



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 22. Dezember 2014

Effizienzsteigerung einer transkritischen CO₂-Kälteanlage mittels Ejektor

Auftraggeber / Verfügung:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung
Mühlestrasse 4
CH-3063 Ittigen
www.bfe.admin.ch

Bauherr / Kofinanzierung:

Société coopérative Migros Neuchâtel-Fribourg
David Menoud
Route des Perveuils 2
Case postale 114
CH-2074 Marin-Epagnier

Bauherren-Vertretung:

Frigo-Consulting AG
Jonas Schönenberger
Postfach 296
Lerzenstrasse 8
CH-8953 Dietikon
www.frigoconsulting.ch

Autoren:

Jonas Schönenberger*, Frigo-Consulting AG, j.schoenenberger@frigoconsulting.ch
Erik Wiedenmann, Frigo-Consulting AG, e.wiedenmann@frigoconsulting.ch
Marcel Bärtsch, Frigo-Consulting AG, m.baertsch@frigoconsulting.ch

*Korrespondenzautor

BFE-Bereichsleiter:

Martin Pulfer

BFE-Programmleiter:

Stephan Renz

BFE-Vertrags- und Projektnummer:

8100146-02 / REF-1081-207

Installationsstandort:

Migros Bulle, Gruyère-Centre in Bulle, Koordinaten: 570'820 / 163'690

Haftung:

Diese Arbeit ist im Auftrag vom Bundesamt für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich die Autorenschaft verantwortlich. Die Autorenschaft bestätigt hiermit, dass die Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf dargestelltem Kenntnisstand beruhen und nach anerkannten Regeln des Fachgebietes sowie nach bestem Wissen ermittelt wurden. Wird von dem Inhalt Gebrauch gemacht oder darauf basierende Entscheidungen getroffen, lehnt die Autorenschaft jede Haftung für direkte oder indirekte Schäden ab, die aus der Verwendung des Inhaltes entstehen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abstract	4
Einleitung / Projektziele	5
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	6
Konzeptevaluation und Systemdimensionierung	6
Systembeschrieb	7
Herstellung	9
Installation	9
Inbetriebnahme	10
Etappe 1:	10
Etappe 2:	10
Etappe 3:	10
Betriebserfahrungen nach einem Jahr	11
Nationale / internationale Zusammenarbeit	14
Bewertung des P&D-Projektes und Ausblick in die Zukunft	14
Referenzen	15

Abstract

Das Einkaufszentrum Gruyère-Centre in Bulle wird während den Jahren 2013 und 2014 modernisiert. Zu diesem Anlass wird auch die Migros Verkaufsstelle im selben Gebäude modernisiert und mit neuster Technik ausgestattet. Die bestehende Kälteanlage mit synthetischen Kältemittel wird dabei durch eine transkritische CO₂-Kälteanlage ersetzt. Alleine die Substitution dieser bestehenden Kälteanlage durch eine nach dem Stand der Technik ausgeführten CO₂-Kälteanlage reduziert den jährlichen elektrischen Energieverbrauch für die gewerbliche Kälte um schätzungsweise 40% auf 550'000 kWh pro Jahr. Die Genossenschaft Migros Neuchâtel-Fribourg hat sich bereit erklärt, die Chance zu nutzen und die Effizienz, der seinerzeit noch in Planung stehenden Kälteanlage mittels Einbindung von Ejektoren zu steigern.

Im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts, finanziell unterstützt durch das Bundesamt für Energie, wurde im Vorfeld der Modernisierung der Verkaufsstelle Migros Bulle ein Konzept erarbeitet, um Ejektoren in eine transkritische CO₂-Kälteanlage zu integrieren. Die Planungs- und Entwicklungsphase wurde Anfang 2013 abgeschlossen und das Prinzip für die Einbindung von drei Ejektoren festgelegt. Aufgrund von Vorteilen in Sachen Effizienzsteigerung und Betriebssicherheit wurde der Fokus auf ein sogenanntes Multi-Ejektor-Konzept gelegt (Hafner 2012). Das System ist so konzipiert, dass jederzeit in eine herkömmliche Booster-Betriebsart gewechselt werden kann und somit eine höchstmögliche Betriebssicherheit gewährleistet ist.

Im Anschluss an die Planungs- und Entwicklungsphase wurde das System umgesetzt, vor Ort installiert und in Betrieb genommen. Die redundanten Betriebsmodi, herkömmlicher Booster-Betrieb und Ejektor-Betrieb ermöglichen eine schrittweise Inbetriebnahme des Systems und damit eine ausführliche Systemprüfung, bevor das System permanent mit Ejektoren betrieben wurde. Während dieser Phase wurden diverse Betriebspunkte abgefahren und verschiedene Regelstrategien getestet.

Der Saugdruck der Plus-Verdichter konnte mit dem Ejektor-Betrieb von -8°C auf -2°C angehoben werden. Die Kühlstellen vermögen trotz erhöhter Verdampfungstemperatur die Warentemperatur zu halten. Darüber hinaus kann durch die erhöhte Verdampfungstemperatur die Eisbildung am Verdampfer und dadurch die Anzahl Abtau-Zyklen reduziert werden.

Das Projekt zeigte auf, dass es möglich ist die Hochdruck-Regelung mittels Ejektoren und Hochdruck-Regelventil zu realisieren. Darüber hinaus wurde ersichtlich, dass der erste Ejektor (Flüssigkeit), unabhängig von den Last- und Betriebsbedingungen, nahezu permanent in Betrieb ist. Dies ermöglicht einen ganzjährigen Ejektor-Betrieb mit teilgefluteten Pluskühlstellen.

Die Messdatenaufzeichnung vor Ort liefert wichtige Betriebskennzahlen um den Betrieb der CO₂-Kälteanlage mit Ejektoren besser zu verstehen und deren Betrieb zu optimieren. Erste Hochrechnungen basierend auf Messwerten aus einer ersten Betriebsphase sowie Energiekennzahlen eines Betriebsjahres zeigen, dass die seinerzeit prognostizierte jährliche Effizienzsteigerung von 8 bis 10%, gegenüber einer herkömmlichen transkritischen CO₂-Kälteanlage, übertroffen wird. Detaillierte Energiekennzahlen zeigen, dass die Effizienz des Ejektor-Systems in Bulle im Vergleich zu einer transkritischen CO₂-Kälteanlage mit Parallelverdichtung um weitere 14% gesteigert werden konnte.

Einleitung / Projektziele

Die transkritische CO₂-Kälteanlage gilt in der Gewerbekälte als Stand der Technik. Schweizer Supermarkt- und Grosshandels-Ketten setzen derzeit fast ausschliesslich auf diese bewährte Technologie mit natürlichem Kältemittel. Bis und mit 2013 wurden in der Schweiz knapp 400 Kälteanlagen mit synthetischen Kältemittel durch transkritische CO₂-Kälteanlagen ersetzt. Transkritische CO₂-Kälteanlagen, wie sie heute standardmässig eingesetzt werden, sind rund 40% effizienter als deren Vorgänger mit synthetischen Kältemittel und Kälteträger. Die markante Effizienzsteigerung lässt sich unter anderem auf effizientere Komponenten, verbesserte Mess- und Regelungstechnik sowie effizientere Prozessführung und Einbindung ins Gebäudekonzept zurückführen.

Das CO₂ zirkuliert in einer Kälteanlage in einem geschlossenen Kreislauf und wird dabei auf verschiedene Druckstufen verdichtet oder entspannt. Das Verdichten von CO₂ mittels Verdichter geht einher mit zuführen von Energie. Dem entgegen wird bei der Entspannung von CO₂ Energie frei, welche bislang ungenutzt blieb. Unter Fachleuten wird die Einbindung von Ejektoren in eine transkritische CO₂-Kälteanlage als eine Möglichkeit betrachtet um die Effizienz weiter zu steigern. Die Einbindung von Ejektoren ermöglicht es die bei der Entspannung frei werdende Energie zu nutzen um die Verdichter zu entlasten.

Die Vielfalt, wie Ejektoren im System eingebunden werden können, ist gross. Im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojektes wird ein Ansatz für eine gewerbliche Kälteanlage ausgearbeitet und deren Funktion an einer ersten Feldanlage getestet und demonstriert. Dabei wird der Fokus auf ein sogenanntes Multi-Ejektor Konzept gelegt (Hafner 2012). Es werden Messdaten des Betriebs während eines Jahres aufgezeichnet, ausgewertet und untersucht. Die erlangten Erkenntnisse fliessen in eine Optimierung der Steuer- und Regeltechnik sowie in zukünftige Projekte ein. Ziel ist es die Markt-fähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Ejektoren in transkritischen CO₂-Kälteanlagen aufzuzeigen und damit den Energieverbrauch solcher Systeme weiter zu reduzieren.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Verlauf der folgenden Unterkapitel wird der Projektverlauf, von der Konzeptfindung über die Umsetzung hin zur Inbetriebnahme und Auswertung beschrieben.

Konzeptevaluation und Systemdimensionierung

Unter Fachleuten wird die Einbindung von Ejektoren in eine transkritische CO_2 -Kälteanlage als eine Möglichkeit betrachtet die Effizienz weiter zu steigern (Finckh 2011, Girotto 2012, Banasiak 2011, Van de Ven 2013). Basierend auf deren Erkenntnissen aus diversen Journalen, wurde aufgrund von Vorteilen in Sachen Effizienzsteigerung und Betriebssicherheit der Fokus auf ein sogenanntes Multi-Ejektor Konzept gelegt (Hafner 2012). Die Einbindung der Ejektoren kann aus Bild 1 und Bild 2 entnommen werden. Bild 1 stellt vereinfacht eine transkritische CO_2 -Booster-Kälteanlage dar, Bild 2 deren Erweiterung mit Ejektoren und Zubehör.

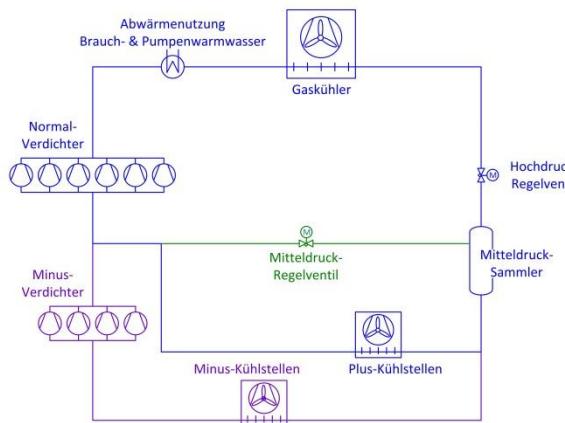


Bild 1: Prinzipschema einer transkritischen CO_2 -Booster-Kälteanlage, wie sie heute in der gewerblichen Kältetechnik als Stand der Technik gilt.

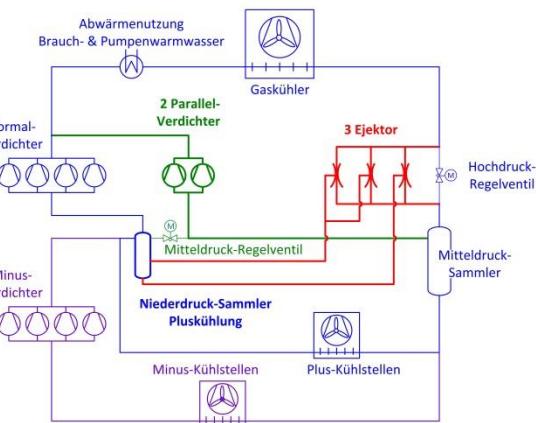


Bild 2: Prinzipschema einer mittels 3 Ejektoren erweiterten transkritischen CO_2 -Booster-Kälteanlage für gewerbliche Kälteerzeugung.

Wie aus Bild 1 und Bild 2 ersichtlich ist, wurde die herkömmliche CO_2 -Kälteanlage mittels folgenden Komponenten erweitert:

- 1 Niederdrucksammler Pluskühlung: Eingebunden in die Saugleitung der Pluskühlung, sodass flüssiges CO_2 abgeschieden wird.
- 2 Parallel-Verdichter: Ersetzen zwei Normal-Verdichter sowie die Funktion des Mitteldruck-Regelventils und verdichten das Flash-Gas von Mitteldruck-Sammler direkt wieder auf Hochdruck.
- 3 Ejektoren: Ersetzen die Funktion des Hochdruck-Regelventils und nutzen die Entspannungsarbeit um flüssiges und gasförmiges CO_2 aus dem Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler zu befördern.

Die bislang ungenutzte Expansionsarbeit wird im Ejektor verwendet um Kältemittel aus dem Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler zu befördern. Je geringer der Druckunterschied zwischen den beiden Behältern ist, desto effizienter kann flüssiges und gasförmiges Kältemittel überführt werden. Das überführte gasförmige Kältemittel verlagert die Verdichtungsarbeit von den Plus-Verdichtern auf die Parallel-Verdichter. Diese haben einen wesentlich höheren Saugdruck und benötigen deshalb weniger Antriebsenergie um das Kältemittel auf Hochdruck-Niveau zu verdichten. Aufgrund der ständigen Flüssigkeitsabsaugung aus dem Niederdruck- in den Mitteldruck-Sammler durch die Ejektor-Unterstützung, können die Verdampfer der Pluskühlung ohne Überhitzung betrieben werden. Dank des besseren Wärmeübergangs im teilgefluteten Betrieb kann der Saugdruck der Plus-Verdichter auf -2°C angehoben werden. Die Saugdruck-Anhebung der Plus-Verdichter sowie die Vorverdichtung von gasförmigem Kältemittel auf Saugdruck der Parallel-Verdichter führen zu einer wesentlichen Einsparung von Verdichtungsarbeit (Girotto 2012).

Es wurde ein Ejektor nach Banasiak 2011 eingesetzt, der das flüssige Kältemittel der überfluteten Pluskühlstellen aus dem Niederdruck-Sammler wieder zurück in den Mitteldruck-Sammler befördert (siehe Bild 2). Zwei weitere Ejektoren verdichten gasförmiges Kältemittel aus dem Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler von wo aus die Parallel-Verdichter die weitere Verdichtungsarbeit auf das Hochdruck-Niveau übernehmen. Die Kälteanlage und die dazugehörige Steuerung sind so konzipiert, dass jederzeit in einen herkömmlichen Booster-Betrieb ohne Ejektoren-Unterstützung gewechselt werden kann. Dazu sind sämtliche Kühlstellen mit herkömmlichen Kühlstellen-Reglern für eine Überhitzungsregelung bestückt. Im Ejektor-Betrieb wird die Überhitzung jedoch auf 0 K reduziert und die Verdampfer der Pluskühlstellen teilgefüttert.

Systembeschrieb

Bild 1 und Bild 2 zeigen das Prinzipschema der transkritischen CO₂-Booster-Kälteanlagen, links ohne Ejektor-Unterstützung und rechts mit Ejektor-Unterstützung. Die Verkaufsstelle hat eine Verkaufsfläche von 5'000 m² mit 135 m Kühl-/Tiefkühlmöbel und 14 Kühl-/Tiefkühlräume. Sämtliche Kühl-/Tiefkühlmöbel sind mit Glastüren und LED-Beleuchtung ausgestattet. Die totale nutzbare Kälteleistung der zentralgekühlten Kälteanlage wurde gemäß folgenden Angaben ausgelegt:

Pluskühlung 120 kW nutzbare Kälteleistung
bei Booster-Betrieb und Gaskühler Austritt +36 °C / 92 bar_{Abs}

Minuskühlung 55 kW nutzbare Kälteleistung
bei Booster-Betrieb und Verdampfung Plus-Verdichter -10 °C / 26.5 bar_{Abs}

Die Kälteanlage kann entweder im herkömmlichen Booster-Betrieb mit Parallel-Verdichtung oder zusätzlich mit Ejektor-Unterstützung betrieben werden. Je nach Betriebsart wurden folgende Betriebspa-rameter gewählt:

	Booster-Betrieb (ohne Ejektor-Unterstützung)	Ejektor-Betrieb (mit Ejektor-Unterstützung)
Verdampfung Normal-Verdichter	-8 °C / 28 bar _{Abs}	-2 °C / 33 bar _{Abs}
Verdampfung Minus-Verdichter	-33 °C / 13 bar _{Abs}	-33 °C / 13 bar _{Abs}
Mitteldruck-Sammler	±0 °C / 35 bar _{Abs}	+3 °C / 38 bar _{Abs}

Die Minus-Verdichter müssen im Ejektor-Betrieb eine höhere Druckdifferenz überwinden. Im Gegen-zug müssen die Normal-Verdichter im Booster-Betrieb die höhere Druckdifferenz überwinden können. Dies wurde bei der Auslegung der Verdichter berücksichtigt, sodass beide Betriebe ohne Einschrän-kungen gefahren werden können. Sollte sich der Ejektor-Betrieb zu einem Standard durchsetzen, kann auf die Leistungsreserve bei den Normalverdichtern verzichtet werden. Dies bringt eine Verbes-erung in der Regelung, da keine Kompromisslösung entsteht, sowie eine weitere Reduzierung der Kosten durch kleinere Verdichter.

In Zusammenarbeit beteiligter Unternehmen wurde das in Bild 2 dargestellte System auf die Anforderungen der Verkaufsstelle ausgelegt, berechnet und die Komponenten dimensioniert. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Dimensionierung der Normal- und Parallel-Verdichter in Abstimmung auf die eingesetzten Ejektoren gelegt.

Das Norwegische Forschungsinstitut SINTEF setzt sich seit längerer Zeit mit Ejektoren in transkritischen CO₂-Kälteanlagen und Wärmepumpen auseinander und gilt als eines der führenden Unternehmen in diesem Bereich. Die drei Ejektoren, mit geringfügig unterschiedlichen internen Geometrien, wurden von SINTEF berechnet, dimensioniert und nach ihren Angaben gefertigt. Bild 3 zeigt ein Schnittmodell eines Ejektors.

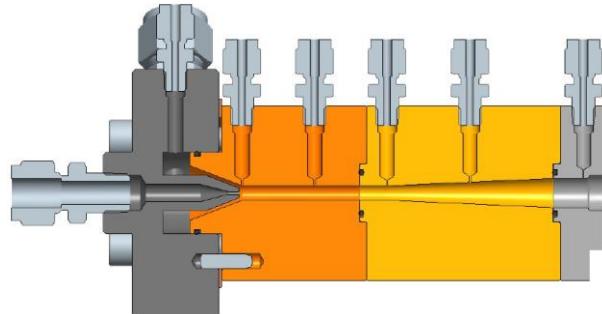


Bild 3: Schnittmodell eines Ejektors mit drei Kältemittel-Anschlussstutzen sowie 5 Druckmessstutzen.
(Quelle: SINTEF)

Das CO₂ wird von Hochdruck (Anschluss links) auf Mitteldruck (Anschluss rechts) entspannt und saugt dabei flüssiges oder gasförmiges CO₂ aus dem Niederdruck-Sammler (Anschluss oben links) an. Die fünf Druckmessstutzen erlauben es ein Druckprofil zu messen und aufzuzeichnen.



Bild 4: Einer von insgesamt drei Ejektoren, welche in der gewerblichen CO₂-Kälteanlage in Bülle für eine Effizienzsteigerung sorgen.

Nebst der Festlegung der Komponenten und der Auslegung des Systems wurde ein Regelkonzept erstellt und ausgearbeitet. Darin enthalten sind mehrere verschiedene Regelstrategien, wovon die meistversprechende Strategie bei der Inbetriebnahme evaluiert werden kann.

Herstellung

Nach der Festlegung der einzelnen Komponenten und der Fertigung der Ejektoren wurde die CO₂-Kälteanlage vom italienischen Verbundhersteller Enex Srl im Auftrag des schweizerischen Kälteunternehmers Alpiq InTec West AG gefertigt.



Bild 5: Ausschnitt der transkritischen CO₂-Kälteanlage mit drei Ejektoren. (Quelle: Enex Srl)

Installation

Die Kälteanlage wurde durch das Unternehmen Alpiq InTec West AG vor Ort in Bulle installiert. Dazu mussten saugseitig die verschiedenen Plus- und Minus-Kühlstellen und hochdruckseitig der Gaskühler angeschlossen werden. Weiter wurde der Elektroschalschrank installiert und die elektrischen Verbindungen gezogen. Zum Schluss galt es noch das gesamte System zu isolieren, bevor die Kälteanlage in Betrieb genommen werden konnte.



Bild 6: Betriebsbereite transkritische CO₂-Booster-Kälteanlage.



Bild 7: Die drei in die Kälteanlage eingebundenen Ejektoren.

Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Ejektoren erfolgte in drei Etappen:

Etappe 1: Dienstag 02.07.2013
Mittwoch 03.07.2013

Etappe 2: Dienstag 08.10.2013
Mittwoch 09.10.2013
Donnerstag 10.10.2013

Etappe 3: Dienstag 29.10.2013
Mittwoch 30.10.2013

Etappe 1:

Die Aussentemperatur während der Etappe 1 war zwischen +16°C und +20°C. Während der ersten Etappe war die Modernisierung der Verkaufsstelle noch nicht vollständig abgeschlossen und die Kälteleast noch stark reduziert. Die angeschlossenen Kühl- und Tiefkühlstellen entsprachen ca. 48% der Nennkälteleast. Um die Etappe 1 durchzuführen, musste die Kälteleast durch regelmässiges Öffnen und Schliessen von Kühl- und Tiefkühlräumen künstlich erhöht werden. Ansonsten ist von normalen Lastverhältnissen auszugehen, der Laden war geöffnet, die Regale frequentiert und das Verkaufspersonal beschickte zeitweise die Kühl- und Tiefkühlmöbel mit Ware.

Die Kühlstellen wurden im PID-Regelverfahren geregelt. Der Sollwert für die Überhitzung sämtlicher Kühlstellen wurde schrittweise reduziert. Parallel zur reduzierten Überhitzung wurde der Saugdruck Sollwert schrittweise auf -2°C angehoben. Mit den vorherrschenden Lastverhältnissen konnten die Kühlstellen die Sollwerte einhalten.

Bei stabilem Betrieb (Sollwert Überhitzung ± 0 K, Saugdruck Sollwert -2°C) wurden die Ejektoren in den verschiedenen Regelstrategien in Betrieb genommen und die Parameter optimiert. Um die Ejektoren zu testen wurde flüssiges CO₂ direkt in den Niederdruck-Sammler gelassen. Während die Ejektoren in Betrieb waren, wurde die Flüssigkeit wieder in den Mitteldrucksammler gefördert. Weiter wurde die Anhebung des Saugdrucks als Funktion des Flüssigkeitstandes im Niederdrucksammler getestet.

Etappe 2:

Die Aussentemperatur während der Etappe 2 war zwischen +0°C und +15°C. Die kältetechnische Installation der Verkaufsstelle war zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen und sämtliche Kühlstellen in Betrieb. Während der Etappen 2 und 3 entsprach die Nennkälteleast 100%. Es wurde keine künstliche Kälteleast z.B. mittels Öffnen und Schliessen von Kühl- und Tiefkühlräumen erzeugt.

Aufgrund der erhöhten Kälteleast im Vergleich zur Etappe 1, konnte der Ejektor 1 nahezu durchgehend betrieben werden. Es wurden gezielt Kühlstellen ausgeschaltet (Simulation Teillast) und verschiedene Betriebspunkte abgefahrene. Parallel zum Abfahren verschiedenster Betriebspunkte wurden die Regel-Parameter optimiert.

Etappe 3:

Die Aussentemperatur während der Etappe 3 war zwischen +8°C und +18°C. Während längeren Betriebsphasen lief das System konstant bei -2°C Verdampfungstemperatur. Weder der Flüssigkeitsstand im ND-Sammler stieg an, noch hatten die Kühlstellen Mühe die Temperatur zu halten.

Nach weiterem optimieren der Regelparameter wurde das System permanent mit Ejektoren betrieben. Seither läuft das System einwandfrei bei einer durchschnittlichen Verdampfungstemperatur von -2°C.

Betriebserfahrungen nach einem Jahr

Dank der Einbindung des ersten Ejektors (Flüssigkeit) kann der Saugdruck von -8°C auf -2°C angehoben werden. Weiter kann mit Hilfe des zweiten und dritten Ejektors verdampftes Kältemittel vom Verdampfungsdruck der Plus-Verdichter auf den Verdampfungsdruck der Parallel-Verdichter vorverdichtet werden. Im Ejektor-Betrieb werden die Parallel-Verdichter konstant bei höherer Drehzahl betrieben als im Booster-Betrieb. Alles in allem resultiert eine jährliche Effizienzsteigerung gegenüber einer transkritischen CO_2 -Kälteanlage von 14%.

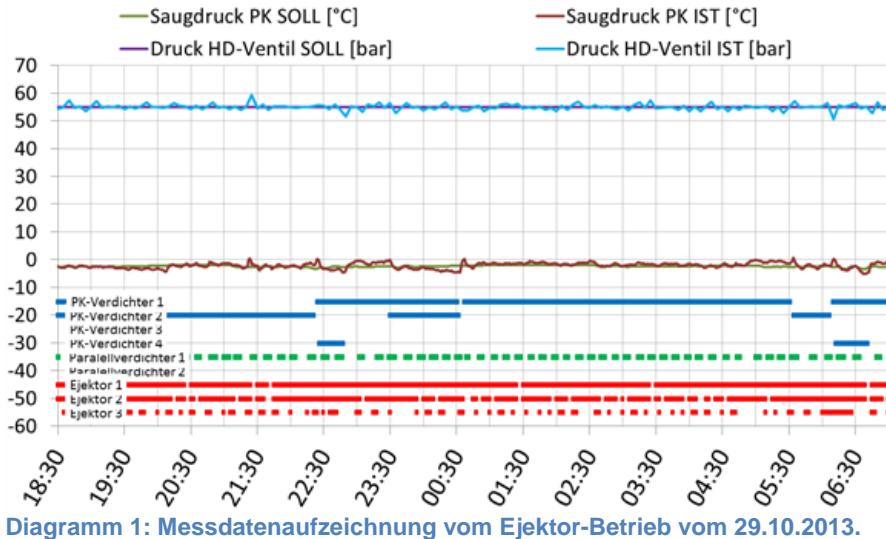


Diagramm 1: Messdatenaufzeichnung vom Ejektor-Betrieb vom 29.10.2013.

Aus dem Diagramm 1 ist ersichtlich, dass die Verdampfungstemperatur konstant bei -2°C liegt. Weiter zeigt es, dass der Ejektor 1 nahezu permanent in Betrieb war. Der Parallel-Verdichter wird häufig ein- und ausgeschaltet, sprich für diesen Betriebspunkt ist dieser zu gross. Die zwei Prozesse vom Booster- und Ejektor-Betrieb werden in Diagramm 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verdampfungstemperatur der Normalverdichter um 6 K und die der Parallel-Verdichter um weitere 3 K angehoben werden konnte. Damit haben die Normal- und Parallel-Verdichter eine kleinere Druckdifferenz zum Hochdruck zu überwinden.

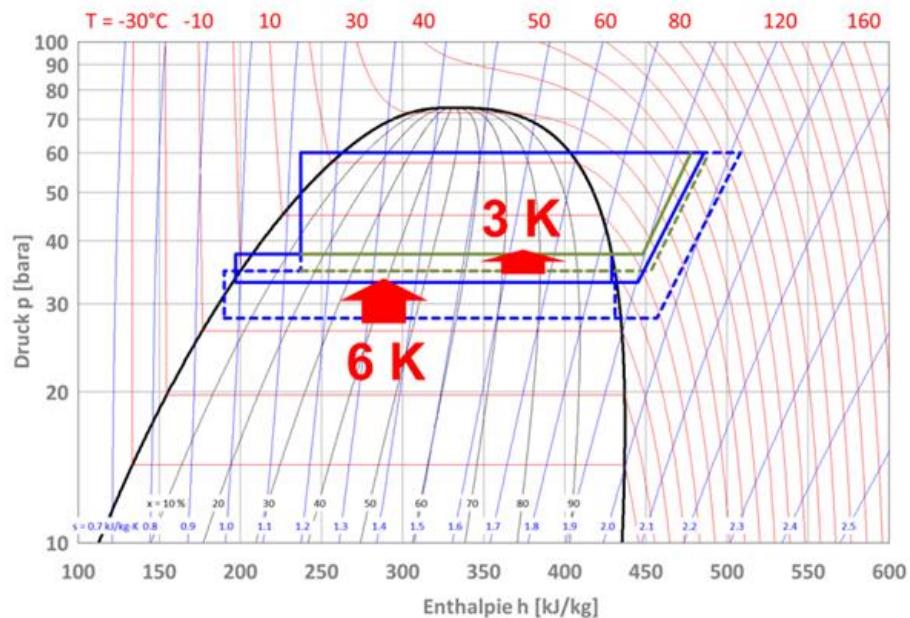


Diagramm 2: Prozessvergleich der zwei Betriebsarten mit und ohne Ejektor-Unterstützung im Log-p-h-Diagramm.

Die Kühlstellen vermögen trotz erhöhter Verdampfungstemperatur die Warentemperatur zu halten. Zusätzlich können durch die erhöhte Verdampfungstemperatur die Eisbildung am Verdampfer und deshalb die Anzahl Abtau-Zyklen reduziert werden.

Der Betrieb der Ejektoren ist bei jeder Jahreszeit möglich, was die universelle Anwendung dieses Konzeptes bestätigt. Selbst bei niedrigen Außentemperaturen, bei denen der energetisch optimale Hochdruck der CO₂-Kälteanlage im Bereich zwischen 50 und 60 bar_{Abs} liegt, ist es möglich mit Hilfe eines Ejektors das überströmende flüssige Kältemittel aus dem saugseitigen Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler zu pumpen.

Diagramm 3 zeigt den Ejektor-Betrieb während der Inbetriebnahme bei verschiedenen Hochdruckstufen. Durch das künstliche Hochfahren des Hochdruckes wurden diverse Betriebspunkte untersucht. Es wird aufgezeigt, dass der Hochdruck mit den Ejektoren geregelt werden kann, und dass bei höheren Hochdruckstufen der vom Ejektor vorverdichtete Massenstrom zunimmt. Dank dem vorverdichteten Massenstrom kann der Parallel-Verdichter auch bei niedrigem Hochdruck und somit auch im Winter betrieben werden.

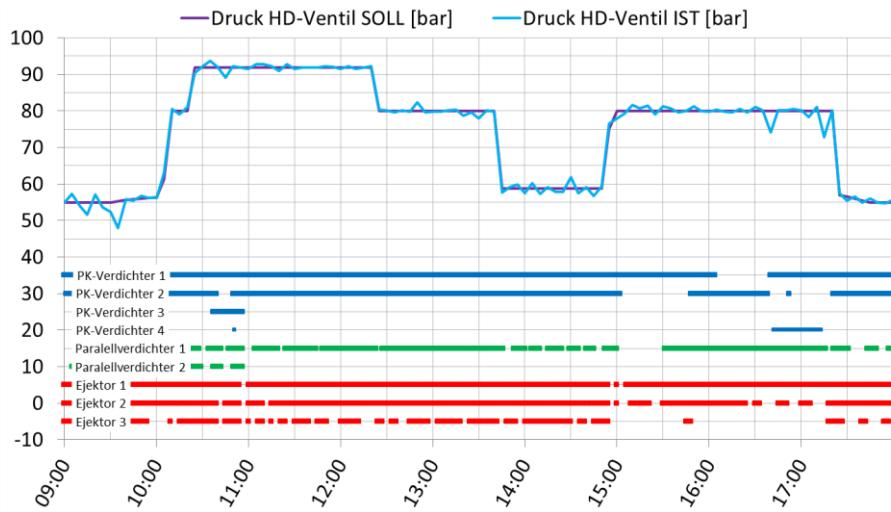


Diagramm 3: Messdatenaufzeichnung vom Ejektor-Betrieb vom 30.10.2013.

Transkritische CO₂-Kälteanlagen werden standardmäßig mit Wärmerückgewinnungseinheiten ausgestattet. Dazu wird die Kälteanlage im Winter oft transkritisch betrieben, um genügend Wärme bei tiefen Temperaturen bereitzustellen zu können. In diesen Betriebspunkten arbeiten die Ejektoren optimal und reduzieren die Verdichtungsarbeit deutlich.

In Diagramm 4 ist der Betrieb bei Außentemperaturen über +20°C ersichtlich. Es ist schön zu sehen wie die Anlage kontinuierlich bei -2°C Verdampfungstemperatur gefahren werden kann. Weiter ist der Parallel-Verdichter annähernd im Dauerbetrieb, während fast durchgehend ein Gasejektor arbeitet.

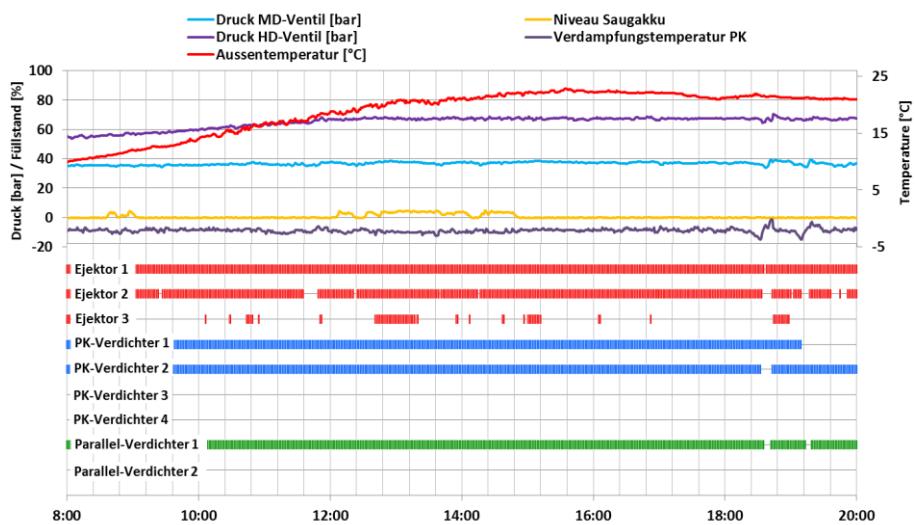


Diagramm 4: Messdatenaufzeichnung vom Ejektor-Betrieb vom 07.05.14

In Diagramm 5 ist die Reduktion des Energieverbrauchs unmittelbar nach der Inbetriebnahme der Ejektoren ersichtlich. Dazu wurde der Energieverbrauch sechs Tage vor der Inbetriebnahme und 6 Tage nach der Inbetriebnahme aufgezeichnet und ausgewertet. Wird der Energieverbrauch gemittelt so ergibt sich eine Reduktion von ca. 10% bei einer mittleren Außentemperatur von +7°C

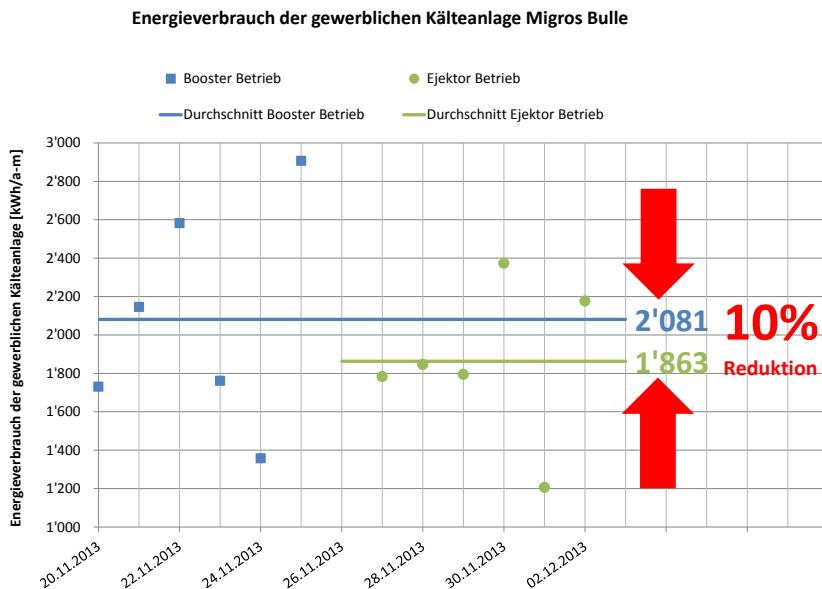


Diagramm 5: Reduktion des Energieverbrauchs unmittelbar nach Inbetriebnahme der Ejektoren.

Während einem Jahr wurde der Energieverbrauch der Anlage im Ejektor-Betrieb aufgezeichnet und mit vier vergleichbaren Märkten in Diagramm 6 dargestellt. Dabei ist der Energieverbrauch in kWh pro Laufmeter und Jahr dargestellt. Wie zu erkennen ist, beträgt die Einsparung etwa 14%. Es ist anzumerken, dass in den ersten vier Wochen der Aufzeichnung ein Temperaturfühler ungünstig platziert war, was in den ersten 4 Wochen zu einem höheren Energieverbrauch gegenüber vergleichbarer Märkte führte.

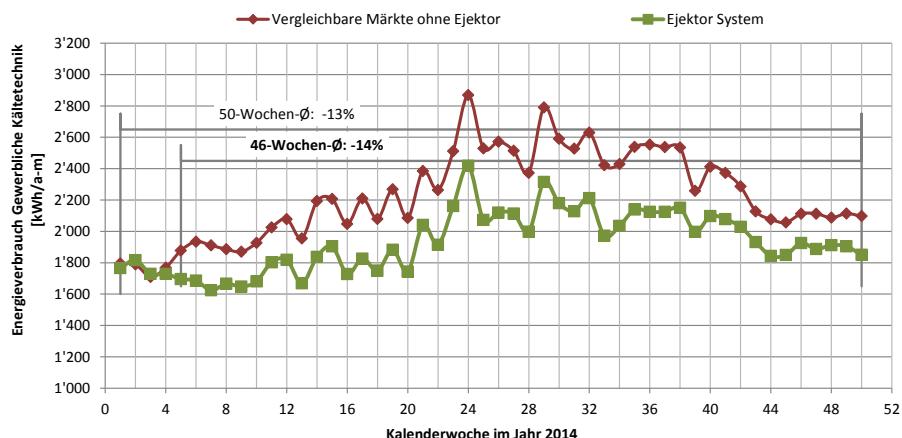


Diagramm 6: Energieverbrauch von 4 vergleichbaren Märkten in Rot und vom Ejektor-System Migros Bulle in Grün im Jahr 2014.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse wurden an den folgenden Fachtagungen präsentiert und mit Experten diskutiert:

- Präsentation an der Atmophere Brüssel, Oktober 2013
- Präsentation an der DKV Hannover, November 2013
- Wärmepumpen-Tagung Burgdorf, Juni 2014
- Gustav Lorentzen Conference, Hangzhou, September 2014
- DKV Düsseldorf, November 2014

Nationale / internationale Zusammenarbeit

Mit dem Vertrauen der Bauherrschaft der Migros Genossenschaft Neuchâtel-Fribourg sowie der Unterstützung vom Bundesamt für Energie ist ein weiterer Meilenstein in Richtung Energieeffizienz gelungen. Mit vereinten Kräften setzten sich Ingenieure von Frigo-Consulting AG sowie beteiligten Partnern über ein Jahr lang mit der Einbindung des Ejektors auseinander. Massgeblich beteiligt an der schweizweit ersten CO₂-Kälteanlage mit integriertem Ejektor ist das Forschungsinstitut SINTEF Energy Research aus Norwegen, der CO₂-Verbundhersteller Enex srl aus Italien sowie der Kälteanlagenbauer Alpiq InTec West AG aus Interlaken. Dank der intensiven und erfolgreichen Zusammenarbeit sämtlicher Parteien, gelang der Schritt von der Theorie zur Praxis und die weltweit erste transkritische CO₂-Booster-Kälteanlage mit Ejektoren konnte in einem Schweizer Supermarkt erfolgreich installiert und in Betrieb genommen werden.

Bewertung des P&D-Projektes und Ausblick in die Zukunft

In der Migros Verkaufsstelle in Bulle, Region Fribourg (Schweiz) wurde die weltweit erste transkritische CO₂-Booster-Kälteanlage mit drei Ejektoren installiert und in Betrieb genommen. Die Kälteanlage befindet sich seit Sommer 2013 erfolgreich in Betrieb. Durch die Einbindung von drei Ejektoren ist es möglich, flüssiges und gasförmiges Kältemittel mithilfe von Expansionsarbeit vom sauggasseitigen Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler zu befördern.

Der Saugdruck der Plus-Verdichter kann im Ejektor-Betrieb von -8°C auf -2°C, sowie jener der Parallel-Verdichter von ±0°C auf +3°C, angehoben werden. Die Kühlstellen vermögen trotz erhöhter Verdampfungstemperatur die Warentemperatur zu halten. Darüber hinaus kann durch die erhöhte Verdampfungstemperatur die Eisbildung am Verdampfer und dadurch die Anzahl Abtau-Zyklen reduziert werden.

Das Projekt zeigt auf, dass es möglich ist die Hochdruck-Regelung mittels Ejektoren und Hochdruck-Regelventil zu realisieren. Weiter wird ersichtlich, dass der erste Ejektor (Flüssigkeit), unabhängig von den Last- und Betriebsbedingungen, nahezu permanent in Betrieb ist. Dies ermöglicht einen ganzjährigen Ejektor-Betrieb mit teilgefluteten Pluskühlstellen.

Der Betrieb der Anlage wurde während eines Jahres akribisch untersucht und ausgewertet. Mit einer Reduktion des Energieverbrauchs um 14% kann das prognostizierte Ziel von 8% bis 10% deutlich übertroffen werden. Die Anlage wird in Zukunft weiterhin überwacht werden um weitere Erkenntnisse für zukünftige Anlagen zu gewinnen. Dadurch können kontinuierliche Optimierungen der Regelstrategien und des Konzepts durchgeführt werden.

Transkritische CO₂-Kälteanlagen in Kombination mit Ejektor-Technologie werden insbesondere in der gewerblichen und industriellen Kältetechnik unter Kältetechnikern als eine der zukünftigen Technologien gesehen. Der Ejektor hat keine beweglichen Teile und besteht lediglich aus drei Anschlüssen für das CO₂. Die verhältnismässig einfache Einbindung beruht ausschliesslich auf Standardkomponenten und gewährt eine hohe Betriebssicherheit. Vorausgesetzt die Technologie wird in breiter Anwendung eingesetzt, dann amortisieren sich die Mehrkosten in wenigen Jahren. Deshalb wird die Chance für eine Effizienzsteigerung mittels Ejektor in breiter Anwendung als realistisch eingestuft. Es ist davon auszugehen, dass der Einsatz von Ejektoren zur Effizienzsteigerung in gewissen Bereichen der Kälte- und Wärmepumpentechnik früher oder später als Stand der Technik gilt.

Im vierten Quartal 2014 wurde bereits ein weiteres P&D-Projekt realisiert, welches auf diesem aufbaut und die gewonnenen Erkenntnisse miteinbezieht. Das System wurde durch eine Erweiterung in der Tiefkühlung und zusätzliche Ejektoren noch effizienter gemacht. Erste Erkenntnisse zeigen eine Reduktion des Energieverbrauchs von 20% seit Inbetriebnahme. Hochrechnungen prognostizieren eine jährliche Reduktion von bis zu 25%.

Referenzen

- Banasiak K., Hafner A., and Andresen T.:** Experimental and numerical investigation on R744 ejector geometry. Proceedings of The 23rd International Congress of Refrigeration, ISBN 978-2-913149-89-2, Prague, Czech Republic, 2011.
- Hafner A, Försterling S., and Banasiak K.** Multi-Ejektoren Konzept für R-744 Supermarkt-Kälteanlagen; DKV-Tagung, Würzburg 2012.
- Finckh, O.; Schrey, R. and Wozny, M.:** Energy and efficiency comparison between standarized HFC and CO₂ transcritical systems for supermarket applications. ICR 2011, August 21-26, Prague, Czech Republic, ID: 357.
- Girotto, Sergio:** Enex, Proceedings of the Atmosphere2013 Conference Brussels.
<http://www.atmo.org/media.presentation.php?id=320>
- Hafner A., Poppi S., Nekså P., Minetto S., and Eikevik T.M.:** Development of commercial refrigeration systems with heat recovery for supermarket buildings. Proceedings of the 10th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Delft, Nederland, 2012, paper No. 192.
- Schönenberger J.: Hafner A, Banasiak K, Girotto S:** Effiziente Kälteerzeugung im Supermarkt mittels CO₂-Booster-Kälteanlage und Ejektor. DKV-Tagung, Hannover 2013.
- Schönenberger J.** Frigo-Consulting AG, Proceedings of the Atmosphere2013 Conference Brussels.
<http://www.atmo.org/media.presentation.php?id=306>
- Serwas L.:** Carrier, Proceedings of the Atmosphere2012 Conference Brussels.
<http://www.atmo.org/media.presentation.php?id=182>
- Van de Ven, Adinda; Hafner, Armin and Eikevik T.M.:** Bewertung von weiterentwickelten R744 Supermarktkälteanlagen für warme Klimazonen, DKV-Tagung, Hannover 2013.