



**Dipl.-Ing. Klaus Hartmann,**  
Prokurist und Direktor  
Qualität und Training,  
Carrier GmbH, Unterschleißheim.

**Am 22. Mai des letzten Jahres wurde die Turbokältemaschine 75 Jahre alt. Sie entstand aus dem Verlangen der Industrie nach einer leistungsfähigen und einfachen Maschine für große Kälteleistungen. Die 1922 von dem genialen amerikanischen Konstrukteur Dr. Willis H. Carrier entwickelte kompakte Turbokältemaschine sollte zunächst nur zur Kühlung großer Wassermengen für Klimaanlage in Textilfabriken, Theatern, Verwaltungsgebäuden, Hotels usw. dienen.**

**Es zeigte sich jedoch schon vor dem Zweiten Weltkrieg nicht nur in der chemischen Industrie ein wachsender Bedarf an Kältemaschinen, die in der Lage waren, große Kälteleistungen bei immer tieferen Verdampfungstemperaturen zu erzeugen: ein nahezu ideales Einsatzgebiet für die Turbokältemaschine.**

**Nachfolgend werden einige typische Anwendungen beschrieben und mit teilweise nostalgischen Fotos die 75jährige Entwicklungsgeschichte nachgezeichnet.**

# Turbokältemaschinen für industrielle Prozesse

Klaus Hartmann, München

Fortsetzung aus KK 1/98

## Turbokältemaschinen zur Solekühlung

Solekühlanlagen werden heute in fast allen Industriezweigen eingesetzt. Die kalte Sole dient dabei zur Prozeßkühlung, Rückgewinnung von Lösemitteln, Kühlung von Emulsionen und von sensibilisiertem Material in Kühlräumen, Klimatisierung usw.

Die Bedeutung der Turbokältemaschinen für die Erzeugung tiefer Temperaturen in der fotografischen Industrie ist unter anderem daraus ersichtlich, daß die Firma Kodak in Rochester, USA, Kältemaschinen mit einer Gesamtantriebsleistung von mehr als 50 MW installiert hat; die hochtourigen Turboverdichter haben die vorher in Gebrauch gewesenen Ammoniakkolbenverdichter fast vollständig verdrängt.

Zur Erzielung besserer Produktionsverfahren entschloß sich Kodak im Jahre 1947, das Solekühlsystem von  $-38\text{ °C}$  auf  $-65\text{ °C}$  umzustellen. Mehrere Turboverdichter mit einer Kälteleistung von 1550 kW und einer Soleaustrittstemperatur von  $-65\text{ °C}$  befinden sich seit 1948 in Betrieb und arbeiten so wirtschaftlich, daß sie sich in viel kürzerer Zeit als vorgesehen amortisieren konnten und Anlaß zur Anschaffung weiterer Tieftemperaturanlagen gaben.

Wie aus Abb. 4 ersichtlich, sind zwei dreistufige Turboverdichter hintereinander geschaltet. Der Niederdruckverdichter 1 fördert den überhitzten Kältemitteldampf in einen Zwischenkühler 5, wo er mittels der aus dem Hochdruckkreis kommenden Flüssigkeit bei  $-18\text{ °C}$  gekühlt wird. Jeder Verdichter

besitzt einen Zwischendruckbehälter, in dem das warme aus dem Verflüssiger bzw. dem Zwischenkühler zuströmende flüssige Kältemittel durch Teilverdampfung auf die dem Saugdruck der folgenden Stufe entsprechende Temperatur abgekühlt wird. Der in jede Carrier-Turbokältemaschine eingebaute Zwischendruckbehälter bewirkt eine wesentliche Erhöhung der spezifischen Kälteleistung und macht die sonst bei den Kolbenverdichterkälteanlagen notwendige mehrstufige Schaltung überflüssig. Die beiden für den Antrieb vorgesehenen Dampfturbinen sind in jedem Fall überdimensioniert, so daß man in der Lage ist, entweder durch Drehzahlerhöhung 1340 kW bei  $-73\text{ °C}$ , oder durch Drehzahlerniedrigung 1900 kW bei  $-54\text{ °C}$  zu erzeugen. Die Turbinen werden mit Dampf von 9,5 bar und  $215\text{ °C}$  gespeist, der als Abdampf aus Turbogeneratoren, die mit einem Dampfdruck von 56 bar arbeiten, kommt und sich dabei bis auf 0,42 bar entspannt. Dieser Dampf findet anschließend noch Verwendung bei verschiedenen Produktionsprozessen wie zur Heizung innerhalb des Betriebes. Die restlose Ausnutzung des Dampfes ist nur bei Turboverdichtern mit Dampfturbinenantrieb möglich, weil der Abdampf verhältnismäßig frei von Ölbeimengungen bleibt.

Bei Soleaustrittstemperaturen von  $-65\text{ °C}$  am Verdampfer müssen die Niederdruckverdichter mit einer Verdampfungstemperatur von  $-68\text{ °C}$  arbeiten, die einem Druck von 0,133 bar entspricht. Unter diesen Umständen ist es

Bezeichnung	Chemische Formel	Spezifische Wärme kJ/kgK	Zähigkeit	Gefrierpunkt °C
Methylenchlorid	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$	1,156	1,37	- 97
Trichloräthylen	$\text{C}_2\text{HCl}_3$	0,461	3,4	- 88
Frigen 11	$\text{C Cl}_3\text{ F}$	0,838	2,15	-111

Tabelle 3 Eigenschaften von Tiefkühlisolen bei  $-68\text{ °C}$ .



Auch der mit der Luft in das System eindringende Wassergehalt muß entfernt werden. Dafür dient ein besonderes Gefäß h, das mit einer Anzahl von Prallblechen versehen ist.

Jede Anlage besitzt außerdem ein Kältemittel-Sammelgefäß 7, das meistens so angeordnet ist, daß das gesamte flüssige Kältemittel von selbst in dieses abfließen kann. Bei langen Betriebsunterbrechungen der Anlage sorgt eine aus einem Kolbenverdichter und einem wassergekühlten Verflüssiger bestehende Absaugeinrichtung 8 dafür, daß der gesamte Kältemitteldampf aus der Anlage entfernt wird.

Es gibt nur wenige als Sole geeignete Flüssigkeiten bei so tiefen Temperaturen. Die Sole soll billig sein, eine geringe Zähigkeit, eine hohe spezifische Wärme und einen möglichst niedrigen Gefrierpunkt besitzen. Tabelle 3 gibt einen Vergleich der drei dafür in Frage kommenden Solen.

Wie die Tabelle 3 zeigt, weist Methylenchlorid, soweit es sich um die spezifische Wärme handelt, die günstigsten Werte auf. Außerdem ist, im Hinblick auf die geringere Zähigkeit, bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit, die Reynolds'sche Zahl höher und somit die Wärmeübertragung besser. Der etwas höhere Preis von Methylenchlorid im Vergleich zu Trichloräthylen wird durch die günstigeren Eigenschaften mehr als aufgewogen.

## Gasverflüssigungsanlagen

### Chlorverflüssigung

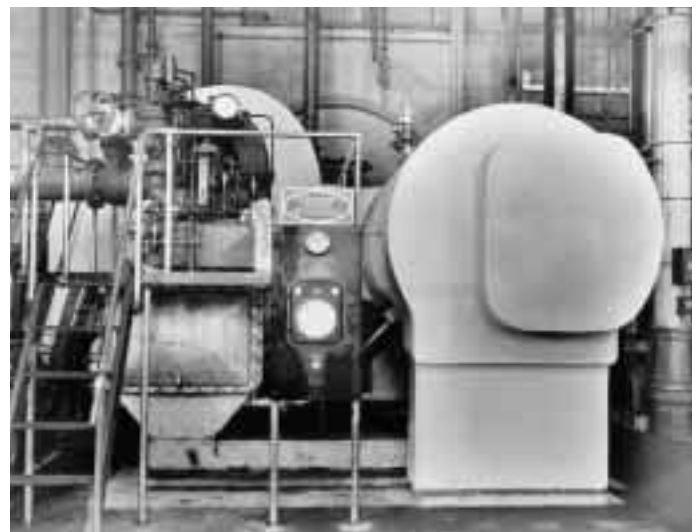
Eines der frühesten Anwendungsgebiete der Kälte in der chemischen Industrie erstreckte sich auf die Verflüssigung des Chlorgases. Das durch Elektrolyse des Kochsalzes gewonnene Chlor enthält Beimischungen von Luft und Wasserstoff. In reinem Zustand siedet Chlor bei  $-34\text{ °C}$ ; wegen des Anteils an inerten Gasen kann seine Verflüssigung bei Normaldruck erst bei beträchtlich tieferen Temperaturen erfolgen. Um Chlorgas bei Temperaturen, die noch wirtschaftlich tragbar sind, zu verflüssigen, muß es im allgemeinen vorher komprimiert werden. Bei den meisten Chlorverflüssigungsanlagen ist es üblich, das Chlorgas nicht über 3,2 bar zu verdichten. Die gebräuchlichste Methode ist die Verflüssigung durch direkte Verdampfung. Vor der Erfindung der FCKW-Kältemittel, die sich gegen Chlor indifferent verhalten, wurde Ammoniak als Kältemittel

verwendet. Da aber Ammoniak in Verbindung mit Chlor ein explosives Gemisch bildet, mußte stets ein Solekreislauf zwischengeschaltet werden. Dadurch war eine zweifache Wärmeübertragung nicht zu umgehen, die mit einer höheren Temperaturdifferenz und somit mit einem höheren Energiebedarf der Kälteanlage verbunden war. Bei Turbokälteanlagen, die fluorierte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel verwenden, läßt sich das Chlorgas direkt im Verdampfer ohne Zwischenschaltung eines Solekreislaufs verflüssigen. Abb. 7 zeigt das Schema einer Chlor-

verflüssigungsanlage, die sich in ihrem Gesamtaufbau kaum von einer üblichen, zur Kühlung von Wasser und Sole bestimmten einstufigen Turbokälteanlage unterscheidet. Der Verdampfer ist so ausgebildet, daß das Chlorgas durch die inneren Rohre strömt und sich dort verflüssigt. Außerdem besitzt dieser Verdampfer am Boden einen Abflußstutzen für flüssiges Chlor und oben einen Stutzen für inerte Gase.

Die Chlorverflüssigung ist nur eines der vielen Anwendungsgebiete der Turbokälteanlage mit direkter Wär-

**Abb. 6** Die erste Turbokältemaschine zur Solekühlung für eine Brauerei wurde an die Minneapolis Brewing Company, Minn., 1928 ausgeliefert.



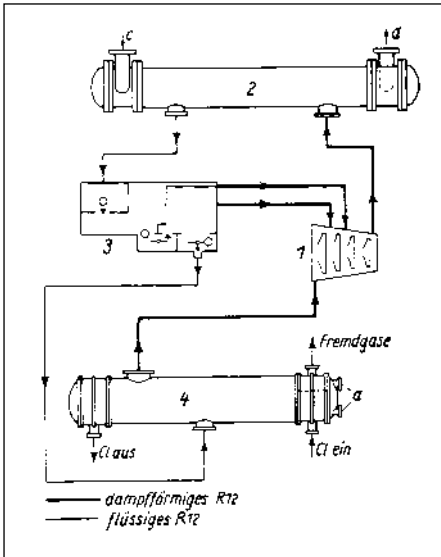


Abb. 7 Kreislaufschema einer Turbokälteanlage zur Chlorverflüssigung mittels direkter Verdampfung.

meübertragung, bei denen Gase oder Flüssigkeiten ohne Zwischenschaltung eines Solekreislaufes direkt im Verdampfer verflüssigt oder gekühlt werden. Es befinden sich auch Anlagen zur Verflüssigung von Chlor bei  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  in Betrieb, die eine viel höhere Ausbeute an Chlor gewährleisten und viel wirtschaftlicher arbeiten, weil das Chlor beinahe bei Normaldruck verflüssigt wird, so daß die mit hohen Energieverlusten verbundene Verdichtung des Gases entfällt. Die Verflüssigungstemperatur hängt jeweils von dem Reinheitsgrad des Chlorgases und der verlangten Ausbeute an.

**Anlagen zur Ammoniakverflüssigung**

Bevor die ersten Tieftemperaturanlagen mit großen Kälteleistungen in der chemischen Großindustrie Fuß faßten, war es insbesondere die Lebensmittelindustrie, die zur Frischhaltung von Lebensmitteln einen großen Bedarf an Tieftemperatur-Kälteanlagen aufwies. Da damals weder die Turbokältemaschinen soweit entwickelt, noch die entsprechenden Kältemittel gefunden waren, arbeiteten die dafür erstellten Kälteanlagen fast durchweg mit Ammoniakkolbenverdichtern.

Im Jahre 1936 ließ sich die Firma Carrier ein Verfahren für die Anwendung der Turboverdichter zur Verflüssigung des Ammoniaks in bereits vorhandenen Ammoniakkälteanlagen patentieren. Die erste nach diesem Verfahren arbeitende Anlage wurde im Jahre

1935 bei der Narragansett-Brauerei in Providence, USA, erstellt. Seitdem konnten mehrere hundert Turboverdichter in Brauereien, Kühlhäusern, Lebensmittelgefrieranlagen usw. in Betrieb genommen werden, entweder in Verbindung mit vorhandenen Ammoniakkältemaschinen oder als selbständige Kältemaschinen. Bei der Ammoniakverflüssigungsanlage wird der Ammoniakdampf an der kalten Rohroberfläche des Verdampfers der Turbokältemaschine beim Saugdruck des Verdichters verflüssigt (Abb. 9). Eine Flüssigkeitspumpe fördert das flüssige Ammoniak zu den verschiedenen Kühlstellen.

Da die Ammoniakverflüssigungsanlage mit zwei Kältemitteln (Frigen und Ammoniak) arbeitet, muß ein Wärmeaustauscher vorhanden sein, der im vorliegenden Fall der Verdampfer der Turbo-Kälteanlage ist. Fast bei allen Anwendungsgebieten hat sich erwiesen, daß eine Temperaturdifferenz von  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  zwischen dem verflüssigten Ammoniak und dem verdampfenden HFKW-Kältemittel am wirtschaftlichsten ist. Deshalb muß zur Erzielung einer Verflüssigungstemperatur des Ammoniaks von  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  eine Verdampfungstemperatur von  $-14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Verdampfer der Turbokältemaschine herrschen.

Für diese Anlagenart wurde früher das Kältemittel R 11 bevorzugt, da es einen höheren thermodynamischen Wirkungsgrad als Ammoniak hat. Trotzdem hat eine Ammoniak-Kälteanlage mit Kolbenkompressoren bei einer Verflüssigungstemperatur von  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Verdampfungstemperatur von  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  eine höhere spezifische Kälte-

leistung als eine R 11-Turbokälteanlage. Erst der Einbau eines Zwischenkühlers führt zur Verbesserung der spezifischen Kälteleistung dieser Anlage.

Sehr tiefe Ammoniaktemperaturen verlangen den Einsatz von drei- oder vierstufigen Turbokompressoren. Damit kann auch ein mehrstufiger Zwischenkühler verwendet werden, der den Wirkungsgrad der Kältemaschine je nach Schaltungsart nochmals um 5, 10 oder noch mehr Prozent verbessert. Kompakte Turbokältemaschinen bestehen gegenüber Kolbenmaschinen vor allem durch den geringen Platzbedarf und wesentlich kleinere Fundamente. Weiterhin kann man folgende wichtige Vorteile der Turbokälteanlage zusammenfassen:

1. Kein Verlegen von Kältemittelleitungen,
2. keine Ölabscheider bzw. Ölrückführungen,
3. keine Überlastcharakteristik,
4. sofortiges Ansprechen auf Leistungsschwankungen,
5. geringe Kältemittelverluste,
6. keine oszillierenden Massenkräfte,
7. frei von Schwingungen,
8. geringe Unterhaltskosten,
9. einfache Wartung.

Abb. 10 zeigt ein vollständiges System einer Ammoniak-Kondensationseinheit, die mit einer bestehenden Kolbenkompressoranlage kombiniert wird. Ammoniakdampf und Flüssigkeit von den Kälteverbrauchern werden durch ein Speichergefäß geleitet. Der trockene Dampf strömt der Saugseite der Kolbenkompressoren zu. Dampfförmiges und flüssiges Ammoniak fließt durch den Ammoniakkondensator der

Abb. 8 Turbokältemaschine für eine Chlorverflüssigungsanlage



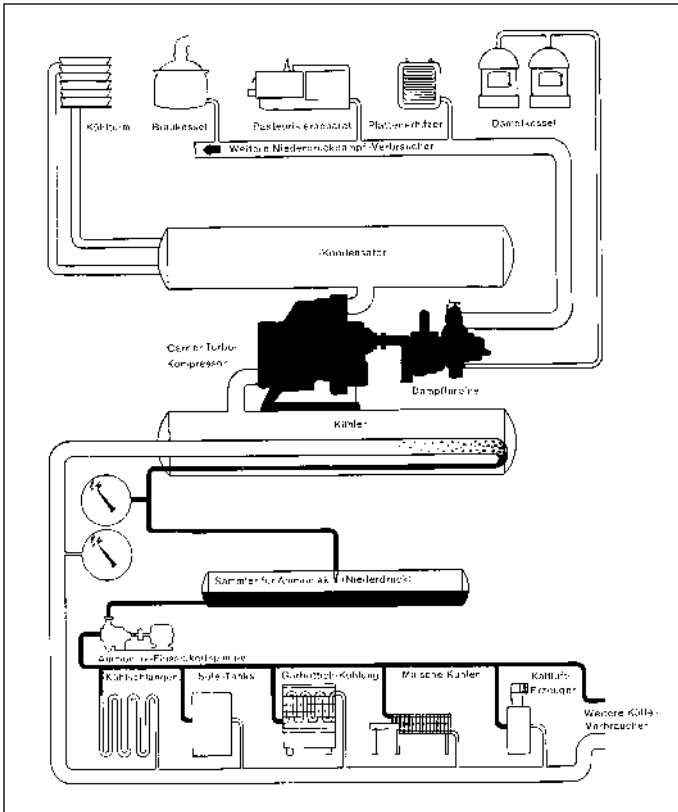


Abb. 9 Schematische Darstellung einer Kälteanlage mit Turboverdichter zur Ammoniakverflüssigung.

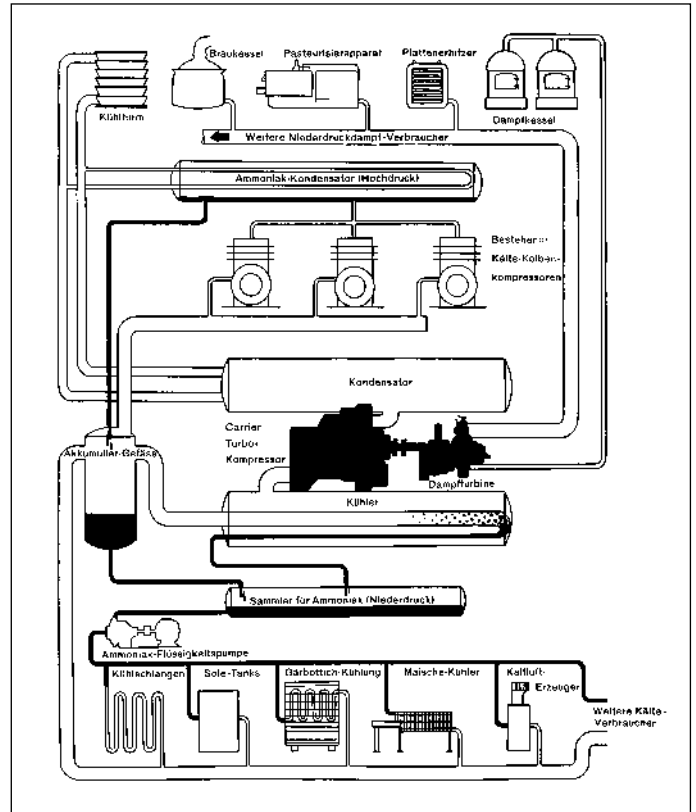


Abb. 10 Schema einer kombinierten Ammoniak-Kondensationsanlage und Ammoniak-Verdichtung.

Turbomaschine. Das flüssige Ammoniak aus dem Kondensator der Kolbenmaschine und aus dem Verflüssiger der Turbomaschine wird in einem Behälter vereinigt und zur Wiederholung des Kreislaufs den Kälteverbraucherstellen zugeführt.

Bei Turbokältemaschinen im Parallelbetrieb mit bereits vorhandenen Kolbenkompressoren ist ferner eine Ammoniakzirkulation im Überschuß auf der Niederdruckseite des Systems möglich. Dies bietet folgende Vorteile: Auswaschen des Ölfilms; Auswaschen von Ölsammlungen, welche den Wirkungsgrad vermindern; konstanter Ammoniakdruck; die ganze Anlage kann überflutet und damit allen Wärmeübergangsstellen flüssiges Ammoniak zugeführt werden. Ein weiterer Vorzug dieser Anlage be-

steht darin, daß das flüssige Ammoniak, welches aus dem mit einem Kolbenkompressor ausgestatteten Hochdruckkreislauf kommt, vom Verflüssigungsdruck auf den Verdampfungsdruck entspannt wird, bevor es der Kälteverbraucherstelle zufließt. Nimmt man an, daß bei einer gewöhnlichen Ammoniakältemaschine die Verdampfungs-temperatur  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die Verflüssigungstemperatur  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt, so kann man je kg Ammoniak rund  $352\text{ kW}$  Kälteleistung erzeugen. Wenn aber, wie es bei der Ammoniakverflüssigungsanlage nach Carrier der Fall ist, das Kältemittel bei Verdampfungs-temperatur in den Verdampfer eingespritzt wird, beträgt die Kälteleistung  $421\text{ kW/kg}$ . Somit bewirkt diese Arbeitsweise bei einer schon vorhandenen Kälteanlage die Erhöhung der Kältelei-

stung um rund 20 % bzw. gestattet es bei einer neuen Anlage, die Rohrquerschnitte der Saug- und Druckleitungen um 20 % zu verkleinern. Außerdem kommt, wie das Schema zeigt, das Ammoniak nicht mit Öl in Berührung, so daß die Wärmeaustauscher ölfrei bleiben. Schließlich braucht man die sonst für den Kompressor sehr gefährlichen Flüssigkeitsschläge, die bei plötzlichen Änderungen in der Belastung auftreten, nicht mehr zu befürchten.

Zumindest im mittleren Leistungsbe- reich wurden die Hubkolbenverdichter inzwischen von Schraubenverdichtern abgelöst, doch für große Kälteleistungen bieten Turboverdichter nach wie vor die beste Lösung.

(Wird fortgesetzt)