

Erzeugung von Ice Slurry in einem Eisgenerator ohne bewegliche Teile

Thorsten Behnert und Holger König, Lindau

Ice slurry ist ein Kälte­träger, der aufgrund seiner Eigenschaften hervorragend geeignet ist Kälte zu speichern aber auch zu transportieren. Die transportierte Energie ist aufgrund der in den Eiskristallen enthaltenen Schmelzenthalpie wesentlich höher, als bei Solesystemen. Herkömmlich wird Ice slurry mit Komponenten erzeugt, die die auf einer gekühlten Oberfläche entstehenden Eiskristalle mechanisch entfernen. Die Kristalle bilden mit dem Trägerfluid eine Dispersion und strömen so aus dem Eis­erzeuger.

Solche Eis­erzeuger werden schon in vielfältigen Anwendungen wie in Brauereianlagen, Klimatisierung von Gebäuden oder bei direkter und indirekter Kühlung zur Lagerung und Transport von Lebensmitteln eingesetzt.

Für die Betreiber von Kälteanlagen in der Industrie gelten zwei Grundsätze. In den meisten Fällen, dient die Kälte dazu, eine Ware zu produzieren. Die Kosten für die Kälte sind also ein Teil der Herstellungskosten dieses Produktes. Deshalb achtet der Betreiber darauf, daß die Kälteanlage, sowohl bei den Investitionskosten, als auch bei den Betriebskosten möglichst kostengünstig ist. Der zweite wichtige Faktor für den Betreiber ist die Betriebssicherheit. Die Zuführung der Kälte muß

für den Produktionsablauf gesichert sein, um die Qualität, aber auch die Quantität der Produkte gewährleisten zu können. Aus diesen Gründen ist zu verstehen, daß die meisten Industriebetriebe sehr konservativ auf neue Ideen reagieren. Bei der Modernisierung oder bei Neuanlagen werden daher bekannte Techniken, die sich teilweise schon seit Jahrzehnten in ihrer Branche bewährt haben, bevorzugt.

Die wirtschaftlichen Interessen der Industrieunternehmen werden teilweise durch Gesetze, wie etwa Umweltauflagen, eingeschränkt. Der Gesetzgeber schützt damit das Interesse an den allgemeinen Gütern. Durch solche Auflagen sind Unternehmen trotz ihrer Vorbehalte gegenüber neuen Techniken immer wieder bereit, zukunftsweisende Techniken einzuführen.

Wirtschaftliche Analyse

Durch das Verbot der H-FCKWs und die nach wie vor kontrovers diskutierte Treibhausproblematik der H-FKW's besteht hohes Interesse an Ersatzstoffen und -verfahren zur Kälteerzeugung. Deshalb ist es verständlich, daß vor allem in den Industrieländern als Vorreiter für neue Techniken verschiedene Versuchs- und Forschungsanlagen betrieben werden, um die Verwendung von Ice slurry als Kälte­träger zu testen. In diesen Versuchsanlagen werden Stoff- und Transportgrößen für verschiedene Parameter, wie etwa verschiedene Zusatzstoffe in der Sole als Funktion der Eiskonzentrationen, ermittelt [1]. Weiterhin existieren Versuchsanlagen, die das Verhalten von Ice slurry für bestimmte Einsatzgebiete, wie etwa die Kühlung von Kühlmöbeln, untersuchen. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Kühlung von Lebensmitteln. Hierzu zählen Anlagen, die z. B. Fangfisch und Gemüse durch das direkte Aufbringen des Ice slurrys kühlen, oder Lebensmittel indirekt kühlen, indem in Doppelwandbehälter gespeichertes Ice slurry verwendet wird.

zu den Autoren

**Dipl.-Ing.
Thorsten
Behnert,**
Entwicklungs-
Ingenieur,
Axima
Refrigeration
GmbH, Lindau



**Dipl.-Ing.
Holger König,**
Leiter
Entwicklung,
Axima
Refrigeration
GmbH, Lindau



Auch in Klimaanlage­an­lagen wird Ice slurry vor allen in Japan eingesetzt. Die Anwendung von Ice slurry bei der industriellen Fertigung von Produkten ist dagegen selten. Dies liegt an der konservativen Einstellung der Betreiber und den höheren Investitionskosten solcher Anlagen.

Die wirtschaftliche Analyse einer Industrieanlage wird am Beispiel einer von Axima Refrigeration GmbH in einer Brauerei installierten Ice slurry Anlage veranschaulicht.

Randbedingungen für die Umrüstung auf Ice Slurry

Die Kälteanlage der Brauerei bestand aus einer Ammoniak-Kompressionsmaschine, die sowohl zum Bereitstellen der Kälte an den verschiedenen Verbrauchern, wie z. B. Lagerbehältern und Gärtanks, aber auch Eisspeichern verwandt wurde. Produktionshallen und Eisspeicher und Maschinenraum liegen etwa 30 m auseinander. Durch das weit verzweigte Verteilernetz der Kälteanlage ergaben sich folgende Probleme:

- Große Füllmengen des Kältemittels Ammoniak,
- große Druckverluste durch die langen Leitungen,
- Einsatz von Kältemittelpumpen, um eine Verdampfung in den Leitungen zu verhindern.

Durch den Einsatz der Kältemittelpumpen zur Förderung des Kältemittels zu den ZKGs (zylindrisch konische Gärtanks) erfolgt ein ständiger Energieverbrauch. Der Energieverbrauch erhöht die Betriebskosten und damit auch die Produktkosten.

Weiterhin war ein Eisspeicher installiert. Hierbei wurde das Ammoniak in horizontalen Rohren verdampft. Das Behälterwasser gefror an den Rohren. Die latente Energie des Eises nimmt beim Entladen des Speichers die Wärme des zurückkommenden warmen Wassers wieder auf. Diese Zwischenspeicherung der Kälte hat trotz ihrer energetischen Nachteile (Kälteverlust durch zweifachen Wärmeübergang) monetäre Vorteile. Zum einen erfolgt der Eisaufbau in den Nachtstunden, hierdurch kann der kostengünstigere Nachtstrom verwendet werden, zum anderen wird die vom Energie-lieferant abgenommene Spitzenlast und damit der Anschlußpreis gesenkt werden. Der dritte Vorteil ist die Verkleinerung der Kälteanlage durch gleichmäßigere Auslastung des Aggregats.

Beweggründe zum Umstellen auf eine Ice slurry Anlage

Die Betreiber der Brauerei hatten mehrere Gründe, sich für eine Ice slurry Anlage zu entscheiden. Zum ersten liegt die Brauerei, wie viele traditionsreiche Brauereien, im Zentrum der Stadt. Da Ammoniak beim Austritt an die Luft eine große Panikwirkung besitzt, wird die Ammoniakfüllmenge so gering wie möglich gehalten. Ein weiterer Vorteil ist die

Minimierung der Gefährdung von Wasser bei einem möglichen Schadensfall der Anlage. Ice slurry ersetzt im diskutierten Fall das Ammoniak in den Versorgungsleitungen und den Wärmeübertragern der Verbraucher. Des Weiteren kann so das Ammoniak auf den Maschinenraum begrenzt werden. So können Kosten, die für die Überwachung von Ammoniakanlagen vorgeschrieben sind, auf ein Minimum reduziert werden. Es könnten die vorhandenen Leitungen als auch die Wärmeübertrager nach einer Säuberungsprozedur verwendet werden. Besonders bei den ZKGs und den Lagertanks, die aus hygienischen Gründen ausschließlich aus Edelstahl bestehen, bedeutet dies ein großes Einsparungspotential der Investitionen bei der Modernisierung.

Der Eisspeicher der Anlage wurde komplett umgebaut, so daß bei einem Eisgehalt von 50 % (Auslegungspunkt) die Eisgeneratoren im Winter und in der Übergangszeit die Eiskristalle komplett in der Nacht anspeichern können. Zum einen wird dadurch der von den meisten Energieversorgern angebotene billige Nachtstrom verwendet und zum zweiten werden Leistungsspitzen am Tag vermieden.

Weitere Vorteile sind die guten Transport- und Speichereigenschaften des Ice slurrys. Diese stoffspezifischen Daten interessieren den Betreiber nur in sofern, als daß die Betriebssicherheit gewährleistet ist. Dazu gehört nicht nur die Quantität, sondern auch die Qualität

des Produktes, die bei Lebensmitteln von besonderer Bedeutung ist.

Eiserezeuger ohne bewegliche Teile

Die Summe der genannten Vorteile begründen die Umrüstung. Hinderlich ist jedoch das Investitionsvolumen für den Eiserezeuger. Der Energieverbrauch ist im Vergleich zu einer Soleanlage höher, Ursache sind die notwendigen Motoren und die Mechanik der Eiserezeuger und die Motoren der Eisspeichermischer.

Herkömmliche Technik zur Ice slurry Erzeugung

Herkömmliche Eiserezeuger, die für den industriellen Einsatz in Frage kommen, sind spezielle Wärmeübertrager. Bei diesen Eiserezeugern wird das Eis an durch Kältemittel gekühlten Rohrwänden erzeugt. Die entstandene Eisschicht wird sofort mittels einer Mechanik von der Oberfläche entfernt. Die entstehenden Eiskristalle werden mit der Sole aus dem Eiserezeuger geschwemmt. Im Bild 1 ist solch ein Eiserezeuger im Einsatz zu sehen. Die Kosten für den Eiserezeuger sind aufgrund der Antriebseinheit und der Schaber (siehe Bild 2) sehr hoch. Hinzu kommt, daß die Eiserezeuger Hilfsenergie in Form von Strom benötigen, um die Mechanik zu betreiben.



Bild 1 Eiserezeuger im Allgäuer Brauhaus

Diese Schaber (Schleuderstäbe) bringen weiterhin Reibungswärme in das System Eiserzeuger und vermindern damit den Wirkungsgrad. Die Einführung dieser Technologie im Bereich der Industrie ist aufgrund der hohen Investitionskosten des Eiserzeugers gegenüber einer Soleanlage schwierig. Durch die Verwendung des mechanischen Eisschabers erhöht sich wegen der beweglichen Teile die Erfordernis der kontinuierlichen Wartung, um der Gefahr eines Ausfalles aufgrund von Verschleißerscheinungen des Eisschabers zu beherrschen.

überprüft. Erste erfolgversprechende Ansätze sind zwar erkennbar, allerdings stehen industrielle Praxistests noch aus.

Die zum Testen der verschiedenen Oberflächen erstellte Versuchseinrichtung [3] ist in Bild 3 dargestellt. Auf die schwarz umrandeten Halbrohre sind die verschiedenen Oberflächen aufgebracht worden. Über den Halbrohren ist eine Plexiglascheibe montiert. Hierdurch kann die Eiskristallbildung an der Oberfläche mittels eines Mikroskops begutachtet und durch eine elektronische Videokamera dokumentiert werden.

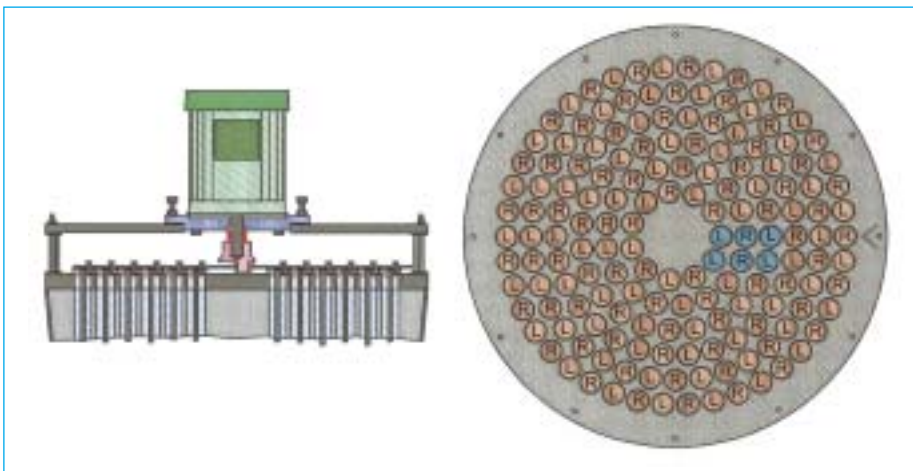


Bild 2 Antriebseinheit eines MaximICE-Eisgenerators [5]

Neue Entwicklungen zur Herstellung von Eiserzeugern

Die Nachteile der herkömmlichen Eiserzeuger mit sich drehenden Schleuderstäben können mit neuen Technologien aufgehoben werden [2]. Zum Einsatz kommen Oberflächen, die verhindern, daß Eiskristalle an ihr anfrieren.

Diese besonderen Oberflächen an der Innenseite eines Eiserzeugers bewirken, daß die an der Oberfläche entstehenden Eiskristalle aufgrund der vorherrschenden Strömung des Trägerfluides von der Oberfläche gelöst werden. Wichtige Parameter hierbei sind die Strömungsgeschwindigkeit, die Konzentration des Gefrierpunktniedrigers, die Wandtemperaturen und die gewählte Oberfläche.

Im Rahmen eines dänischen Forschungsvorhabens, in dem Axima Refrigeration der aktive Industriepartner zur Umsetzung dieser neuen Technologie ist, wurden verschiedene Entwicklungen durchgeführt. Die patentierte Technologie wird gemeinsam mit dem DTI von Axima Refrigeration auf industrielle Eignung hin

Die Kühlung dieser Halbrohre erfolgt nicht über ein verdampfendes Kältemittel, sondern über eine Sole, die die Halbrohre kühlt. Hierzu werden die Temperaturen und der Volumenstrom aufgenommen. Über die Gleichung

$$\dot{Q}_{Sole} = \dot{m}_{Sole} c_{pSole} (\Delta t)$$

kann die dem Ice slurry entzogene Wärme bilanziert werden.



Bild 3 Oberflächen-Versuchseinrichtung des DTIs und der TU Dresden

Beobachtung der Erzeugung von Eiskristallen

Die Eisbildung an der Innenseite eines Halbrohres ist direkt abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Je nach ausgebildeter Oberfläche ergeben sich die in den Bilderserien 4 bis 6 dargestellten Kristallentstehungsarten. Die Anzahl der Keimpunkte, die zur Bildung der Eiskristalle notwendig sind, kann durch die Oberflächenbeschaffenheit gesteuert werden.

Die Bilderserie 4 zeigt die Eisbildung bei einer unbehandelten Oberfläche. Die Eiskristalle wachsen von einem Kristallisationspunkt an und bedecken zum Schluß die gesamte Oberfläche. Die Kristalle sind sehr dünn und wachsen erst später in die Höhe.

Die Bilderserie 5 zeigt eine spezielle Oberfläche A. Die Eiskristallbildung erfolgt an den Keimpunkten. Die Eiskristalle lösen sich nahezu sofort von der Oberfläche und wachsen in dem kalten Trägerfluid an.

Die Bilderserie 6 zeigt die Kristallbildung an der Oberfläche B. Hierbei stellte sich heraus, daß die Kristalle wesentlich länger an der Oberfläche verweilen. Während der Verweilzeit wachsen die Kristalle zu einem größeren Durchmesser als bei der Oberfläche A an, bevor sie sich von der Oberfläche lösen. Die Bildung und das Anwachsen eines solchen Kristalls ist durch die schwarzen Kreise in der Bilderserie 6 verdeutlicht.

Bei allen Versuchen wurden identische Konzentrationen des Gefrierpunktniedrigers, Kühlwandtemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten verwendet. Woraus sich ergibt, daß die Veränderung der Oberfläche allein zu einer veränderten Eiskristallbildung geführt hat.

Die Oberflächen sind entscheidend für die Ablösung und damit die Bildung der Eiskristalle. Bei zu geringer Strömungsgeschwindigkeit, kann es trotz dieser Oberflächen zum Einfrieren der Sole kommen. Die Auswirkungen auf die Oberfläche und das Verhalten der Oberfläche nach dem Ausfrieren der Sole wird durch weitere Tests an der Versuchseinrichtung untersucht werden.



Bild 4 Eiskristallbildung an einer nicht behandelten Oberfläche



Bild 5 Eiskristallbildung an der Oberfläche A



Bild 6 Eiskristallbildung an der Oberfläche B

Eiserzeuger in Form eines Rohrbündelwärmeübertragers

Durch den Einsatz der oben beispielhaft gezeigten Oberflächen ist es möglich, Eiskristalle ohne die beweglichen Teile, d. h. die Antriebseinheit für die Schleuderstäbe oder Schaber, zu erzeugen und aus dem Apparat zu befördern. Hierzu können beschichtete Rohre verwendet werden. Für Industrieanlagen werden große Kälteleistungen gefordert. Um den Druckverlust des strömenden Ice slurrys zu minimieren, wird kein einzelnes Rohr, sondern ein Rohrbündel verwendet. Dieses führt zu einem Rohrbündelwärmeübertrager (RB). Als einzige Veränderung an der Konstruktion eines solchen RBs ist die Veränderung der Beschichtung auf der Innenseite der Rohre.

Durch die Einsparung der Mechanik und die Verwendung von RBs können die Investitionskosten gesenkt werden.

Bei einem 1pässigen RBs Wärmeübertragers strömt die Sole dabei in den Rohren, die Verdampfung des Kältemittels findet an der Außenseite im Mantelraum statt. Während des Durchströmens der

Sole in den Rohren bilden sich Eiskristalle an der Oberfläche, die sich aufgrund der Strömung und der Oberflächenbeschaffenheit lösen und durch die strömende Sole mitgerissen werden. Die Wärme, die der Sole zur Erzeugung des Eises entzogen werden muß, wird vom verdampfenden Kältemittel aufgenommen. Dieses kann entweder in einem überfluteten RB, oder über eine Direktverdampfung mittels eines thermostatischen Expansionsventils erfolgen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Verwendung von Ice slurry als Kälte-träger weist Vorteile für den Betreiber von Großkälteanlagen auf. Aufgrund der hohen Investitionskosten für den Eiserzeuger tendieren, trotz der Vorteile, die Ice slurry bietet, die Anwender dazu, herkömmliche Soleanlagen zu betreiben. Hinzu kommen die erhöhten Betriebskosten durch den Einsatz von Motoren für die Schaber und die Mischer für den erforderlichen Pufferspeicher.

Ableiten läßt sich aus dieser Aussage, daß die Eiserzeuger kostengünstiger werden müssen, um eine erfolgreiche Markteinführung für die Technologie Ice slurry zu erreichen. Dies kann durch die

Verwendung von Eiserzeugern ohne bewegliche Teile erreicht werden. Zum einen wird durch die Verwendung von Rohrbündelwärmeübertragern vorhandenes Know-how genutzt, und zum anderen werden die Herstellkosten und damit die Investitionskosten durch den Wegfall der mechanischen Teile erheblich reduziert. Ein weiterer Vorteil ist, daß durch den Wegfall der Mechanik keine zusätzliche Wärme in die Sole übertragen wird und sich damit der Wirkungsgrad des Eiserzeugers erhöht.

Für die Auslegung und die Konstruktion der Eiserzeuger ist die thermodynamische Berechnung entscheidend. Über sie wird die benötigte Wärmeübertragungsfläche berechnet. Hierzu sind Theorien für den Wärmeübergang bei der Entstehung der Eises in einer Sole erforderlich. Ansätze zur Berechnung wie etwa bei der Verdampfung oder Kondensation existiert für den Phasenwechsel derzeit nicht. Die Wärmeübertragungskoeffizienten müssen daher über Versuche an einem Eiserzeuger ohne bewegliche Teile experimentell ermittelt werden. Für die Entstehung des Eises an der Oberfläche gibt es verschiedene Einflußfaktoren, wie etwa die Beschaffenheit der Oberfläche, der Strömungsgeschwindigkeit und die Konzentration des Gefrierpunktniedrigers in der Sole.

In einem zweiten Schritt sollen die gefundenen Wärmeübertragungskoeffizienten durch dimensionslose Kennzahlen berechnet werden können. Hierzu müssen entweder empirische Gleichungen erstellt, oder vorhanden empirische Gleichungen angepaßt werden. □

Für die Erarbeitung der Grundlagen zur Oberflächentechnologie wird dem DTI (Dänisches Technologie Institut), insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zwiig und Herrn Dr.-Ing. Michael Kauffeld, für die Bereitstellung von Bildmaterial und Informationen gedankt.

Literatur

- [1] T. M. Hansen, M. Kauffeld, K. Grosser, R. Zimmermann.: Viscosity of ice slurry. Proceedings of the second Workshop on ice slurry of the IIR
- [2] Patent Application: Method and refrigeration apparatus for making a slush ice. WO 96/27298
- [3] Dipl.-Ing. Zwiig, T.: Crystallisation of Ice at coated Surfaces. Vortrag gehalten im Dezember 01 am DTI
- [4] DI Dr. Geyer, J.: Binäreis-Erfahrungen aus dem Betrieb einer Versuchsanlage. FH-Gebäudetechnik, Johannes Kepler-Platz 1, A-7423 Pinkafeld
- [5] Betriebsanleitung, Integral Energietechnik GmbH, Flensburg, 1999