

# LUFTGEKÜHLTE WÄRMETAUSCHER FÜR CO<sub>2</sub> KÄLTEKREISLÄUFE

Stefano Filippini

[stefano.filippini@luve.it](mailto:stefano.filippini@luve.it)

LU-VE Contardo, Uboldo / Milano

## 1. Einführung

In der Kälteindustrie wird die Verwendung von "natürlichen" Kältemitteln einschließlich CO<sub>2</sub> oft als notwendige, radikale Lösung vorgeschlagen, um den, von halogenierten Kohlenwasserstoffen welche zur Kategorie der HFC gehören, verursachten Treibhauseffekt, zu reduzieren. Das GWP (globales Erwärmungspotential) von CO<sub>2</sub> ist im Vergleich mit den HFC's (1 gegen mehrere Tausende) sehr gering. Zusätzlich stellt CO<sub>2</sub> kein Problem bei der Toxizität und Entflammbarkeit und bei der Wirkung auf die Ozonschicht (ODP = 0) dar. Obwohl der direkte GWP - Beitrag nur „1“ beträgt, würde das indirekte GWP steigen, wenn die CO<sub>2</sub> Kältekreisläufe energetisch weniger effizient als traditionelle Kältekreisläufe mit geringen COP (Leistungszahl) sind. Deshalb ist eine entsprechende Auslegung des CO<sub>2</sub> Gaskühlers Grundbedingung für einen optimalen COP zur realen Reduktion des Treibhauseffekts.

Da CO<sub>2</sub> sich deutlich anders verhält als andere Kältemittel, stellt CO<sub>2</sub> spezielle Anforderungen an den Wärmetauscherentwickler :

**Die Darstellung dieser Anforderungen ist das Thema dieses Vortrages.**

## 2. CO<sub>2</sub> Kältekreisläufe

Bevor die speziellen Anforderungen an CO<sub>2</sub> Wärmetauscher betrachtet werden, müssen die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten bei der CO<sub>2</sub> Anwendung in Kältekreisläufen samt den thermodynamischen Aspekten verglichen werden. Nachstehend eine Kurzzusammenfassung.

### **Drei Lösungen sind möglich (Fig. 1) :**

- Die einfachste Lösung, der einstufige Kälteprozess – ein normaler CO<sub>2</sub> Kältekreislauf (auf der linken Seite in Fig. 1) – ist vom Standpunkt der Anwendung und Ausführung die schwierigste Lösung. Wenn Wärme an die Umgebungsluft abgegeben werden soll, erfordert die niedrige kritische Temperatur von CO<sub>2</sub> einen überkritischen Prozess. Dafür werden sehr hohe Drücke benötigt. Der Wärmetauscher, der verwendet wird, um bei hohem Druck CO<sub>2</sub> abzukühlen, wird „Gaskühler“ genannt. Er wird später im Detail besprochen.
- Beim Diagramm in der Mitte der Fig. 1, mit einem CO<sub>2</sub> Pumpenkreislauf, wird CO<sub>2</sub> in einem Wärmetauscher, welcher durch verdampfendes HFC oder NH<sub>3</sub> gekühlt wird, verflüssigt. Das flüssige CO<sub>2</sub> versorgt den Verdampfer im Kühlraum. Der unterkritische, maximale CO<sub>2</sub> Betriebsdruck richtet sich nach dem verdampfenden HFC oder NH<sub>3</sub>.
- Die dritte Lösung, eine Kaskade, mit CO<sub>2</sub> auf der Niederdruckseite und HFC oder NH<sub>3</sub> auf der Hochdruckseite. Das verdampfende Kältemittel der Hochdruckseite verflüssigt das CO<sub>2</sub> der Niederdruckseite. Auch hier richtet sich der unterkritische, maximale CO<sub>2</sub> Betriebsdruck nach dem verdampfenden HFC oder NH<sub>3</sub>.

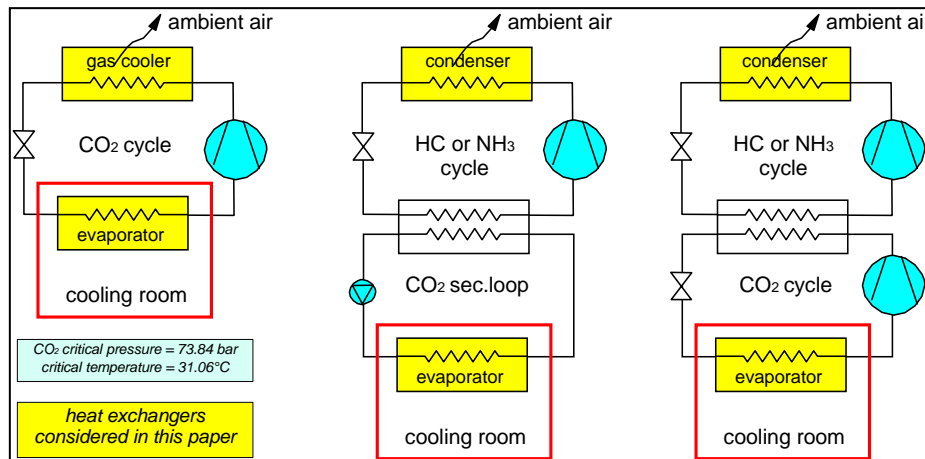


Fig. 1: Mögliche Anwendungen von CO<sub>2</sub> in Kältekreisläufen.

Alle Fälle erfordern CO<sub>2</sub> Verdampfer, welche unterkritisch bei einem gemäßigten Druck (von 6,8bar bis 39,65bar entsprechend ca. -50°C bis +5 ° C) arbeiten. Diese werden in Abschnitt 3 erörtert.

Die CO<sub>2</sub> Kondensatoren der Lösungen 2 und 3 sind nicht das Thema dieses Vortrages, da sie unterkritisch, im Kontakt mit anderen Kältemitteln und nicht mit Umgebungsluft arbeiten.

Für die erste Lösung repräsentieren Gaskühler eine innovative Konstruktion. Um die Einsatzbedingungen von Gaskühlern zu verstehen, wird auf den thermodynamischen Kreislauf des linken Schemas der Fig. 1 verwiesen. Dieser CO<sub>2</sub> Kreislauf unterscheidet sich signifikant von einem konventionellen Kreislauf mit Kondensation des Kältemittels bei annähernd konstanter Temperatur.

Um Wärmeübertragung an die Umgebungsluft zu erreichen, ist eine ausreichend hohe CO<sub>2</sub> Temperatur, bei einem Arbeitsdruck über dem kritischen CO<sub>2</sub> Druck von 73,84bar und entsprechend hohen Drücken und Temperaturen auf der Verdichteraustrittsseite, erforderlich.

Durch die Kälteanwendung ist die CO<sub>2</sub> Verdampfungstemperatur gegeben.

**Die weiteren Werte des Kältekreislaufes werden bestimmt durch :**

- projektierte CO<sub>2</sub> Druck am Verdichteraustritt,
- Gasaustrittstemperatur beim Gaskühler,
- Leistungszahl des Verdichters, (wurde in dieser Arbeit immer mit 70% angenommen<sup>[1]</sup>),
- Wirksamkeit des Wärmetauschers zwischen Gas – und Flüssigkeitsleitung (GLHX), (angenommen mit 0,6),
- CO<sub>2</sub> Gasüberhitzung am Verdichtersaugstutzen (angenommen mit 6K).

Die bei dieser Studie verwendeten thermodynamischen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> wurden mit NIST Refprop 6,0 berechnet. Der Einfluss der ersten beiden Parameter auf den COP wurde in Fig. 2 für eine Verdampfungstemperatur von -8°C, mit oder ohne GLHX, dargestellt.

**Die Gaskühleraustrittstemperatur ist der bestimmende Parameter, der den COP und den optimalen Druck beeinflusst.**

[1] Diese Annahme ist notwendig um den aktuellen COP Wert vorherzusagen und beeinflusst die Vergleiche zwischen CO<sub>2</sub> und konventionellen Kältemitteln. Da dies nicht der Umfang dieses Vortrages ist, dient dieses Annahme nur dazu, einen realistischen COP Wert zu liefern und beeinflusst nicht den Vergleich von Kreisläufen mit dem gleichen Kältemittel.

In Fig. 2 kann eindeutig abgelesen werden, dass eine projektierte Gaskühleraustrittstemperatur einen zugehörigen CO<sub>2</sub> Druck ergibt, welchen den COP maximiert.

Dieser Zusammenhang besteht nicht bei Kältekreisläufen mit konventionellen Kältemitteln wie HFC und NH<sub>3</sub>. Bei den konventionellen Kältekreisläufen ergibt eine niedrigere Kondensationstemperatur einen höheren COP.

Es zeigt zusätzlich, dass ein vorhandener GLHX den COP, speziell bei steigenden Gaskühleraustrittstemperaturen, verbessert. Ähnliche Ergebnisse werden gefunden, wenn verschiedene Verdampfungstemperaturen analysiert werden.

Daher ist die Gaskühleraustrittstemperatur der Grundparameter für den Kältekreislauf und bildet die wichtigste Spezifikation für den Entwurf des Gaskühlers.

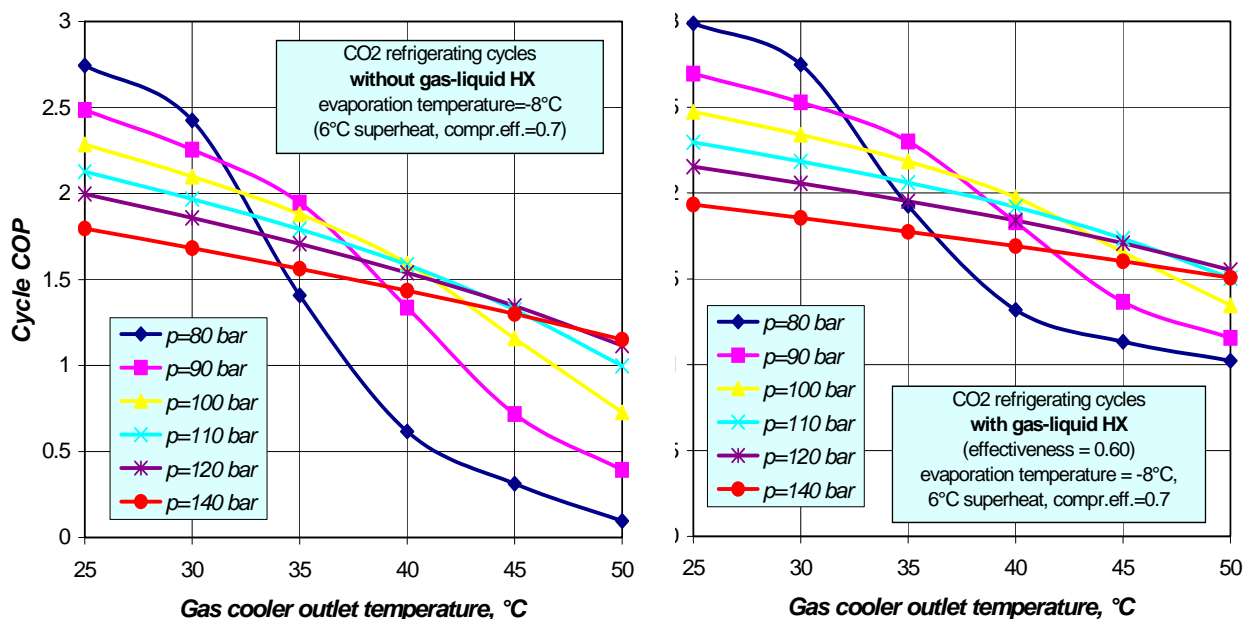


Fig. 2: Leistungszahl von CO<sub>2</sub>, Kältekreisläufe mit und ohne GLHX, bei einer Verdampfungstemperatur von -8°C.

### 3. Verdampfer

Die CO<sub>2</sub> Verdampfer für Kälteanwendungen müssen für keine besonders hohen Betriebsdrücke ausgelegt sein. (Tab. 1) Jedoch ist es notwendig, wenn durch längere Stillstandszeiten des Gerätes die Kühlraumtemperatur ansteigen kann, oder durch das Abtauen, verursachte mögliche Überdrücke zu verhindern. Wenn diese Bedingungen die Verdampfer oder die Kältemittelleitungen überlasten können, müssen Notbehelfe vorgesehen werden, welchen den Anlagendruck auf maximal 50bar bis 60 bar beschränken können. (Sicherheitsventile oder geeignete pump – down – Schaltungen um CO<sub>2</sub> Flüssigkeit oder Gas aus den Verdampfern abzusaugen und den Betriebsdruck auf das erforderliche Niveau abzusenken.)

T	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
p	10.04	12.02	14.26	16.81	19.67	22.88	26.45	30.42	34.81	39.65	44.97	50.81	57.22	64.25	72.05

Tab.1: Beziehung zwischen der Temperatur [°C] und Druck [bar] für CO<sub>2</sub>.

Andererseits ist es interessant festzustellen, ob ein, für konventionelle Kältemittel gebauter Luftkühler erfolgreich mit CO<sub>2</sub>, mit keinen oder geringen Änderungen, betrieben werden kann.

Wenn dies möglich ist, ist die Änderung der Kälteleistung abzuschätzen. Es kann vorweggenommen werden, dass die thermophysikalischen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> hervorragend geeignet sind, um im Vergleich, größere Wärmeübertragungsleistung zu erreichen. Verglichen mit R404A, hat CO<sub>2</sub> eine größere volumetrische Kälteleistung, eine höhere thermische Leitfähigkeit und eine niedrigere Viskosität. Diese Tatsachen, zusammen mit der größeren Dampfdichte, ermöglichen einen geringeren Druckabfall bei gleichem Massenstrom. Wenn man bedenkt, dass bei gleicher Übertragungsleistung die größere volumetrische Kälteleistung einen geringeren Massenstrom verursacht, stellt sich der geringere Druckabfall bei der gleichen Kälteleistung als sehr bedeutsam heraus.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse einer theoretischen Berechnung unter gleichen Bedingungen beim Vergleich R404A mit CO<sub>2</sub> mit einem LU-VE Einheitskühler, bei zwei verschiedenen Verdampfungstemperaturen, welche unter folgenden Randbedingungen arbeiten :

- Unveränderte Spezifikation : Eine geringfügige Zunahme der Leistung bei -8° C, mit steigender Tendenz (von 3,5% auf 11%) bei fallenden Temperaturen, die Gasgeschwindigkeit und der Druckverlust sind sehr gering.
- Reduktion der Anzahl der Einspritzungen : Die Geschwindigkeit im Rohr erreicht einen optimalen Wert und eine 6% bis 7 %ige Kapazitätsverbesserung zeigt sich im Vergleich mit dem vorherigem Fall. Die Reduktion der Einspritzungen reduziert die Kosten des Saugsammelrohres und des Verteilers.
- Reduktion der Anzahl der Rohre und Einsatz von glatten Rohren anstatt „Microfin“ Rohre („Microfins“ .... schraubenförmig ausgekehlte Rohre, wie jene, welche normalerweise bei LU-VE Einheitskühlern benutzt werden) : „Microfin“ Rohre sind besonders nützlich bei Kältemitteln mit geringem Wärmeübertragungskoeffizient. Bei hohen Verdampfungstemperaturen ist jedoch ihr der Vorteil stark reduzierte, bei niedrigen Verdmpfungstemperaturen (-30°C) mit niedrigem Massenstrom bringen sie aber deutliche Verbesserungen.

Kältemittel	R404A	CO <sub>2</sub>		
Art der Rohre	Microfin			glatt
Anzahl der Einspritzungen	N	N	N/2	N/3
Verhältnis [%] (rel. zu R404A), to = -8°C, ΔT <sub>1</sub> = 8K	100.0	103.5	110.6	108.2
Verhältnis [%] (rel. zu R404A), to = -30°C, ΔT <sub>1</sub> = 6K	100.0	111.1	117.7	112.0

Tab.2: Vergleichende Leistung von Einheitskühlern für R404A und CO<sub>2</sub>. Diese Ergebnisse sind für einige typische Fälle gültig, sind aber im Allgemeinen nicht anwendbar.

**LU-VE hat an verschiedenste Kunden, für Kühlräume und andere Kälteanwendungen, mehr als 200 CO<sub>2</sub> Einheitskühler bis Ende 2005 geliefert.**

**LU-VE verfügt nun über eine Standardproduktpalette für CO<sub>2</sub> Verdampfer mit einem max. Betriebsdruck von 60 bar.**

#### 4. Gaskühler

Durch den höheren Betriebsdruck (bis zu 150bar) und den nachstehenden thermodynamischen Besonderheiten ist die Konstruktion von Gaskühlern wesentlich komplexer.

Der Grundaspekt für den thermodynamischen Entwurf liegt im Gegenstromprinzip der CO<sub>2</sub> Gaskühlung entlang der zugehörigen Isobaren und der im Gegenstrom geführten größeren Lufterwärmung. Dabei werden tiefere CO<sub>2</sub> Gasaustrittstemperaturen und damit ein geringerer COP erreicht als dies bei konventioneller Kondensation bei annähernd konstanter Temperatur möglich ist.

Fig. 3 zeigt eindeutig diesen Vorteil :

**Bei einer CO<sub>2</sub> Gasaustrittstemperatur von +35°C wird die Luft von +30°C auf ca. +65°C erwärmt.**

**Bei HFC beträgt die Kondensationstemperatur +45°C bei einer Lufterwärmung von +30°C auf ca. +42°C.**

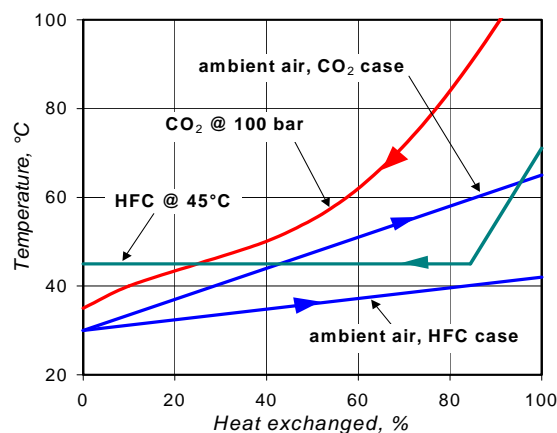


Fig. 3 : Wärmeübertragungsdiagramm für einen CO<sub>2</sub> Gaskühler und für einen Kondensator mit konventionellen Kältemittel.

Durch die größere Lufterwärmung bei der CO<sub>2</sub> Gaskühlung kann bei gleicher Übertragungsleistung die notwendige Luftmenge um das ca. 2 bis 3 fache reduziert werden. Die große Reduktion der Luftmenge ergibt beachtliche Vorteile in Bezug auf Verkleinerung der berippten Luftanströmfläche und Reduktion der elektrischen Betriebsleistungsaufnahme der Ventilatoren, der Beschaffungskosten der Ventilatoren samt elektrischem Anschluss und Regelung.

Für die Berechnung der Gaskühlung wurde eine eigene Berechnungsmethode entwickelt, bei der die gleitende Temperaturänderung zwischen CO<sub>2</sub> und Luft in 20 Berechnungsschritte unterteilt wird. In jedem Berechnungsschritt wird die logarithmische Temperaturdifferenz und der innere Rohrwärmeübergangskoeffizient mittels der Gnielinski Korrelation für die einzelnen Phasenflüsse berechnet.

Die Konstruktion für Gaskühler verwendet eine Rohrgeometrie von 25 x 21,65mm und einen Lamellenabstand von 2,1mm. Die Lamellen werden von LU-VE mit speziellen Turbulatoren gefertigt. Die Kupferrohre haben einen Durchmesser von 5/16" (7,94mm) und eine Wanddicke von 1mm, um dem bei Gaskühlern notwendigen Betriebsdrücken standzuhalten. Kupferrohre 5/16" x 1mm halten einem Betriebsdruck von 190bar stand (ASTM Regeln) und bersten bei 750bar.

Verglichen mit R404A Kondensatoren mit gleicher Kapazität, weisen, wie zuvor beschrieben, Gaskühler niedrigere Investitionskosten und geringeren Energieverbrauch, auf.

LU-VE hat beste Erfahrung beim Betrieb von ca. 30 CO<sub>2</sub> Gaskühlern inklusive einigen großen Geräten (wie im Beispiel in Fig. 4 zu sehen) gewonnen.

Die Druck – und Dichtigkeitsproben für Gaskühler erfolgen im Werk in drei Schritten :

1. Mit 30bar Druckluft in einem Wasserbecken, um grobe Undichtheiten festzustellen,
2. mit 170bar Wasserdruck,
3. mit 30bar Druckluft um Undichtheiten welche bei den Schritten 1. und 2. entstanden sein könnten, festzustellen.

Die Designstrategie von LU-VE ermöglicht die konstruktive Verbindung von Hochleistungs – Wärmeaustauscherflächen bei großen Wärmetauschern in Verbindung mit kleinen Rohrgeometrien und geringen Rohrdurchmessern. Die LU-VE CO<sub>2</sub> Gaskühler können daher als "sichere Technologie" für kältetechnische Anwendungen betrachtet werden. Diese Strategie und die vorhandene erprobte Erfahrung bei der Herstellung von Wärmetauschern sind wichtig für den CO<sub>2</sub> Anwender. Es besteht keine Notwendigkeit konstruktive „Exoten“ und unerprobte Technologien einzusetzen.



*Fig. 4: Ein großer CO<sub>2</sub> Gaskühler, vor der Auslieferung aus der LU-VE Werkstatt.*

## **5. Wärmetauscher mit Wassersprühsystem**

Das Wassersprühsystem ist ein weiteres von LU-VE mit besonderem Nutzen für konventionelle Kondensatoren, Rückkühler und für CO<sub>2</sub> Anwendungen entwickeltes Merkmal.

Die Idee hinter dem Wassersprühsystem ist einfach.

In den meisten Fällen beschränken sich die extremen Sommerbedingungen auf wenige Betriebsstunden im Jahr. Diese Hochsommerbedingungen erfordern eine Überdimensionierung der Wärmeaustauscherflächen und / oder bedingen einen zusätzlichen Nachteil bei der Kälteleistung und beim COP.

Gerade in diesen Zeiten ist es nützlich, zusätzlich die Wärmeaustauscherflächen mit etwas Wasser zu besprühen, um mit den vorhandenen Wärmeaustauscherflächen die Kondensationstemperatur oder die CO<sub>2</sub> Gasaustrittstemperatur deutlich zu reduzieren und verbessert so, wie wir im Kapitel 2 feststellten, den COP der Kälteanlage.

Daher ist Wassersprühsystem eine wertvolle Zusatzausstattung für große CO<sub>2</sub> Gaskühler.

Das Wassersprühsystem ist auf obigem Bild deutlich sichtbar.

Unter der Voraussetzung, dass ein entsprechendes Steuerungsgerät verwendet wird, ist bei entsprechender Auslegung der jährliche Wasserverbrauch sehr gering, wenn das Wassersprühsystem nur für wenige Stunden im Jahr (d.h. 200 bis 500) verwendet wird. Hygienische Probleme können nicht auftreten (d.h. Legionellen) da das meiste Wasser verdunstet und das Restwasser abgeleitet und nicht wie bei Kühltürme in den Wasserkreislauf zurückgeführt wird.

Je nach unbehandelter Wasserqualität besteht die Gefahr von Feststoffablagerungen an der Lamellenoberfläche.

LU-VE bietet zwei Systeme an :

- Für kurze jährliche Betriebszeiten des Wassersprühsystems, eine kostengünstige Standardlösung mittels einer Enthärtungsanlage.
- Für tausende jährliche Betriebsstunden des Wassersprühsystems und einer unbegrenzten Lebensdauer des Lamellensystems wird eine hoch entwickelte Umkehrosmoseanlage benötigt.

Beide Systeme können entsprechend der Wassersprühbetriebsdauer für CO<sub>2</sub> Anwendung eingesetzt werden und sind für den Anwender verfügbar.

## **6. Zusammenfassung**

Die großflächige Anwendung von CO<sub>2</sub> in der Kälteindustrie kann in naher Zukunft Realität werden. Vom Standpunkt der Wärmetauscherkonstruktion beinhaltet CO<sub>2</sub> wegen dem hohen Betriebsdruck einige Konstruktionsmerkmale, bietet aber einige beachtenswerte Vorteile bei der Dimensionierung und Auslegung von Gaskühlern.

LU-VE hat heute die Möglichkeit, mit ihren Apparaten diese neue Technologie zu bedienen und offeriert für den gesamten Anwendungsbereich die richtigen Produkte.