

Theorie und Praxis einer intelligenten Bedarfsabtauregelung

Peter Roth, Fürstentfeldbruck

Ein unvermeidliches Problem, das bei luftumströmten Wärmetauschern auftritt, ist das der Bereifung und Vereisung. Schon seit Beginn der Kältetechnik tritt dieses Phänomen als ausgesprochen störend, energieverschwendend und teilweise sogar als gefährlich in Erscheinung. Wenn feuchte Luft in Berührung mit kalten Wärmeaustauscherflächen kommt, deren Oberflächentemperatur unterhalb der Taupunktstemperatur der Luft und unterhalb des Gefrierpunktes liegt, tritt unweigerlich Kondensation in Form von Reif oder Eis auf.

Betrachtet man die Folgen der fortschreitenden Bereifung eines Verdampfers aus energetischer Sicht, so weiß jeder Fachmann, daß bei zu seltenem Abtauen zum Teil beträchtliche Energiemengen verschwendet werden. Die Reif- bzw. Eisschicht stellt einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand auf der Oberfläche des Wärmetauschers dar, der immer mehr zunimmt, je dicker die Schicht wird, was sich in einer Erniedrigung des gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten und somit zu einer Kälteleistungsminderung führt.

zum Autor

**Dipl.-Phys.
Peter Roth,**
Abt. Qualitätsmanagement,
Hans Güntner
GmbH, Fürstentfeldbruck



Zusätzlich verringert sich der lichte, luftseitige Strömungsquerschnitt des Wärmetauschers. Die Folge davon ist eine Erhöhung des luftseitigen Druckverlusts und somit eine Verringerung des Luftvolumenstroms. Dies ist wiederum Ursache für eine Leistungserniedrigung. Die Leistungsverluste am Verdampfer führen zu einer Wirkungsgradverschlechterung der gesamten Kälteanlage, was wiederum bedeutet, daß bei zu seltener Abtauerung unnötig viel Energie aufgewendet werden muß, um die Kühlanforderung zu erfüllen.

Aber auch zu häufiges Abtauen, insbesondere wenn es wie in den meisten Fällen mit hochwertiger elektrischer Heizenergie durchgeführt wird, kann zu beträchtlicher Energieverschwendung führen. Die eingesetzte elektrische Energie kann ein Vielfaches von dem sein, was notwendig wäre, um ausschließlich die Reif- bzw. Eisschicht zu entfernen. Neben der eigentlichen Schmelzenergie werden noch folgende Wärmemengen freigesetzt:

- Erwärmung des Wärmetauschers auf die Schmelztemperatur,
- Erwärmung des Wärmetauschers auf die Abtauendtemperatur,
- Erwärmung des Wärmetauschergehäuses,
- Erwärmung der umgebenden Luft,
- latenter Energieübertrag bei der Verdunstung und Verdampfung von Kondensat.

An dieser Stelle muß man sich deutlich vor Augen halten, daß zuviel verbrauchte Abtauenergie doppelt bezahlt werden muß! Zum einen bei der Entstehung, zum anderen muß die nun im Kühlraum eingebrachte Wärmemenge wieder durch zusätzlichen Kühlbetrieb abgeführt werden. Bei Anlagen mit Wirkungsgraden unter 1 beträgt die notwendige Antriebsenergie des Kompressors sogar mehr als doppelt so viel wie die zuvor eingesetzte Abtauenergie. Somit ist man auf der einen Seite bemüht, möglichst selten abzutauen, auf der anderen Seite muß man damit aber einen erhöhten Energieverbrauch im Kühlbetrieb in Kauf nehmen. An dieser Stelle wird deutlich, daß diese Optimierungsaufgabe durch einfache Zeitschaltuhren nicht in den Griff zu bekommen ist.

Aber nicht nur die Energieeinsparung stand im Vordergrund bei der Entwicklung einer Bedarfsabtauregelung. In der Praxis ist der Kälteanlagenbauer immer bestrebt, eine möglichst hohe Betriebssicherheit der Anlage zu realisieren. Dieser Aspekt wird teilweise aus gutem Grund sogar noch höher als die Energieeffizienz einer Anlage bewertet. Wird der Verdampfer während einer Abtauerung nicht vollständig von Reif und Eis befreit, tritt nicht selten der Fall auf, daß es an den nicht abgetauten Stellen zu einem kontinuierlichen Eisaufbau (sogenannte Eisnester) kommt. Das kann dazu führen, daß die Kälteleistung so stark abnimmt, daß die Solltemperatur des Kühlraums nicht mehr gehalten werden kann und somit das Kühlgut Schaden erleidet oder zumindest an Qualität verliert. Auch die Gefährdung des Personals durch die sogenannte Eishöhlenbildung muß unbedingt vermieden werden. Es sind extreme Fälle bekannt, bei denen eine fortschreitende Vereisung (Vergletscherung) des Verdampfers zu dessen Beschädigung und im schlimmsten Fall zum Bruch der Kältemittelleitung geführt haben.

Somit war es Ziel bei der Hans Güntner GmbH, einen Abtaualgorithmus zu finden, der einen Regler in die Lage versetzt, den Bereifungsgrad des Verdampfers zu erkennen und dann selbständig entweder sofort oder unter Einhaltung von gewissen Sperrzeiten (z. B. Kundenverkehr) eine Abtauerung durchführt. Diese Abtauerung soll vollständig und möglichst energieeffizient ablaufen.

In Zusammenarbeit mit der Firma ELREHA GmbH aus Hockenheim wurde ein Projekt in Angriff genommen, bei dem Regelungsstrategien erarbeitet und in einen realen Regler realisiert werden sollten, die die oben dargestellten Kriterien erfüllen. Die Aufgabenteilung wurde so vorgenommen, daß die Firma Güntner für das thermodynamische Konzept und die Erarbeitung und Überprüfung der Strategien im Versuch verantwortlich war. Die Firma ELREHA stellte ihre langjährige und profunde Erfahrung mit elektronischen (Kühlstellen-)Reglern zur Verfügung. Sie setzte die gewonnenen Erkenntnisse in Programcode um und stellte die Regler mit der entsprechenden Hardware und zusätzlicher Auswertesoftware zur Verfügung.

Grundsätzliche Funktionsweise

Der Regelalgorithmus setzt voraus, daß der Verdampferventilator, der Verdichter (bzw. das Magnetventil) und die Abtauerung unabhängig voneinander geschaltet werden können, was in neueren Anlagen sowieso schon Standard ist. Bei der Abtauerung können alle bekannten Arten, wie z. B. elektrische Abtauheizung, Heißgasabtauerung oder Glykolabtauerung, eingesetzt werden.

Zur Beurteilung des Bereifungsgrades braucht der Regler pro Verdampfer als Eingangsgrößen nur die Meßwerte von zwei Temperaturfühlern.

Dabei bleibt es dem Anwender freigestellt, ob er Pt1000-Sensoren oder PTC-Sensoren (TF201) verwenden will. Beide Möglichkeiten sind vorgesehen, wobei jeder Fühler durch eine Istwertkorrektur am Regler bei Bedarf genau kalibriert werden kann. Ein Temperaturfühler wird als Raumtemperaturfühler entweder direkt am Gerät im Lufteintrittsstrom oder an repräsentativer Stelle im Kühlraum montiert. Der zweite Sensor der üblicherweise bei konventionellen Reglern die Aufgabe eines Abtaubegrenzungsfühlers übernimmt, wird als Blockfühler bezeichnet und ist vorzugsweise im Kontaktrohr des Verdampferblocks oder, wie in der Literatur mehrfach beschrieben, von außen am Lamellenpaket zu montieren. Bei allen Standard-Verdampfern der Firma Güntner ist an der geeigneten Stelle ein entsprechendes Kontaktrohr vorhanden.

spielsweise drei Verdampfern nur vier Sensoren: ein Raumtemperatursensor und jeweils ein Blocksensor für jeden Verdampfer. Insgesamt können bis zu sechs Temperatursensoren am Regler angeschlossen und ausgewertet werden. Im weiteren wird der Einfachheit wegen nur noch der Fall für einen Verdampfer betrachtet.

Eine der wichtigsten Eingangsgrößen zur Beurteilung des Bereifungsgrades ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Block- und dem Raumsensor. Zur Veranschaulichung der Temperaturverläufe des Block- und des Raumsensors in bezug auf die Schaltzustände des Verdampferventilators, des Verdichters und der Abtauheizung ist im Bild 3 ein Meßprotokoll während einer Abtauerung dargestellt.

Diese Temperaturdifferenz der beiden Sensoren wird nur während des gleich-



Bild 2 Bei allen Standard-Verdampfern der Fa. Güntner sind die Kontaktrohre schon an den entsprechenden Stellen zur Aufnahme des Blocksensors eingebaut

Zeitigen Verdampferventilator- und Kompressorbetriebes betrachtet. Diese Temperaturdifferenz wächst bei fortschreitender Bereifung an. Dafür sind zwei Mechanismen verantwortlich:

Ist der Verdampfer Teil einer Einzelverdichteranlage, sinkt die Verdampfungstemperatur zum einen aufgrund des zusätzlichen Wärmewiderstandes an der Lamellenoberfläche und zum andern reduziert sich die Luftmenge durch die Verringerung des für die Luft zur Verfügung stehenden freien Strömungsquerschnittes. Die Leistungsanpassung der gesamten Kälteanlage in Richtung niedrigerer Werte wird hauptsächlich durch eine Wirkungsgradverschlechterung durch Absenkung der Verdampfungstemperatur realisiert.

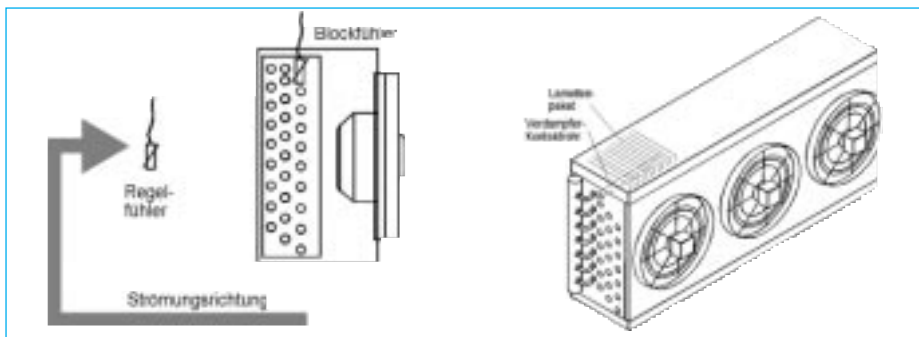


Bild 1 Prinzipielle Anordnung der zwei Temperaturfühler, die zur Beurteilung der Bereifung eines Wärmetauschers benötigt werden

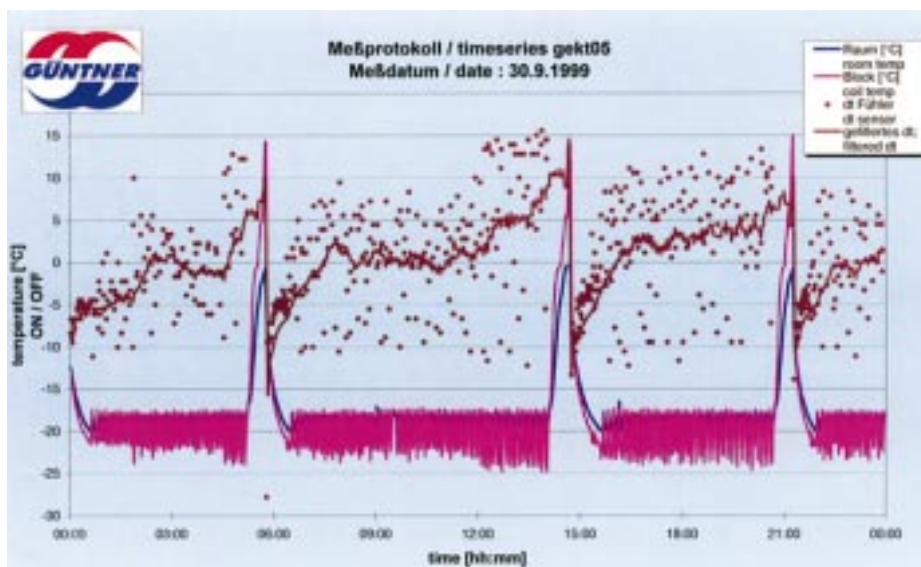


Bild 3 Temperaturverlauf des Raum- und Blockfühlers über einen längeren Meßzeitraum, der sich über drei Abtauungen erstreckt. Der Anstieg der Temperaturdifferenz der beiden Sensoren bei fortschreitender Bereifung ist deutlich zu erkennen

Wird die Verdampfungstemperatur durch externe Regelungen (wie dies zum Beispiel bei Verbundanlagen oder leistungsgeregelten Verdichtern der Fall ist) kontrolliert, sinkt die Temperatur des Blockfühlers trotzdem ab. Der Grund hierfür liegt darin, daß die Reif- und Eisschicht den Fühler zur Luft hin immer weiter thermisch isoliert und er somit immer stärker der Verdampfungstemperatur ausgesetzt ist. Selbst wenn die Verdampfungstemperatur durch die Hysterese der Verbundanlagensteuerung stark schwanken sollte, bleibt der oben beschriebene Effekt bei ausreichender Zeitmittelung erhalten.

Der absolute Betrag, um den die Temperaturdifferenz während der Bereifung ansteigt, ist selbstverständlich kein fester Wert, sondern von vielen Faktoren abhängig (z. B. von der Verdampfergeometrie, Fühlerträgheit und -position, Art und Einstellung des Expansionsventils, Positionierung des Überhitzungssensors, Verflüssigungstemperaturregelung). Somit ist es notwendig, daß der Regler sich auf die konkrete Situation einstellen kann. Was gemeinhin als autoadaptive Regelung bezeichnet wird. In der Praxis gibt es nun verschiedene Möglichkeiten, diesen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Bereifungsgrad und Anstieg der Fühler-temperaturdifferenz zur Festlegung eines Abtauzeitpunktes zu nutzen.

Das realisierte Verfahren arbeitet nicht mit festen Grenzwerten, bei deren Überschreitung eine bestimmte Reaktion erfolgt, sondern verwendet gleitende Bewertungen, die kontinuierlich dem Zustand des Verdampfers angepaßt werden. Dieses Verfahren gewährleistet eine sehr robuste Störgrößenfilterung, die bei kurzzeitigen starken Schwankungen nicht automatisch zur Abtauung führt, sondern versucht, das Zurückkehren der Anlage in den regulären Betrieb abzuwarten. Auf der anderen Seite wurde gleichzeitig sichergestellt, daß auch im Fall schwacher oder fehlender Bereifung eine (Zwangs-)Abtauung nach einer bestimmten Zeitspanne durchgeführt wird. Diese Zeitspanne sollte vom Anwender in Abhängigkeit von der Kühlaufgabe angepaßt werden. Bei Langzeitlageräumen können Zeiträume von mehreren Tagen sinnvoll sein.

Zur Beurteilung des Bereifungsgrades greift der Regler auf die Erfahrung und die Bewertung schon durchgeführter Abtauungen zurück. Daraus wird dann auf die speziellen Umgebungsbedingungen geschlossen und reagiert. Somit stellt sich der Regler z. B. auf die gerade vorherrschende Luftfeuchtigkeit oder auf die Beschickungsintervalle und Anzahl der Begehungen des Kühlraumes ein. Selbst bei Ausfall einzelner Heizstäbe im Verdampfer ist der Regler im begrenzten Umfang in der Lage, diesen Schaden durch häufigeres Abtauen auszugleichen. Nach jeder Abtauung werden die entsprechenden Parameter gleitend bewertet, wobei nicht nur die letzte, sondern eine gewisse Anzahl zurückliegender Abtauungen berücksichtigt wird („gleitendes Gedächtnis“). Es

muß sichergestellt werden, daß der Regler Einzelereignisse nicht zu hoch bewertet, sich aber schnell auf grundsätzlich veränderte Umgebungsbedingungen einstellt. Zum Beispiel darf die Tatsache, daß ein Kühlraum am Wochenende nicht betreten oder beschickt wird, nicht zu einer Veränderung der Parameter führen. Jahreszeitliche Schwankungen der Luftfeuchte, der Kühllast, der Verflüssigungstemperatur, oder grundsätzliche Nutzungsänderungen eines Kühlraumes werden von dem Regelalgorithmus erkannt und berücksichtigt. Deswegen ist es auch plausibel, daß der Regler nach dem anfänglichen „Einschwingen“ sich selbst überlassen werden kann und keine weiteren Wartungs- und Überwachungsarbeiten notwendig sind, was für den Anwender einen Zeit- und Kostenvorteil bedeutet.

Die Auslösung einer Abtauung kann in drei verschiedene Arten unterteilt werden:

- Sofortige manuelle Abtauung, entweder direkt am Regler, oder über einen externen Taster.
- Automatische Abtauung durch den Regler ohne Zeitrestriktion. Der Regler entscheidet völlig frei wann er abtauert und führt diese Abtauung sofort durch.
- Abtauung unter Berücksichtigung von Abtaufreigabezeiten. Diese Regel bietet die Möglichkeit, pro Tag bis zu sechs verschiedene Zeitpunkte festzulegen, an denen eine Abtauung durchgeführt werden darf. Die Verwendung von Abtaufreigabezeiten kann zum Beispiel sinnvoll sein, wenn man vermeiden will, daß bei Kundenverkehr im Kühlraum eine Abtauung stattfindet, oder daß ausschließlich billiger Nachtstrom zur Abtauung benutzt wird, oder daß zu festgesetzten Warenbeschickungszeiträumen keine Abtauungen stattfinden. Aus diesem Grund wurde bei der im Regler integrierten Echtzeituhr eine automatische Sommer-/Winterzeitumstellung vorgesehen um den Wartungsaufwand möglichst gering zu halten.

Durchführung einer Abtauung

Idealerweise soll dem Verdampfer bei einer Abtauung genau so viel Wärme zugeführt werden wie zum Abtauen des kompletten Reif- bzw. Eisansatzes notwendig ist. Wird die Abtauung zu früh abgebrochen, besteht die Gefahr, daß Eisnester entstehen, die auch bei späteren Abtauungen nicht mehr entfernt werden kön-

nen, in der Regel zu einem kontinuierlichen Eisansatz im Laufe der Zeit führen und somit ständig größer werdende Flächen des Wärmetauschers blockieren. Wird die Abtauung zu lange betrieben, wird unnötige Energie verschwendet, die dann im nachfolgenden Kühlbetrieb unter weiterem Energieaufwand wieder aus dem Kühlraum abtransportiert werden muß.

Sehr viel schwerwiegender ist jedoch das Phänomen, daß bestimmte Stellen im Verdampfer so heiß werden können, daß abtropfendes Wasser verdampft und an kalten Oberflächen wieder auskondensiert. Es kann bei diesen Situationen zum Eisansatz am Ventilatorflügel und am Ventilatorgitter kommen. Am Kühlgut und an den Kühlraumwänden bilden sich Reif- und Eisschichten. Deshalb wurde großer Wert auf die sinnvolle Abstimmung der einzelnen Abtauphasen vor, während und nach einer Abtauung gelegt (Bild 4).

Nach Auslösung einer Abtauung kommt es zu einem obligatorischen Ventilatorlauf bei ausgeschalteter Kühlung. Dadurch soll erreicht werden, daß der Wärmeaustauscherblock noch möglichst viel „Kälte“ abgibt, die einerseits im Hinblick auf die anschließende Kühlunterbrechung im Kühlraum deponiert werden kann und andererseits die zusätzlich aufzubringende elektrische Abtauenergie verringert.

Danach wird die Abtauheizung eingeschaltet, bis der Blockfühler deutlich wärmer als 0 °C ist und somit zumindest in der unmittelbaren Umgebung des Sensors das Eis geschmolzen ist. Die Abtauheizung schaltet sich aus und der weitere zeitliche Temperaturverlauf des Blockfühlers wird beobachtet. Aufgrund der Nachwärme der Heizstäbe und der begrenzten Wärmeleitung steigt die Blocktemperatur weiterhin an. Dieser Anstieg wird von mehreren Faktoren beeinflusst, wie z. B. von der noch vorhandene Reifmenge am Block, der Entfernung des Sensors und vom nächsten Heizstab, der thermischen Ankopplung des Sensors zum Block, der installierten Heizleistung pro Wärmetauscherfläche, etc. Die Heizung wird nun solange ein- und wieder ausgeschaltet, bis der Blockfühler die Abtauendtemperatur erreicht hat. Dieses Vorgehen kann als taktende Abtauendregelung mit festem Einschaltverhältnis und variabler Intervalllänge bezeichnet werden, da es vom konkreten zeitlichen Temperaturverlauf des Blocksensors beeinflusst wird.

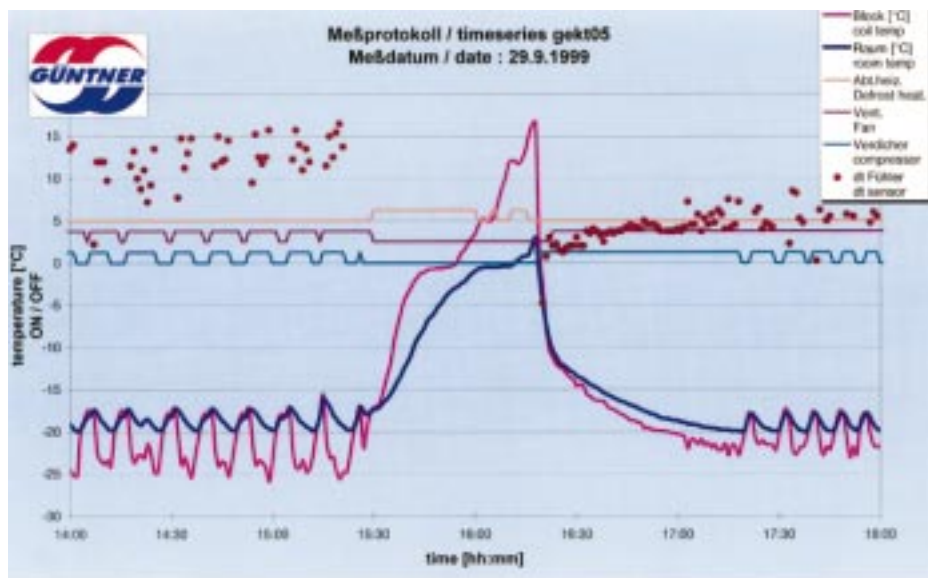


Bild 4 Temperaturverlauf des Raum- und Blockfühlers über den Zeitraum einer Abtauung

Mit diesem Verfahren wurde versucht, keine festen bzw. konstanten Zeiten beim taktenden Abtauende zu verwenden, da verschiedene Verdampfer unterschiedliche Zeitverhalten aufweisen können. In

der Praxis hat sich gezeigt, daß bei Tiefkälteanwendungen die Abtauheizung zwei- bis dreimal ausgeschaltet wird, bei Normkälteanwendungen kein- bis einmal getaktet wird.

Die Vorteile dieser Regelung liegen an der Tatsache, daß die Abtauung „sanft“ beendet wird:

- Es treten keine extrem hohen Temperaturen mehr am Wärmetauscher auf. Besonders in der unmittelbaren Nähe von Heizstäben bestand die Gefahr, daß Temperaturen von bis zu 100 °C auftreten konnten. Das abtropfende Kondensat verdunstet oder verdampft an diesen Stellen, was zur Nebelbildung um den Verdampfer führt, der sich ungünstigerweise dann an Gehäuseteilen, Ventilatoren und Ventilatorgittern, Kühlraumwänden und am Kühlgut als Reif, später als Eis niederschlägt.
- Dem Verdampfer wird Zeit gelassen, damit sich die eingebrachte Wärme möglichst gleichmäßig verteilt. Eine von einem Heizstab weit entfernte Stelle wird nicht durch die Erhöhung der treibenden Temperaturdifferenz möglichst schnell, sondern möglichst energieeffizient abgetaut. Damit geht einher, daß eine taktende Abtauung normalerweise etwas länger dauert, als eine konventionelle Abtauung. Gleichzeitig ist

aber zu bedenken, daß die eingesetzte Abtauenergie in der Regel geringer ausfällt, als nach der üblichen Methode, was wie oben beschrieben energetisch doppelt zählt und daß die Qualität der Abtauung (Vermeidung von Eisnestern, geringere Wasserdampferzeugung) sich in Hinblick auf die Betriebssicherheit der Anlage und in der Erhöhung des Wirkungsgrades im anschließenden Kühlzyklus positiv auswirkt.

- Die Abtaubegrenzungs-temperatur kann gesenkt werden.

Nach Überschreiten der maximalen Abtauendtemperatur und dem Ausschalten der Abtauheizung verstreicht eine vom Anwender festlegbare „Abtropfzeit“, in der das schon geschmolzene, sich aber noch auf der Lamelle befindliche Kondensat ablaufen kann. In der nun folgenden „Anlaufverzögerungszeit“ (bzw. „Anfrierzeit“) wird das Magnetventil geöffnet, bzw. der Verdichter gestartet, aber die Ventilatoren noch nicht eingeschaltet. Dies soll vermeiden, daß feuchtwarme Luft und Kondensattropfen aus dem Verdampfergehäuse in den Kühlraum geblasen werden. Außerdem verkürzt eine schnell

abfallende Verdampfungstemperatur bei Einzelverdichteranlagen die belastenden Anfahrzustände am Verdichter.

In der neuesten Version des Reglers, der als Regler mit freier Ressourcenvergabe bezeichnet wird, besteht die Möglichkeit, bis zu vier Sensoren als Blockfühler eines Verdampfers zu verwenden. Bei der Bildung der oben beschriebenen Temperaturdifferenzen, die für die Durchführung des taktenden Abtauende benötigt werden, wird der kälteste der Blockfühler als relevante Blocktemperatur herangezogen. Das bedeutet, daß der kälteste Fühler die Abtauheizung ausschaltet. Der Regler findet sozusagen die kälteste der mit Sensoren überwachten Stellen im Verdampfer und richtet seine Regelung danach aus. Sollte während der Abtauung ein anderer Fühler als der momentan relevante zum kältesten Fühler werden, wird dieser Wechsel vom Regler berücksichtigt. Somit wird die Sicherheit vor Eisnestern besonders bei Blöcken mit großen Eintrittsquerschnitten verbessert, da an jede kritische Stelle ein Sensor gesetzt werden kann. Insbesondere bei Doppelblock-Verdampfern (z. B. DHN,

GBK, ... des Fabrikates Güntner) bietet sich durch den neuen Regler die Möglichkeit, in jeden Block einen Abtaubegrenzungsfühler zu plazieren. Somit wird der Gefahr begegnet, daß mit nur einem Sensor die Vereisung des jeweils anderen Doppelblockwärmetauschers übersehen werden könnte.

Notbetrieb

Ein wichtiges Kriterium für die Zuverlässigkeit eines Abtaureglers ist, die Fähigkeit zu erkennen, ob extreme äußere Bedingungen vorliegen, die mit den normalen Regelstrategien nicht mehr oder zu langsam zu beherrschen sind und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Solche Fälle treten zum Beispiel auf, wenn der Kühlraum mit ungewöhnlich feuchter Ware beschickt wird, die Kühlraumtüren sehr lange offen stehen oder der Verdampfer abgespritzt wird, um nur einige Beispiele zu nennen. Selbstverständlich wird auch ein Fühlerbruch erkannt, in der Fehlerhistorie des Reglers mit Zeitstempel dokumentiert und entsprechende Stör- bzw. Warnmeldungen ausgelöst.

Als signifikantes Merkmal zur Erkennung des Versagens der Abtauregelung wurde die Überschreitung der maximalen Abtaudauer gewählt. Wird die maximale Abtaudauer überschritten, wird die Zeit bis zur nächsten obligatorischen Abtaung deutlich verringert. Die Arbeit des Kühlalgorithmus bleibt davon aber unberührt und läuft weiter. Der Regler beobachtet weiter das Verhalten des Verdampfers und kann selbständig erkennen, ob die Ausnahmesituation noch vorliegt. Der Notbetrieb wird automatisch zurückgesetzt, wenn die Störung behoben ist und sich die Anlage wieder in regulären Arbeitszuständen befindet.

Kühlbetrieb

Schon während des Kühlbetriebs können Maßnahmen getroffen werden, die einen Reifansatz zu verhindern suchen. Zu diesem Zweck wird der Verdampferventilator nach dem Ausschalten des Kompressors (bzw. Magnetventils) einige Zeit weiter betrieben. Dadurch wird erreicht, daß der noch kalte Wärmetauscherblock auch ohne Verdichterbetrieb Wärme aufneh-

men kann und somit zu einer Reduzierung der Verdichterstarts beitragen kann, was sich in einer Energieeinsparung niederschlägt und die Lebensdauer des Verdichters erhöht.

Die für die Bereifung wichtigere Folge ist jedoch, daß eine gewisse Rückbefeuchtung des Raumes durch die an den nun nahezu raumwarmen Lamellen befindliche Feuchtigkeit stattfindet. Dieser Effekt tritt nicht nur bei Raumtemperaturen über 0 °C, sondern auch darunter auf. Da nur die Partialdruckdifferenz für den Feuchtetransport verantwortlich ist und selbstverständlich auch Eis einen Wasserdampfdruck besitzt, wird nachweislich die Kondensatmenge auf der Lamelle verringert. Besonders deutlich ist dieser Effekt aber in Räumen mit Raumtemperaturen über dem Gefrierpunkt. Hier wird schon während der eigentlichen Kühlphase versucht, bei ausgeschaltetem Kompressor aber eingeschaltetem Ventilator eine kontinuierliche Umluftabtaung durchzuführen.

Die Verringerung des Gewichtsverlustes von unverpackter Ware durch die Rückfeuchtung des Kühlraums wird eben-

falls gebremst, was einer höheren Warenqualität zu Gute kommt.

Sondermodus positive Raumtemperatur

Wie allgemein bekannt ist, können Verdampfer schon bei Raumtemperaturen über + 2 °C mit Umluft abgetaut werden. Bei dieser Abtauart wird keine externe Energie zum Beispiel mittels Kältemittelheißgas oder el. Energie durch Heizstäbe zugeführt, sondern die Verdampferventilatoren werden bei abgeschalteter Kühlung (geschlossenes Magnetventil, abgeschalteter Verdichter) solange betrieben, bis die gesamte Reif- und Eisschicht abgeschmolzen ist. Die „warme“ umgewälzte Luft stellt eine über den Wärmetauscher sehr gleichmäßig verteilte Wärmequelle dar. Dieses Prinzip, das ausgesprochen energiesparend ist und eine Kühlgut schonende Rückbefeuchtung des Kühlraumes gewährleistet, wird, wie beschrieben, bei dem vorliegenden Regelalgorithmus schon während der eigentlichen Kühlperiode ausgenutzt.

Zusätzlich zum obligatorischen zeitlich vom Anwender festgesetzten Ventilatorlauf nach jedem Erreichen der Raumsolltemperatur, werden bei Raumsolltemperaturen über + 2,5 °C die Verdampferventilatoren so lange nicht ausgeschaltet, bis der Blockfühler eine bestimmte Temperatur überschritten hat. Diese Ausschalttemperatur des Blockfühlers wird von der Raumsolltemperatur abhängig festgelegt. Der Funktionsverlauf stellt einen Kompromiß zwischen der Forderung einer möglichst vollkommenen Entfernung des Kondensats und einem unerwünschten Energieeintrag durch den Ventilatorbetrieb dar. Nicht nur die eigentliche am Ventilator in Wärme umgesetzte elektrische Energie, sondern auch der auf Grund der Luftbewegung erhöhte Wärmeübergang auf den inneren Kühlraumwänden trägt nämlich zum Wärmeeintrag bei.

Bei Raumtemperaturen über + 2,5 °C ist darauf zu achten, daß die vom Anwender einstellbare Zeitspanne bis zur nächsten Abtauung deutlich höher gewählt werden soll, als bei tieferen Temperaturen. Ist die Zeitspanne abgelaufen, wird nämlich in jedem Fall eine Abtauung eingeleitet, egal ob diese notwendig ist oder nicht. Die dann durchgeführte Abtauung wird zwar deutlich kürzer ausfallen, als ohne den verlängerten Ventilatorlauf, ein zusätzliches Energieeinsparpotential würde jedoch bei zu kurzer Abfolge von Abtauungen verschenkt werden.

Verhalten bei mehreren Verdampfern pro Kühlstelle

In der Praxis wird bei großen Kühlräumen die Verwendung von mehreren Verdampfern pro Kühlstelle (Kühlraum) notwendig. Aufgrund des neuen Reglerkonzeptes mit freier Ressourcen-Vergabe ist ein einzelner Regler in der Lage, Kühlräume mit bis zu drei Verdampfern anzusteuern. In der Literatur wird empfohlen, alle Verdampfer eines Kühlraumes gleichzeitig abzutauen. Dadurch wird vermieden, daß die feuchtwarme Luft eines abtauenden Verdampfers durch die Luftbewegung von kühlenden Verdampfern aus dem Gehäuse in den Kühlraum geblasen wird. Dadurch wird zum einen die Abtauung unnötig in die Länge gezogen und zum anderen setzt sich die Feuchtigkeit im Kühlraum und in den kühlenden Verdampfern ab. Somit wird im schlimmsten Fall die abzutauende Feuchtigkeit von einem Verdampfer an den nächsten weitergegeben.

Da alle Verdampfer gleichzeitig abgetaut werden, muß der am meisten bereifte Verdampfer die Auslösung der Abtauung bestimmen. Da dies bei der Installation in der Regel noch nicht klar ist, nach welchem Verdampfer sich die Abtauung richten muß, ist der Regler in der Lage, den Führungsverdampfer selbstständig zu erkennen und diese Wahl bei veränderten Umgebungsbedingungen zu korrigieren und anzupassen. Im Regelfall bereifen die Verdampfer in der Nähe der Türen am schnellsten.

Praxisverhalten

In Laborversuchen, an einem extra dafür gebauten Versuchsstand, der zeitlich und mengenmäßig unterschiedliche Luftfeuchtigkeiten der Kühlraumluft realisieren kann, wurden die einzelnen Regelstrategien entwickelt und unter unterschiedlichsten Bedingungen an mehreren Verdampfern getestet. In Feldversuchen und bei ersten regulären Installationen wurde die Zuverlässigkeit und Alltagstauglichkeit des Reglers unter Beweis gestellt.

Die intelligente Bedarfsabtaueregulierung soll anhand eines Temperaturprotokolls dargelegt werden, das in einem Tiefkühlraum eines mittelständischen Fleischverarbeitungsbetriebes aufgezeichnet worden ist (Bild 5). Der Regler lief im Modus „ohne Zeitrestriktion“, der ihm die Freiheit läßt, zu beliebigen Zeiten und beliebig oft abzutauen.

Die markanten Spitzen stellen die höchsten Blocksensortemperaturen der jeweils automatisch eingeleiteten Abtauungen dar.

An den Wochentagen Mittwoch und Donnerstag wurde aufgrund eines normalen Produktionstages der Kühlraum so stark belastet, daß durchschnittlich vier Abtauungen pro Tag notwendig waren. Da in diesem Betrieb freitags nur bis Mittag gearbeitet wird, kam es an diesem Tag nur noch zu zwei Abtauungen. Weil am Samstag und Sonntag ganztägig nicht gearbeitet wird, ist auch die Feuchtigkeitsbelastung am Verdampfer sehr gering, was

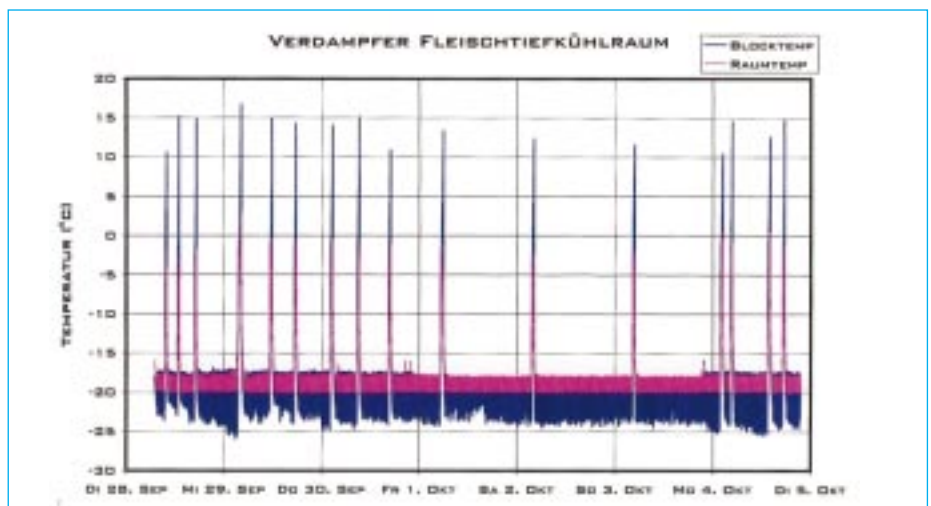


Bild 5 Meßprotokoll eines Tiefkühlraumes in einem fleischverarbeitenden Betrieb. Die Abnahme der Häufigkeit der Abtauungen während eines arbeitsfreien Wochenendes ist deutlich zu erkennen

sich auch in der sehr gleichmäßigen Raum- und Blocktemperatur ablesen läßt. Der Regler hat dies selbständig erkannt und reduzierte die Anzahl der Abtauungen auf eine pro Tag. Am Montag, zu Beginn der Produktionswoche ging die Anzahl der Abtauungen schlagartig wieder nach oben.

Zusätzliche Eigenschaften des Reglers

Um einen Überblick über das langfristige Verhalten des Reglers im Betrieb zu erhalten, besitzt er eine elektronische Schnittstelle (RS232 und RS485), über die man alle Meßwerte auslesen, speichern und analysieren kann. Über diese Schnittstelle können zusätzlich mehrere (bis zu 78) Regelgeräte vernetzt und gesteuert werden. Damit ist auch die Möglichkeit gegeben, einen oder mehrere Kühlräume mittels Datenfernübertragung zu überwachen und zu steuern.

Der Regler existiert in drei Standard-Bauformen (19"-Zollgehäuse, für Hut-schienen- oder Türmontage, siehe Bild 6) und enthält serienmäßig 6 Temperatursensoreingänge, 6 frei konfigurierbare Umschalter-Relais, 4 frei konfigurierbare Steuereingänge und einen konfigurierbaren Analogausgang.

Alle Merkmale eines modernen Kühlstellenregler wie z. B. ein zweiteiliges Display mit Volltext in vier Sprachen, eine Folientastatur, Türkontaktüberwachung, Lichtrelais, zweite Sollwertebene, usw. sind als Standard integriert.

Fazit

Es wurde eine Regelung entwickelt, die eine lernfähige, intelligente und energieeffiziente Bedarfsabtausteuerung gewährleistet. Unter Verwendung der Temperaturverläufe zweier Sensoren pro Verdampfer, die am Lufteintritt und im Wärmetauscherblock plaziert sind, und einem Gedächtnis über den Ablauf der letzten Abtauungen, wird der Bereifungszustand des Verdampfers ermittelt. Die Abtauung kann ohne Zeitrestriktion oder unter Einhaltung von Abtaufreigabezeiten durchgeführt werden. Die Abtauung wird sanft beendet. Schon während der Kühlphasen wird versucht, durch einen geregelten Ventilatorenlauf den Reif- und Eisaufbau gering zu halten. Besonders bei positiven Raumtemperaturen wird auf dieses Verfahren besondere Sorgfalt verwendet. Es wurde eine Wächterfunktion integriert, die bei Versagen der Abtauerkennung einen Notbetrieb gewährleistet, die bei Behebung der Störung automatisch wie-

der in den regulären Betrieb umschaltet. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Sensoren als Abtaubegrenzungsfühler pro Verdampfer einzusetzen. Bei Kühlstellen mit mehreren Verdampfern erkennt der Regler selbständig das in Beziehung auf die Abtauung schwierigste Gerät und richtet die Steuerung nach diesem aus. □



Bild 6 Standardbauformen des Bedarfsabtauers

Literatur

- [1] Becker, M., Automatisierung kältetechnischer Anlagen auf Basis der mathematischen Modellierung des Gesamtsystems, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 86 Düsseldorf: VDI Verlag 1996
- [2] Becker, M., Hasse, H., Kosack, P., Maurer, G., Scherer, H., Thermodynamisches Modell zur Simulation dynamischer Vorgänge im gekoppelten System Kälteanlage/Kühlraum, DKV-Tagungsbericht 1992, Heft: Nr. 19 Bd. II/1, p. 335-353
- [3] Bejan, A., Vargas, J., Lim, J. S., When to defrost a refrigerator, and when to remove the scale from the heat exchanger of a power plant, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, Nr. 3, 1994, p. 523-532
- [4] d'Accadia, M. D., de Rossi, F., Thermoeconomic optimization of a refrigeration plant; Int. J. Refrig. 1998 Vol. 21 No. 1, p. 42-54
- [5] Dietenberger, M.; Generalized Correlation of the Water Frost Thermal Conductivity; Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26; No. 4, pp. 607-619; 1983
- [6] Haaf, S., Bereifung, Handbuch der Kältetechnik, R. Plank (Hrsg.) Bd. 6/B, Kap. 6
- [7] Hayashi, Y. et al., Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types; Journal of Heat Transfer, May 1977, Vol. 99, pp. 239-245
- [8] Kerschbaumer, H. G., Analyse des Einflusses der Bereifung und der Abtauung von Luftkühlern auf Leistung und Energieverbrauch von Kälteanlagen; Dissertation an der Technischen Hochschule in Wien, R.Z.: 2/85-1971
- [9] Kondepudi, S. N., Performance of finned-tube heat exchangers under frosting conditions: I. Simulation model + II. Comparison of experimental data with model, Rev. Int. Froid 1993 Vol. 16 No. 3, p. 175-184
- [10] Lotz, H., Wärme- und Stoffaustauschvorgänge in bereifenden Lamellenrippen-Luftkühlern im Zusammenhang mit deren Betriebsverhalten; Kältetechnik-Klimatisierung, 23. Jahrg., Heft 7/1971, pp. 208-217
- [11] Mardorf, L., Peter, T., Experimentelle Untersuchungen und mathematische Simulation der Wärme- und Stofftransportvorgänge an bereiften Luftkühlern, DKV-Tagungsbericht 1992, Heft: Nr. 19 Bd. II/1, p. 321-334
- [12] Petz, M., Reichelt, J., Franke, P., Die Leistung von Ventilator-Luftkühlern, Ki Luft- und Kältetechnik 4/1994, p. 167-171
- [13] Radcenco, V., Vargas, J. V., Bejan, A., Lim, J. S., Two design aspects of defrosting refrigerators, Int. J. Refrig. 1995 Vol.18 No. 2, p. 76-86
- [14] Tokura, I. et al., Study on Properties and Growth Rate of Frost Layers on Cold Surfaces; Journal of Heat Transfer, Nov. 1983, Vol. 105, pp. 895-901
- [15] Trammel, G. J., Little, D. C., Killgore, E. M., A study of frost formed on a flat plate held at sub-freezing Temperatur, ASHRAE JOURNAL July 1968, p. 42-47