist. Genauso muss eine Steigerung der Leistungsdichte zwangsläufig zu einer geringeren Oberflächentemperatur führen.

Eine Steigerung des inneren Wärmeübergangs kann also niemals zu einer geringeren Entfeuchtung führen. Wird dadurch die Leistungsdichte des Luftkühlers erhöht, so wird dies zwangsläufig zu einer höheren Entfeuchtung führen.

Als Gesamtergebnis lässt sich der Einfluss von innerem und äußerem Wärmeübergang anhand von Abbildung 6 darstellen, wo die Oberflächentemperatur der Lamelle gegen das Verhältnis von innerem zu äußerem Wärmeübergang aufgetragen ist.

Mittlere Lamellenoberflächentemperatur

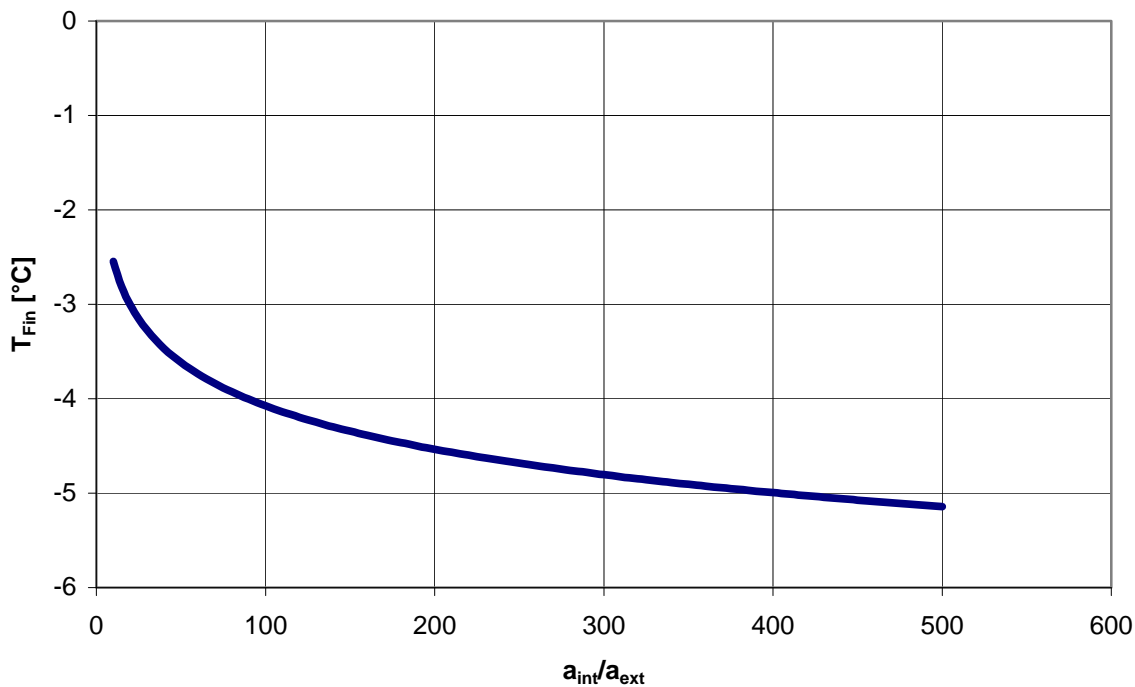


Abbildung 6: Einfluss des inneren und äußeren Wärmeübergangs auf die Oberflächentemperatur

1.4 Einfluss der Rohranordnung auf die Entfeuchtung

Eine Verringerung der Entfeuchtung ist bei sonst gleichen Bedingungen nur möglich, wenn man die Oberflächentemperatur der Lamelle erhöht. Dies kann natürlich immer durch eine Verringerung der Temperaturdifferenz erreicht werden. Alle Maßnahmen jedoch, die die Bauart des Luftkühlers betreffen, können nur dann zu einer höheren Oberflächentemperatur führen, wenn der luftseitige Wärmeübergang erhöht wird.

Eine Erhöhung des luftseitigen Wärmeübergang ist jedoch auf verschiedene Weise möglich, nämlich zum einen durch die Struktur der Lamelle, zum anderen aber auch durch die Rohranordnung. Ein kleiner Rohrabstand und eine versetzte Rohranordnung hat einen größeren luftseitigen Wärmeübergang als eine fluchtende Rohranordnung mit großen Rohrabständen. Allerdings hat das Verändern der Rohranordnung zwei für die Entfeuchtung gegenläufige Folgen.

Geht man beispielsweise von einer fluchtenden Rohranordnung mit großem Rohrabstand auf eine versetzte Anordnung mit geringerem Rohrabstand, so ändert sich zum einen der Lamellenwirkungsgrad. Dies würde in der symbolischen Darstellung gemäß Abbildung 3 bis 5 dazu führen, dass bei einer höheren Leistungsdichte die Lamellenoberflächentemperatur niedriger sein muss, um die höhere Leistung zu übertragen. Dem entgegen wirkt jedoch der zugleich erhöhte Wärmeübergangskoeffizient der versetzten Lamelle. Eine pauschale Aussage, ob ein versetztes Rohrsystem mehr oder weniger entfeuchtet als ein fluchtendes, ist also gar nicht möglich. Wenn man jedoch die Grundregel beachtet, dass eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten nie zur Steigerung der Leistungsdichte genutzt werden sollte, sondern zu einer Verringerung der treibenden Temperaturdifferenz, dann ist zweifelsfrei die versetzte Rohranordnung vorteilhafter.

2 Vereisung

Liegt die Oberflächentemperatur der Lamelle unter 0°C , so gefriert die kondensierende Luftfeuchte und es baut sich langsam eine Eis- bzw. Reifschicht auf der Lamelle auf. Die Konsistenz dieser Eisschicht hängt ebenfalls von der Lamellentemperatur ab – je tiefer die Temperatur, umso geringer die Dichte des Eises. Diese Eisschicht hat eine isolierende Wirkung, so dass mit zunehmender Vereisung der Wärmeübergang immer weiter abnimmt. Zusätzlich steigt der luftseitige Druckverlust, so dass sich auch die Luftmenge reduziert. Beides führt dazu, dass die Verdampfungstemperatur langsam absinkt und somit der Energieverbrauch am Verdichter steigt. Je nach Lamellenabstand kann eine mehr oder minder große Eisschicht toleriert werden, bis schließlich abgetaut werden muss.

Die Abtauung wird bei kleineren Luftkühlern meistens elektrisch durchgeführt und verbraucht ebenfalls Energie. Somit führt die Vereisung einmal direkt zu einem erhöhten Energieverbrauch aufgrund der sinkenden Verdampfungstemperatur und zudem indirekt durch die für die Abtauung benötigte elektrische Energie sowie die Energie, die nach dem Abtauen wieder für die Abfuhr der Abtauenergie erforderlich ist.

Noch unangenehmer als der Energieverbrauch jedoch ist für die meisten Anlagenbetreiber die lange Stillstandzeit während der Abtauung. Ein Abtauzyklus dauert in der Regel zwischen 30 und 40 min. Während dieser Zeit kann nicht gekühlt werden und es besteht Gefahr für die Ware. Die Abtauung sollte deshalb nur sehr selten vorgenommen werden müssen, das heißt wiederum, dass die Vereisung so gering wie möglich sein sollte.

2.1 Einfluss der Wärmetauscherfläche auf die Vereisung

Wie in Abschnitt 1 erläutert, hängt die Menge des ausgeschiedenen Kondensats von der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Luftmenge und der mittleren Oberflächentemperatur der Lamelle ab. Natürlich gilt der gleiche Zusammenhang auch für die Vereisung, allerdings spielt hier noch die Oberfläche des Wärmeaustauschers eine wichtige Rolle. Denn je kleiner der Kühler, umso weniger Fläche hat die gesamte Eismenge zur Verfügung und umso schneller wächst deshalb die Dicke der Eis- bzw. Reifschicht. Ein hocheffizienter Luftkühler wird also, wenn er bei der gleichen Bedingung die gleiche Leistung erbringt, wesentlich schneller bereifen als ein entsprechender Luftkühler mit geringerem Wärmeübergang. Für die reine Entfeuchtung dagegen spielt die Fläche des Wärmeaustauschers keine Rolle.

Dieses ungünstige Bereifungsverhalten der hocheffizienten Luftkühler hat dazu geführt, dass auch heute noch häufig Luftkühler mit schlechten Wärmeübergangskoeffizienten eingesetzt werden. Bei genauer Überlegung ist dies jedoch ziemlich unsinnig, denn anstatt einen Luftkühler zu wählen, der ineffektiv und groß ist, wäre man wesentlich besser beraten, einen gleich großen, effizienten Luftkühler einzusetzen und dafür entsprechend die treibende Temperaturdifferenz zu verkleinern. Dies sei an folgendem einfachen Beispiel gezeigt, bei dem verschiedene Wärmetauschertypen verglichen werden:

Wärmeaustauscher A: $A = 100 \text{ m}^2$; $k = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wärmeaustauscher B: $A = 50 \text{ m}^2$; $k = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wärmeaustauscher A und B erbringen jeweils bei der gleichen Bedingung die gleiche Kälteleistung. Beträgt beispielsweise die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz 10 K, so kommen beide auf eine Leistung von 20 kW. Wärmeaustauscher B ist mit nur 50 m^2 sicher die billigere Lösung. Allerdings hat der Wärmeaustauscher B dann genau diese Nachteile die einem hocheffizienten Luftkühler nachgesagt werden: Schnelle Vereisung und somit häufiges Abtauen, was viele dazu verleitet, Wärmeaustauscher vom Typ A einzusetzen. Doch anstatt viel Geld für ineffiziente Fläche auszugeben, wäre es wesentlich sinnvoller dieses Geld in einen effizienten Wärmeaustauscher zu investieren, wie etwa in den Typen C:

Wärmeaustauscher C: $A = 100 \text{ m}^2$; $k = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dieser Wärmeaustauscher kostet kaum mehr als Typ A, erreicht aber die 20 kW bei der halben Temperaturdifferenz. Das heißt die Verdampfungstemperatur kann entsprechend erhöht werden. Für die Bereifung steht also die gleich große Fläche zur Verfügung wie beim Typ A, jedoch ist die Entfeuchtung und damit auch die

Bereifung erheblich niedriger als beim Typ A, weil die Verdampfungstemperatur und damit auch die Oberflächentemperatur der Lamelle wesentlich höher ist.

Die Annahme, ein hocheffizienter Luftkühler würde schneller bereifen, stimmt also nur, wenn dieser falsch eingesetzt ist, nämlich dann, wenn man ihn bei der gleichen Bedingung betreibt und der hocheffiziente Luftkühler somit deutlich kleiner ist. Vergleicht man jedoch gleiche Flächen, so ist bei dem effizienteren Luftkühler nicht nur die Entfeuchtung geringer, sondern auch der Eisaufbau erfolgt deutlich langsamer.

3 Zusammenfassung

Die von einem Luftkühler verursachte Entfeuchtung der Luft hängt neben den Betriebsbedingungen in erster Linie von der Oberflächentemperatur der Lamelle ab. Je höher die Oberflächentemperatur, umso geringer die Entfeuchtung. Hohe Oberflächentemperaturen lassen sich nur mit hohen luftseitigen Wärmeübergangszahlen, also mit hocheffizienten Lamellen erreichen. Alle anderen Verbesserungen des Wärmedurchgangswertes, wie etwa ein innenberipptes Rohr, führen, wenn sie zur Steigerung der Leistungsdichte genutzt werden, zu einer höheren Entfeuchtung.

Bei der Bereifung spielt neben der Kondensatmenge auch die Fläche eine entscheidende Rolle: Je größer die Fläche umso langsamer wächst die Reifschicht. Allerdings sollten deshalb nicht uneffiziente Luftkühler eingesetzt werden, sondern vielmehr hocheffiziente Luftkühler dazu genutzt werden, die Temperaturdifferenzen am Luftkühler so klein wie möglich zu halten. So lässt sich die Entfeuchtung und auch die Vereisung am effektivsten reduzieren und zudem noch Energie sparen.

Stichworte:

Entfeuchtung, Vereisung, Luftkühler, Lamellenoberflächentemperatur