



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht 18.12.2015**

---

# **Prozessoptimierung einer CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mittels Ejektoren und Liquid-Overfeed**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Bauherr / Kofinanzierung:**

Genossenschaft Migros Luzern  
Geschäftssitz Dierikon  
Postfach  
CH-6031 Ebikon  
[www.firma-xy.ch](http://www.firma-xy.ch)

Frigo-Consulting AG  
Erik Wiedenmann  
Postfach 296  
Lerzenstrasse 8  
CH-8953 Dietikon  
[www.frigiconsulting.ch](http://www.frigiconsulting.ch)

**Autoren:**

Erik Wiedenmann\*, Frigo-Consulting AG, [e.wiedenmann@frigoconsulting.ch](mailto:e.wiedenmann@frigoconsulting.ch)  
Jonas Schönenberger, Frigo-Consulting AG, [j.schönenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schönenberger@frigoconsulting.ch)  
\*Korrespondenzautor

**BFE-Bereichsleiter:**  
**BFE-Programmleiter:**  
**BFE-Vertragsnummer:**

Martin Pulfer  
Stephan Renz  
SI/501115-01

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.

## Zusammenfassung

Die Migros Filiale im Einkaufszentrum Mythencenter in Ibach im Kanton Schwyz, wurde im Sommer 2014 modernisiert und mit neuster Technik ausgestattet. Die bestehende Kälteanlage mit synthetischen Kältemittel wurde dabei durch eine transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlage ersetzt. Nach dem erfolgreichen P&D-Projekt in der Migros Filiale Bulle hat sich die Genossenschaft Migros Luzern dazu bereit erklärt die Chance zu nutzen und, wie in der Migros Bulle, mittels Einbindung von Ejektoren die Energieeffizienz der Kälteanlage zu steigern. Weiter soll durch eine Anpassung des Konzeptes in der Minus-Kühlung die Effizienzsteigerung um weitere 10% auf 25% erhöht werden.

Im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts, finanziell unterstützt durch das Bundesamt für Energie, wurde im Vorfeld der Modernisierung der Filiale Migros Ibach das Konzept der Einbindung von Ejektoren in eine transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlage erweitert. Die Planungs- und Entwicklungsphase wurde Mitte 2014 abgeschlossen und das Prinzip für die Einbindung von fünf Ejektoren festgelegt. Aufgrund von Vorteilen in Sachen Effizienzsteigerung und Betriebssicherheit sowie den aus dem vorhergehenden P&D-Projekt gewonnenen Erkenntnissen, wurde der Fokus erneut 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. Weiter ist die Kälteleistung auf zwei identische Anlagen aufgeteilt. Dies bietet, neben einer gewissen Redundanz, die einmalige Gelegenheit verschiedene Regelstrategien und Betriebsmodi zu testen und bei gleichen Betriebsbedingungen zu vergleichen.

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 getestet.

Die Verdampfungstemperatur der Plus-Verdichter konnte im Ejektor-Betrieb in der Pluskühlung beim Booster A von -8°C auf -2°C und beim Booster B von -8°C auf -4°C angehoben werden. Diese Unterschiede sind auf die etwas schlechteren Kühlstellen (Verdampfer Bedientheken) und noch ausstehende Optimierungen zurück zu führen. In der Minuskühlung konnte bei beiden Anlagen die Verdampfungstemperatur von -33°C auf -26°C angehoben werden. Die Kühlstellen vermögen mit den erhöhten Verdampfungstemperaturen die Warentemperatur halten. Darüber hinaus kann durch die erhöhte Verdampfungstemperatur die Eisbildung am Verdampfer und dadurch die Anzahl Abtau-Zyklen reduziert werden.

Das P&D-Projekt in Ibach bestätigt die Ergebnisse aus dem vorhergehenden P&D-Projekt in Bulle und zeigt auf, dass es durch die Teilflutung der Minus-Kühlung möglich ist, auch dort die Verdampfungstemperatur zu erhöhen. Erkenntnisse aus dem vorhergehenden P&D-Projekt wurden in die neue Regelung und Steuerung integriert. Dies ermöglicht einen ganzjährigen Ejektor-Betrieb mit teilgefluteten Pluskühlstellen und Minuskühlstellen.

Die Messdatenaufzeichnung vor Ort liefert wichtige Betriebskennzahlen um den Betrieb der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Ejektoren besser zu verstehen und deren Betrieb zu optimieren. Nach einer Messperiode von 47 Wochen zeigt sich, dass mit einer Effizienzsteigerung von 23% gegenüber transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen mit Parallel-Verdichtung, die prognostizierten 25% nur knapp verfehlt wurden. Es wird erwartet, dass die Effizienzsteigerung durch Erkenntnisse und Optimierungen am System noch weiter gesteigert werden kann, sodass die 25% im kommenden Jahr noch erreicht werden.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
Inhaltsverzeichnis .....	4
Einleitung / Projektziele .....	5
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse .....	6
Konzeptevaluation und Systemdimensionierung.....	6
Systembeschrieb.....	7
Herstellung.....	7
Installation.....	8
Inbetriebnahme .....	9
Etappe 1 .....	9
Etappe 2 .....	9
Ergebnisse / Erkenntnisse.....	10
Inbetriebnahme Etappe 1 .....	10
Inbetriebnahme Etappe 2.....	11
Betriebserfahrung nach einem Jahr.....	12
Nationale und internationale Zusammenarbeit.....	13
Ausblick .....	14
Referenzen .....	15
Literaturverzeichnis .....	15

## Einleitung / Projektziele

Die transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlage hat sich schweizweit in der Gewerbeküche als Stand der Technik durchsetzen können. Bis im Jahr 2015 wurden in der Schweiz über 450 Kälteanlagen mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel realisiert. Im Jahr 2013 wurde zusammen mit dem Bundesamt für Energie ein Pilot- und Demonstrationsprojekt in einer Migros Filiale in Bulle durchgeführt, in welchem ein CO<sub>2</sub>-Booster-System mit Parallel-Verdichtern und mehreren Ejektoren erweitert wurde (Schönenberger, Wiedenmann & Bärtsch, 2014). Dabei ermöglicht ein Flüssig-Ejektor einen teilgefluteten Betrieb der Kühlstellen und damit eine höhere Verdampfungstemperatur bzw. einen höheren Verdampfungsdruck. Weiter erlauben zwei Gasejektoren die Vorverdichtung und damit eine Verlagerung von gasförmigem CO<sub>2</sub> von den Normal-Verdichtern auf die Parallel-Verdichter auf einem höheren Druckniveau. Dank der geringeren Druckdifferenz für die Verdichter kann in der Migros Bulle eine Reduktion des Energieverbrauchs von 14% gegenüber vergleichbaren Märkten mit Parallelverdichtung erreicht werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen und Betriebsdaten dieses Projektes nach einem Jahr, wird mit der Unterstützung des Bundesamtes für Energie ein weiteres Pilot- und Demonstrationsprojekt mit der Einbindung von mehreren Ejektoren in einer transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage durchgeführt. Ziel ist es die gewonnenen Erkenntnisse umzusetzen und zusätzlich zur Pluskühlung auch die Minuskühlung im teilgefluteten Bereich zu betreiben. Dabei wird die Kälteleistung der Filiale auf zwei identische Anlagen, im weiteren Verlauf des Berichts mit Booster A und Booster B bezeichnet, aufgeteilt. Somit können einmalige Vergleiche zwischen Ejektor-Betrieb und herkömmlichem Booster-Betrieb gemacht werden.

Durch die Anhebung der Verdampfungstemperatur in der Pluskühlung von -8°C auf -2°C, der zusätzlichen Anhebung in der Minuskühlung von -33°C auf -26°C sowie der Vorverdichtung durch die Gasejektoren, wird eine Effizienzsteigerung von 25 % gegenüber herkömmlichen CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlagen erwartet.

# 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

Das P&D-Projekt in der Migros Bulle hat das Potential von Ejektoren in transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen deutlich aufgezeigt. Basierend auf dem angewendeten Multi-Ejektor Konzept wird das System wie in Bild 2 dargestellt erweitert (Hafner, 2012).

Bild 1 stellt vereinfacht das Prinzipschema der transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit mehreren Ejektoren in Bulle dar. Dabei kommen drei Ejektoren zum Einsatz. Einer als Flüssig-Ejektor, um einen teilgefluteten Betrieb zu ermöglichen, und zwei als Gas-Ejektoren für die Vorverdichtung von CO<sub>2</sub> zu den Parallel-Verdichtern.

Bild 2 zeigt die geplante Erweiterung für die modernisierte Migros Filiale Ibach. In Blau dargestellt sind sämtliche Komponenten, welche zum Stand der Technik gehören. Die grün dargestellten Komponenten wurden im Rahmen des vorhergehenden P&D-Projekt (Migros Bulle) in ein vergleichbares System integriert. Rot sind sämtliche Komponenten, welche gegenüber dem vorhergehenden P&D-Projekt (Migros Bulle) ergänzt werden.

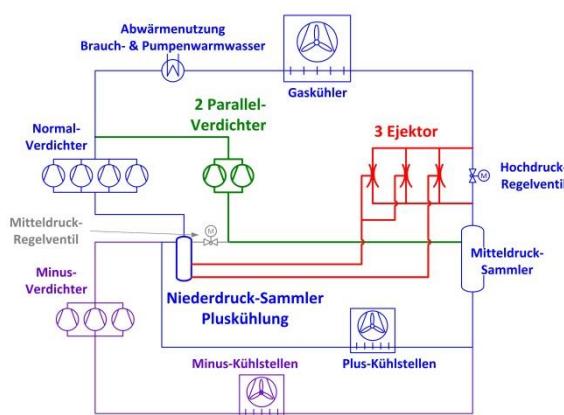


Bild 1: Prinzipschema einer mittels 3 Ejektoren erweiterten transkritischen CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage für gewerbliche Kälteerzeugung wie sie in der Migros Filiale Bulle seit Juli 2013 im Einsatz ist.

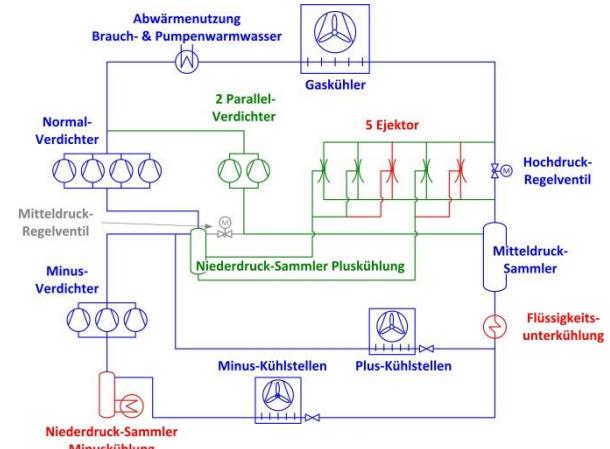


Bild 2: Prinzipschema einer mittels 5 Ejektoren erweiterten transkritischen CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage für gewerbliche Kälteerzeugung wie sie in der Migros Filiale Ibach seit Oktober 2014 im Einsatz ist.

Wie in Bild 2 zu erkennen ist, wird das Konzept des vorhergehenden P&D-Projekts in Bulle um folgende Komponenten ergänzt.

- Einen zusätzlichen Niederdrucksammler in der Minuskühlung: Eingebunden in die Saugleitung der Minuskühlung, sodass flüssiges CO<sub>2</sub> abgeschieden wird.
- Einen Flüssigkeitsunterkühler: Um allfällige Flüssigkeit im Niederdrucksammler der Minuskühlung zu verdampfen.
- Zwei zusätzliche Ejektoren: Je ein Gas- und ein Flüssig-Ejektor um die Regelung des Hochdrucks zu verfeinern und die Expansionsenergie besser auszunützen.

Die zusätzlichen zwei Ejektoren ermöglichen eine feinere Regelung des Hochdrucks über die Ejektoren und damit eine höhere Nutzung der Expansionsenergie. Die Arbeit des Hochdruckregelventils nimmt immer mehr ab. Der zusätzliche Niederdrucksammler in der Minuskühlung ermöglicht, wie in der Pluskühlung, einen teilgefluteten Betrieb der Kühlstellen. Dabei wird die überschüssige Flüssigkeit durch den installierten Flüssigkeitsunterkühler verdampft. Mit Hilfe des teilgefluteten Betriebs der Minus-Kühlstellen kann die Verdampfungstemperatur der Minuskühlung von -33°C auf -26°C angehoben werden. Die zu überwindende Druckdifferenz der Minus-Verdichter nimmt somit markant ab. Die im vorhergehenden P&D-Projekt resultierende Effizienzeinbusse in der Minuskühlung, durch die erhöhte Druckdifferenz, ist somit behoben. Weiter noch können die Minus-Verdichter nun effizienter als in herkömmlichen transkritischen CO<sub>2</sub>-Booster Kälteanlagen arbeiten.

## Systembeschrieb

Bild 2 zeigt das Prinzipschema der transkritischen  $\text{CO}_2$ -Kälteanlage mit Ejektor-Unterstützung in der Pluskühlung und einem zusätzlichen Saugakkumulator in der Minuskühlung. Die Migros Filiale Ibach hat eine Verkaufsfläche von  $5'250 \text{ m}^2$  mit 167 m Kühl- und Tiefkühlmöbel sowie 9 Kühl- und Tiefkühlräumen. Die Kühl- und Tiefkühlmöbel sind mit LED-Beleuchtung ausgestattet. Die totale nutzbare Kälteleistung der zentral gekühlten Kälteanlage wurde gemäss folgenden Angaben ausgelegt.

Pluskühlung      2 x 95 kW nutzbare Kälteleistung  
Bei Booster-Betrieb und Gaskühler Austritt  $+36^\circ\text{C}$  / 92 bar<sub>Abs</sub>

Minuskühlung      2 x 29 kW nutzbare Kälteleistung  
bei Booster Betrieb und Verdampfung Plus-Verdichter  $-8^\circ\text{C}$  / 26.5 bar<sub>Abs</sub>

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

	Booster-Betrieb (ohne Ejektor-Unterstützung)	Ejektor-Betrieb (mit Ejektor-Unterstützung)
Verdampfung Normal-Verdichter	$-8^\circ\text{C}$ / 28 bar <sub>Abs</sub>	$-2^\circ\text{C}$ / 33 bar <sub>Abs</sub>
Verdampfung Minus-Verdichter	$-33^\circ\text{C}$ / 13 bar <sub>Abs</sub>	$-26^\circ\text{C}$ / 16 bar <sub>Abs</sub>
Mitteldruck-Sammler (Parallel-Verdichter)	$\pm 0^\circ\text{C}$ / 35 bar <sub>Abs</sub>	$+3^\circ\text{C}$ / 38 bar <sub>Abs</sub>

Die Normal-, und Minus-Verdichter müssen im Booster-Betrieb eine höhere Druckdifferenz überwinden können. Dies wurde bei der Auslegung der Verdichter berücksichtigt, damit beide Betriebe ohne Einschränkungen gefahren werden können. Sollte sich der Ejektor-Betrieb zu einem Standard durchsetzen, kann auf die Leistungsreserve bei den Verdichtern verzichtet werden. Dies bringt eine Verbesserung in der Regelung der Teillast, da keine Kompromisslösungen entstehen, sowie eine weitere Reduktion der Kosten, durch kleinere Verdichter und Komponenten.

## Herstellung

Nach der Festlegung der einzelnen Komponenten und der Fertigung der Ejektoren wurde die  $\text{CO}_2$ -Kälteanlage vom italienischen Verbundhersteller Enex Srl im Auftrag des schweizerischen Kälteunternehmers Alpiq InTec West AG gefertigt.



Bild 3: Verbundanlage bei der Fertigung in Italien (Quelle Enex Srl)

## Installation

Die Kälteanlage wurde durch das Unternehmen Alpiq InTec West AG vor Ort in Ibach 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.

In Bild 4 sind von Oben nach unten die fünf Ejektoren, das mechanische Hochdruckventil sowie das elektronische Hochdruckregelventil zu sehen. Beim Ejektoren in der Mitte wurde vorübergehend die Isolation eines Ejektors entfernt.



Bild 4: Von Oben; die fünf Ejektoren (ein Ejektor ohne Isolation), mechanisches Hochdruckventil und elektronisches Hochdruckventil

## Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Ejektoren erfolgte in zwei Etappen:

Etappe 1: Dienstag 4. November 2014  
Mittwoch 5. November 2014

Etappe 2: Mittwoch 3. Dezember 2014

### Etappe 1

In Etappe 1 wurde die erste der beiden Verbundanlagen (Booster A), in den Ejektor-Betrieb umgeschaltet. Die Aussentemperatur war zwischen +15°C bis +19°C und am zweiten Tag zwischen +4.5°C bis +11°C. Der Laden war geöffnet und es herrschte normale Kältelast. Die Regale waren frequentiert und das Verkaufspersonal beschickte regelmässig die Kühl- und Tiefkühlmöbel mit Ware.

In einem ersten Schritt wurde in der Plus-Kühlung der Soll-Wert der Überhitzung auf 0 K gesenkt und die Verdampfungstemperatur von -8°C auf -2°C angehoben. Dies entspricht dem Betrieb der Anlage Migros Bulle aus dem vorhergehenden P&D-Projekt. In einem zweiten Schritt wurde die Überhitzung in der Tiefkühlung auf 0 K gesenkt und die Verdampfungstemperatur von -33°C auf -26°C angehoben.

### Etappe 2

In Etappe 2 wurde die zweite der beiden Verbundanlagen (Booster B) in den Ejektor-Betrieb umgeschaltet. Die Aussentemperatur lag bei +2.5°C bis +5°C. Wie in Etappe 1 war der Laden geöffnet und regelmässig frequentiert. Das Personal beschickte die Kühl- und Tiefkühlmöbel regelmässig mit Waren.

Die Schritte bei der Inbetriebnahme entsprechen jenen von der Etappe 1. Als erstes wurde in der Pluskühlung die Überhitzung auf 0 K gesenkt und die Verdampfungstemperatur von -8°C auf -2°C angehoben. Anschliessend wurde in der Minuskühlung ebenfalls die Überhitzung auf 0 K gesenkt und die Verdampfungstemperatur von -33°C auf -26°C angehoben.

## Ergebnisse / Erkenntnisse

Dank der Einbindung der Ejektoren konnte, wie im vorhergehenden P&D-Projekt, die Verdampfungs-temperatur in der Plus-Kühlung von  $-8^{\circ}\text{C}$  auf  $-2^{\circ}\text{C}$  angehoben und zusätzlich gasförmiges  $\text{CO}_2$  vom Niederdrucksammler der Plus-Kühlung in den Mitteldrucksammler vorverdichtet werden. Neu konnte in der Minus-Kühlung die Verdampfungstemperatur von  $-33^{\circ}\text{C}$  auf  $-26^{\circ}\text{C}$  angehoben werden.

### Inbetriebnahme Etappe 1

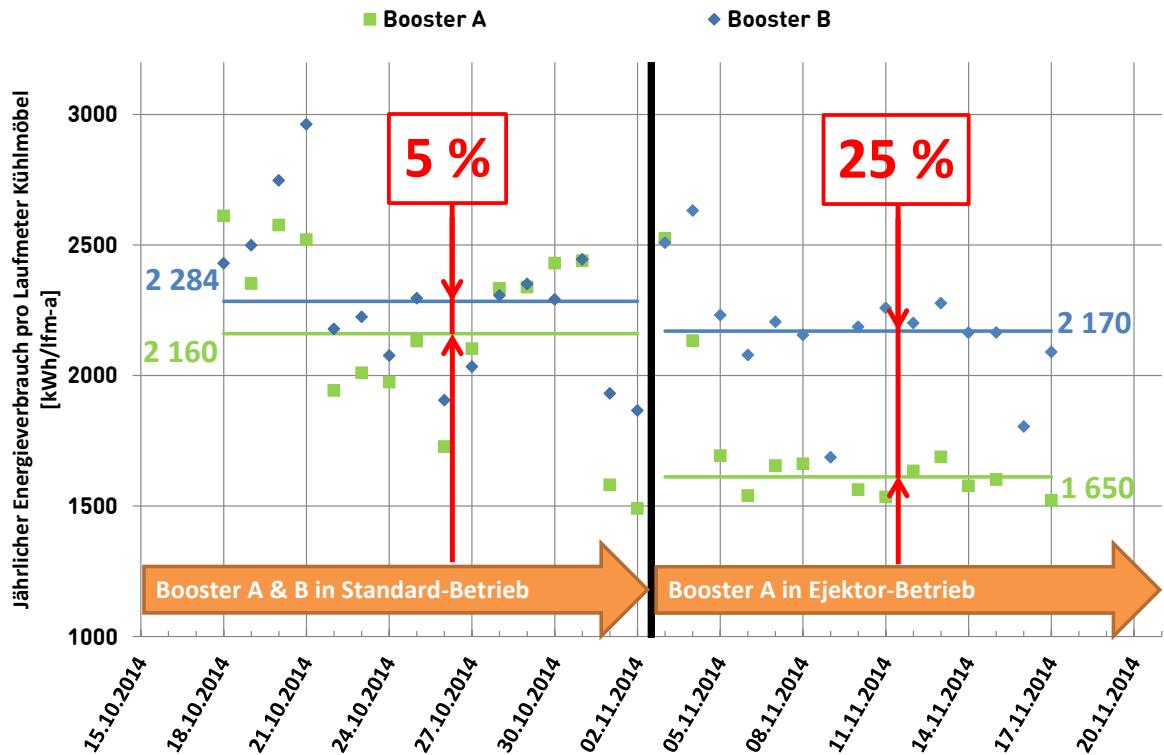


Diagramm 1: Vergleich des mittleren Energieverbrauchs nach Etappe 1 der Inbetriebnahme.

In Diagramm 1 wird der Energieverbrauch zwei Wochen vor und zwei Wochen nach der Etappe 1 der Inbetriebnahme dargestellt. Vor der Umstellung von Booster A in Ejektor-Betrieb, war die Differenz des Energieverbrauchs zwischen Booster A und Booster B ca. 5% (Booster A in blau und Booster B in rot). Am 4. November 2014, Unmittelbar nach der Umschaltung von Booster A in den Ejektor-Betrieb, wurde der Energieverbrauch bei Booster A gegenüber Booster B um ca. 20% gesenkt (während 14 Tagen).

## Inbetriebnahme Etappe 2

In Diagramm 2 ist der Energieverbrauch für beide Verbundanlagen aufgezeichnet. Es ist zu sehen, dass vor der Inbetriebnahme Booster A während 14 Tagen 5 % weniger elektrische Energie braucht als Booster B. Nach der Etappe 1 der Inbetriebnahme wird Booster A während 30 Tagen mit Ejektor-Unterstützung betrieben und braucht ca. 26 % weniger Energie als Booster B. Booster A ist somit, abzüglich der 5 % vor der Inbetriebnahme, während 30 Tagen 21 % effizienter im Ejektor-Betrieb.

Nach der Etappe 2 werden beide Kälteanlagen mit Ejektor-Unterstützung betrieben. Booster B arbeitet nach der Etappe 2 ca. 14 % effizienter als zuvor.

Die kleinere Effizienzsteigerung bei Booster B kommt daher, dass bei -2°C Verdampfungstemperatur einzelne Kühlstellen die Temperatur nicht halten können. Daher wurde die Verdampfungstemperatur vorübergehend wieder auf -5°C gesenkt. Dies ist in erster Linie auf schlechtere Kühlstellen (Verdampfer Bedientheken) und noch ausstehende Optimierungen zurück zu führen.

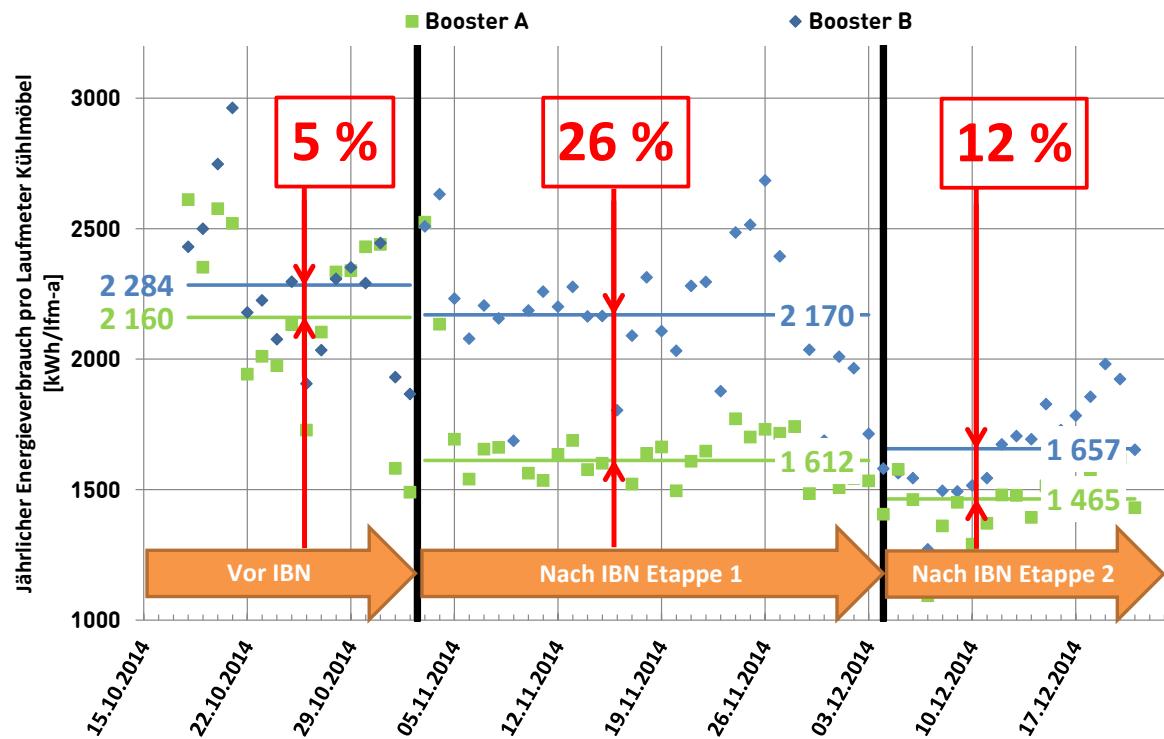


Diagramm 2: Energieverbrauch vor Inbetriebnahme, zwischen Etappe 1 und Etappe 2 sowie nach der Etappe 2.

## Betriebserfahrung nach einem Jahr

Während einem Jahr wurde das Betriebsverhalten der beiden Anlagen aufgezeichnet, ausgewertet und entsprechende Optimierungen vorgenommen. Diagramm 3 zeigt den Betrieb von Booster B während zwölf Stunden bei hohen Außentemperaturen im Juli 2015. Darauf sieht man die Verdampfungs-temperaturen TK Verbund To und PK Verbund To bei -26 bzw. -4°C. Außerdem sieht man wie, dank der Gas-Ejektoren, die beiden Parallel-Verdichter beinahe durchgehend in Betrieb sind.

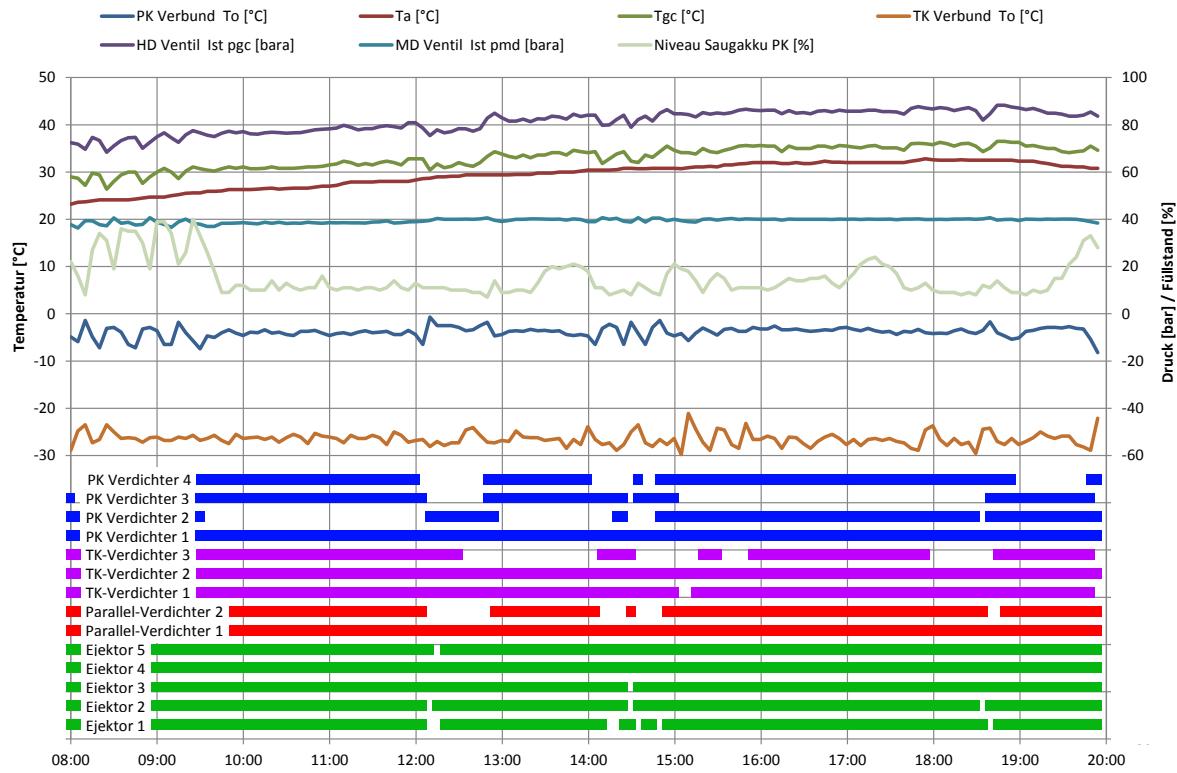


Diagramm 3: Messdatenaufzeichnung vom Ejektor-Betrieb vom 02.07.2015

Weiter wurde während eines Jahres der Energieverbrauch von Booster A und Booster B im Ejektor-Betrieb aufgezeichnet und zusammen mit dem Mittelwert aus zwei vergleichbaren Märkten in Diagramm 4 dargestellt. Dabei ist der Energieverbrauch in kWh pro Laufmeter und Jahr dargestellt. Die beiden Anlagen Booster A und Booster B erreichen zusammen einen durchschnittlichen Verbrauch von 2'457 kWh pro Laufmeter und Jahr, während die beiden Vergleichsanlagen einen durchschnittlichen Wert von 3'175 kWh pro Laufmeter und Jahr erreichen. Daraus wird ersichtlich, dass die Einsparungen über das Jahr 2015, im Vergleich mit einer transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Parallel-Verdichtern, ca. 23% betragen.

In den Sommermonaten, von Juni bis August 2015 ist ein starker Anstieg gegenüber den Vergleichsobjekten festzustellen. Dies hat verschiedene Gründe. Während dieser Zeit ist ein Rückschlagventil defekt gegangen und die Anlage konnte zeitweise nicht mehr im Ejektor-Betrieb arbeiten. Weiter konnte wegen der schlechten Bedientheken mit Booster B nur eine Verdampfungstemperatur von -4°C in der Pluskühlung betrieben werden. Und nicht zuletzt hatte ein Parallel-Verdichter vermehrt Öldruckstörungen, weshalb dieser teilweise nicht betrieben werden konnte und aufgrund dessen, die Effizienzsteigerung durch die Gasejektoren nicht vollumfänglich ausgenutzt werden konnte. All diese Probleme haben bei hohen Außentemperaturen einen umso höheren Einfluss, was sich wiederum in der dargestellten Kurve von Diagramm 4 bei den Sommermonaten zeigt. Ein weiterer Grund sind laufende Regel-Optimierungen, welche bei solchen Systemen erst nach einer gewissen Laufzeit und entsprechender Betriebserfahrung vorgenommen werden können.

Zusätzlich wird in Diagramm 4, in blauer Farbe, die Ejektor-Anlage aus der Migros Bulle dargestellt. Dabei handelt es sich um hochgerechnete Werte, um die dort installierten Türen bei den Kühlmöbeln der Pluskühlung zu berücksichtigen. Wäre die Migros Bulle ohne Türen ausgeführt wäre der jährliche Energieverbrauch pro Laufmeter ca. 2704 kWh. Im Vergleich zur Anlage in der Migros Ibach haben wir somit einen ca. 10 % weniger effizienten Betrieb. Die Anlage in Bulle wäre aber so immer noch rund 15% besser als das Mittel der beiden Vergleichsmärkte, in rot dargestellt.

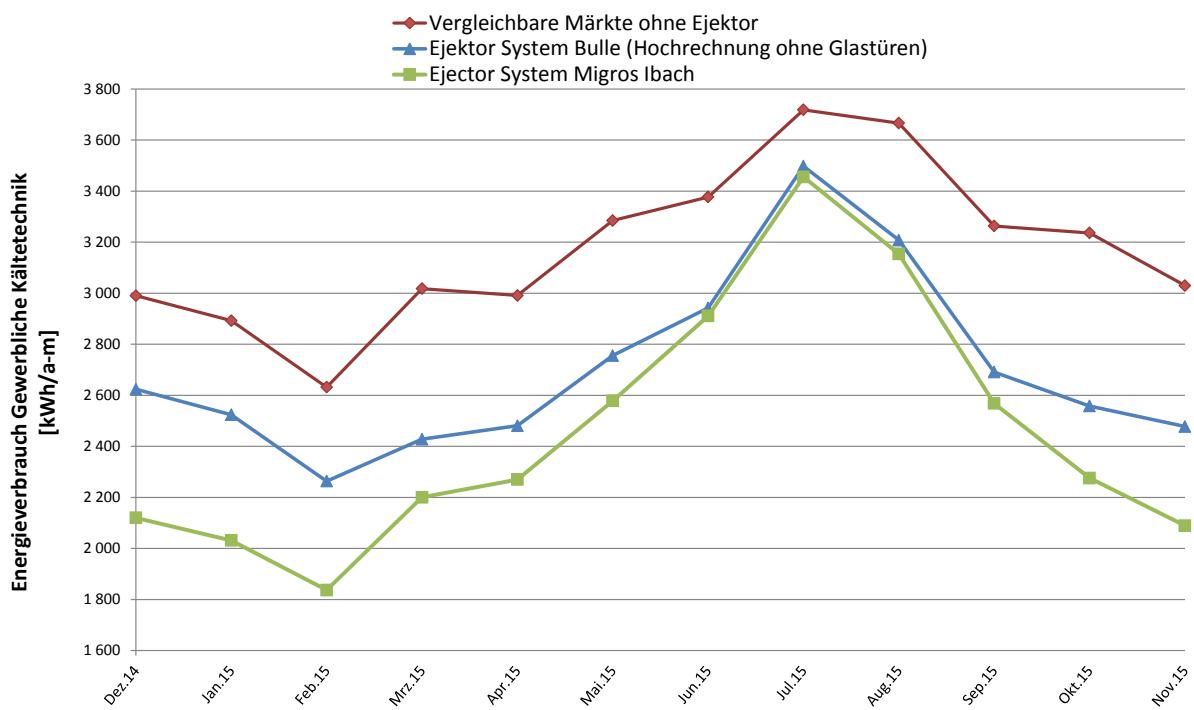


Diagramm 4: Energieverbrauch von 2 vergleichbaren Märkten in Rot und vom Ejektor-System in Ibach in Grün im Jahre 2015

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Mit dem Vertrauen der Bauherrschaft der Migros Genossenschaft Luzern und 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 beteiligte Partner mit der Weiterentwicklung des vorangehenden P&D Projekts in Bulle auseinander. Massgeblich beteiligt an der Weiterentwicklung ist der CO<sub>2</sub>-Verbundhersteller Enex srl aus Italien sowie der Kälteanlagenbauer Alpiq InTec West AG aus Interlaken. Dank der intensiven und erfolgreichen Zusammenarbeit sämtlicher Parteien, gelang ein weiterer Schritt zur Festigung der Ejektor-Technologie und damit zur effizienteren Kälteerzeugung in Supermärkten.

Dank diesen zwei Pilot- und Demonstrationsprojekts im Zusammenhang mit Ejektoren, konnte das Potential der Ejektoren-Technologie aufgezeigt werden. Die daraus resultierenden Erkenntnisse und Ergebnisse wurden an den folgenden Fachtagungen präsentiert und mit Experten diskutiert:

- Präsentation an der DKV-Tagung Düsseldorf, November 2014
- Präsentation an der Atmosphere Brüssel, März 2015
- Präsentation am Supermarkt Symposium Darmstadt, April 2015
- Präsentation am IEA Heat Pumping Technologies Workshop in Muttenz November 2015
- Präsentation an der EHI Preisverleihung in Köln, November 2015

Weitere Präsentationen an Fachtagungen sind für das Jahr 2016 geplant:

- Präsentation an der Atmosphere Barcelona, April 2016
- Präsentation an der Gustav Lorentzen Konferenz in Edinburgh, August 2016
- Präsentation an der DKV-Tagung Kassel, November 2016

Die positiven Ergebnisse haben in der Schweiz wie auch international für Aufsehen gesorgt. Die Nachfrage nach der Ejektor-Technologie nimmt stetig zu. In der Zwischenzeit wurden insgesamt 8 Systeme in der Gewerbekälte mit Ejektoren ausgeführt. Dazu wurden im Jahr 2015 zusammen mit verschiedenen Industriepartnern die Ejektor-Technologie weiterentwickelt.

## Ausblick

In der Migros Filiale in Ibach wurde eine transkritische CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage mit fünf Ejektoren und einem Saugakku in der Plus- und Minuskühlung installiert und in Betrieb genommen. Die Kälteanlage befindet sich seit November 2014 erfolgreich in Betrieb. Durch die Einbindung der Ejektoren ist es möglich, flüssiges und gasförmiges Kältemittel mithilfe von Expansionsarbeit vom sauggasseitigen Niederdruck-Sammler in den Mitteldruck-Sammler zu befördern.

Die Verdampfungstemperatur der Plus-Kühlung kann im Ejektor-Betrieb von -8°C auf -2°C bzw. -4°C, in der Minus-Kühlung von -33°C auf -26°C und der Mitteldruck um 5 bar 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 festigt die Erkenntnisse aus dem P&D-Projekt „Effizienzsteigerung einer transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mittels Ejektor“ und zeigt, dass die gewonnenen Einsparungen durch Erweiterungen in der Minus-Kühlung noch weiter gesteigert werden können.

Der Betrieb der Anlage wird seit der Inbetriebnahme akribisch untersucht und ausgewertet. Mit einer Reduktion des Energieverbrauchs von 23% während des Jahres 2015 wird nach weiteren Erkenntnissen und Optimierungen erwartet, dass die prognostizierten 25% erreicht werden können. Die Anlagen werden in Zukunft weiterhin überwacht, um weitere Erkenntnisse für zukünftige Anlagen zu gewinnen. Dadurch können kontinuierliche Optimierungen der Regelstrategien und des Konzepts durchgeführt werden.

Mit der Inbetriebnahme der zweiten transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Ejektoren und einer erneuten Effizienzsteigerung kann das Potential dieser Technologie bestätigt werden. Dank der vergleichsweise einfachen und sicheren Einbindung und der hohen Effizienzsteigerung ist der Weg zum Kälteanlagenstandard nicht mehr weit.

Bestätigt wird dies durch laufende Projekte und deren Umsetzung mit Ejektoren durch Frigo-Consulting AG in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern, den hohen Kundenanfragen nach solchen Anlagen sowie dem Bestreben nach Lösungen für ausgereifte Regelstrategien und Ejektor-Einbindungskonzepten von namhaften Regelungs- und Verbundhersteller.

## Referenzen

### Literaturverzeichnis

- Hafner, A. (2012). Multi-Ejektoren Konzept für R-744 Supermarkt-Kälteanlagen. *DKV*. Würzburg.
- Schönenberger, J., Wiedenmann, E., & Bärtsch, M. (2014). *Effizienzsteigerung einer transkritischen CO2-Kälteanlage mittels Ejektor*. schweizerisches Bundesamt für Energie, Schweiz.