



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Jahresbericht 2010**, 31. Dezember 2010

---

## **Effiziente Kälteerzeugung**

**Integration einer Expansionsmaschine in ein  
CO<sub>2</sub>-Kältesystem**

---



**prodega**

cash+carry

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra



**ALPIQ**

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Frigo-Consulting AG  
Feldstrasse 30  
CH-3073 Gümligen  
[www.frigoconsulting.ch](http://www.frigoconsulting.ch)

**Autoren:**

Raphael Gerber, Frigo-Consulting AG, r.gerber@frigoconsulting.ch

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Thomas Kopp

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154359/103308 / SI/500188-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Zusammenfassung

Das Kältemittel CO<sub>2</sub> kommt in stationären Kälteanlagen vermehrt zum Einsatz. Die relativ schlechte Leistungszahl des teilweise transkritischen Kaltdampfprozesses mit CO<sub>2</sub> kann durch Minimierung der Drosselverluste mit einer arbeitsleistenden Entspannung thermodynamisch verbessert werden. In einer realen Anlage im Feld ist eine Expansions-Kompressions-Maschine in eine CO<sub>2</sub>-Kälteanlage integriert und in Betrieb genommen worden.

Bei der zu integrierenden Maschine handelt es sich um eine Hubkolbenmaschine mit Verdichtungs- und Expansionsteilen und variabler Förderleistung. Die anhand eines Lastprofils dimensionierte Expansions-Kompressions-Maschine wurde an der Technischen Universität Dresden entwickelt, konstruiert, hergestellt und in die transkritische CO<sub>2</sub>-Anlage eingebaut.

Um die Maschine in die Kälteanlage zu integrieren war es nötig, die Kälteanlage des Cash&Carry Marktes Prodega in Basel mit den nötigen Komponenten zu erweitern. Dazu sind die evaluierten Teile Zwischenkühler, Ölrückführsystem, Rohrleitungen und Armaturen sowie entsprechende Regelkomponenten installiert und in Betrieb genommen worden.

Die Inbetriebnahme der Expansions-Kompressions-Maschine und der zugehörigen Komponenten konnte erwartungsgemäss erfolgen. Technische Probleme in Bezug auf die Regeldynamik, Regelstrategie, Fließverhalten und Vibrationen konnten bereits fast vollständig gelöst werden. Erste Messdaten zeigen die Übertragung der Expansionsarbeit in den Verdichtungsprozess in einzelnen Betriebszuständen.

Basierend auf den Anforderungen des Konstrukteurs der Maschine ist eine Regelstrategie und das Konzept zur Integration in die Hauptanlage realisiert worden und muss nach nächsten Betriebserfahrungen noch leicht angepasst und optimiert werden. Anschliessend kann anhand von aufgezeichneten Messdaten das Betriebsverhalten untersucht und ausgewertet werden.

Mit dem Projekt wird sich zeigen, ob die Integration einer solchen Maschine zur Effizienzsteigerung bei gewerblichen Kälteanlagen einfach realisierbar und wirtschaftlich ist und für zukünftige oder bestehende Kälteanlagen eine anwendbare Option darstellt.

# Abstract

Carbon dioxide is meanwhile often used as a refrigerant in stationary refrigeration systems. The comparatively poor coefficient of performance in a transcritical CO<sub>2</sub> cycle can be improved by minimizing the thermodynamic throttling losses with a expansion-compression unit. In this project, a two stage expander based on a free piston design was integrated into a CO<sub>2</sub> refrigeration system to verify the feasibility and the performance of the system in the field.

The expansion-compression-unit has a variable flow rate and is expanding the refrigerant on one side while partly compressing the refrigerant on the other side. It was designed, machined and assembled at the Technical University of Dresden (Germany) and then integrated into the main refrigeration plant.

The integration of the machine into the refrigeration system required extension of the main refrigeration plant at the cash&carry market Prodega in Basel with additional components. These chosen components such as an intercooler, the oil return system, piping and valves, control components and the expansion-compression-unit itself have been successfully installed and commissioned.

Based on requirements of the constructor of the expansion-compression-unit a regulation scheme was developed and realized with different partners and has successfully been implemented into the standard refrigeration controls through defined interfaces. Future operation will give the possibility to adapt and optimize controls and allow measurement data to be collected in order to analyze the operation of the system and its performance. First measurements prove the transition of extracted expansion work into the compression process and thus improvement of the COP at certain conditions.

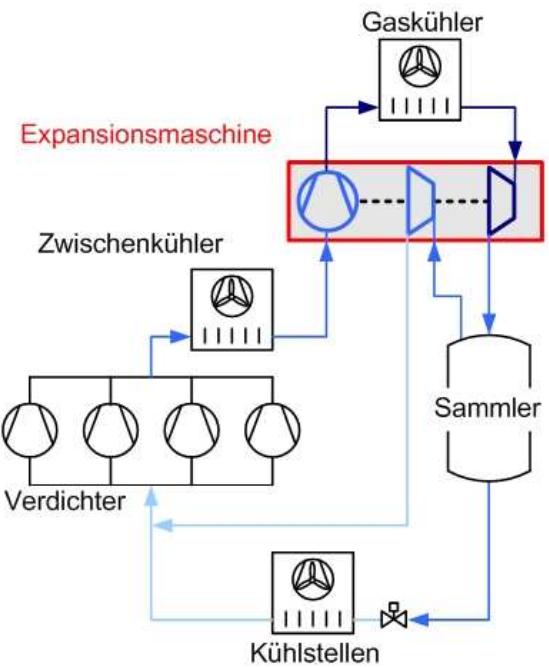
Technical problems have partly been solved in terms of fluid flow, control strategy, dynamics and mechanics.

This Project will give first results on whether the combination of a CO<sub>2</sub> refrigeration system with an expansion-compression unit is actually feasible and economically acceptable for this application in new or existing refrigeration plants.

# Projektziele

Im Jahresmittel weisen Pluskühllanlagen bei Grossgewerbekälteanlagen gegenüber herkömmlichen Kältemitteln bereits etwa 10% bessere Leistungszahlen auf, obwohl der Prozess mit CO<sub>2</sub> bei hohen Aussentemperaturen grosse thermodynamische Verluste beim Drosselvorgang aufweist. Entsprechend lässt sich der Leistungsbedarf von CO<sub>2</sub>-Anlagen im Pluskühlbereich weiter senken, wenn man eine Expansionsmaschine einbindet, welche die Drosselung des Kältemittels ersetzt (siehe nebenstehende Abbildung).

Die Aufnahmefähigkeit der Verdichter könnte im besten Fall je nach Betriebszustand um bis zu 40% reduziert werden [1]. Im Jahresmittel sind jedoch deutlich tiefere Werte zu erwarten und werden schätzungsweise bei 10% liegen. Entsprechend wird mit der Expansions-Kompressions-Maschine (ECU) im geplanten Objekt mit einer Einsparung von jährlich ungefähr 10'000 kWh elektrische Energie gerechnet.



In einer neuen Kälteanlage mit ca. 80 kW Kälteleistung ist ein Prototyp der Expansions-Kompressions-Maschine (ECU) im Feldversuch in die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage integriert und in Betrieb genommen worden. Die Einbindung der Maschine in die Kälteanlage wurde in früheren Arbeiten der Technischen Universität Dresden (TUD) konzeptionell untersucht. Nun war das Ziel der Arbeit, die geeignete Einbindung für die konkrete Anwendung zu definieren, eine Maschine anhand des geforderten Lastprofils zu dimensionieren und zu konstruieren sowie diese in die Kälteanlage einzubauen und in Betrieb zu nehmen.

Im Projektjahr eröffnete Prodega den Neubau in Basel. Gleichzeitig ist die Pluskühlwanlage mit integrierter ECU gebaut und in Betrieb genommen worden. Vorgängig wurden dazu zusätzliche Komponenten evaluiert und dimensioniert, welche für die Integration der ECU nötig waren:

- Sicherheits-, Absperre- und Regelventile, teilweise automatisiert
- Filter, Ölabscheider, Magnetventile, Sicherheitsventile, Druckanzeigegeräte
- Zwischenkühler und Wärmeübertrager
- Zusätzlicher Frequenzumformer für einen Verdichter
- Sensorik für Druck und Temperatur
- Zusatzkomponenten Elektroschrank
- Zusatzkomponenten Regelung
- Frei programmierbare Steuerung (SPS)

Die Integration der ECU erfolgte so, dass diese nur eine Option zur Kälteanlage darstellt. Die Kälteanlage bleibt also auch ohne ECU vollständig funktionsfähig und enthält alle Komponenten, die für eine Standardanlage nötig sind.

Um die Kälteanlage mit ECU zu betreiben, sind verschiedene Regelungen mit der Anforderung an hohe Betriebssicherheit und Energieeffizienz entwickelt worden. Diese Aufgabe erforderte die Entwicklung und Definition von:

- Regelalgorithmen
- Schnittstellen
- elektrischen Funktionen

Die TUD ist für die Auslegung des ECU selbst und die konzeptionelle Integration desselben verantwortlich. Die Maschine musste für die Anwendung in der geplanten Kälteanlage so dimensioniert werden, dass diese die geforderten Betriebspunkte bestmöglich abdeckt.

Mit dem Projekt wird sich zeigen, ob die Integration einer solchen Maschine zur Effizienzsteigerung bei gewerblichen Kälteanlagen einfach realisierbar ist und für zukünftige oder bestehende Kälteanlagen eine anwendbare Option darstellt.

## Durchgeführte Arbeiten

### Einbau der Anlage

Im Projektjahr ist die ECU in die neu erstellte Pluskälteanlage eingebaut und erfolgreich in den Prozess integriert worden, wobei der dafür nötige Aufwand höher als erwartet war.

Die unerwarteten Druckpulsationen im System nach erster Inbetriebnahme entsprechendes Nachrüsten von zusätzlichen Komponenten zur Dämpfung dieser periodischen Druckspitzen. Dazu ist ein Experte für die Analyse beigezogen worden.



Die erste Betriebserfahrungen habe auch gezeigt, dass die Maschine richtig dimensioniert wurde und auch das Teillastverhalten der Anlage, welches als Grundlage für die Auslegung diente, richtig eingeschätzt wurde.

### Inbetriebnahme

Der anfänglich aufgebaute Schrittmotor mit Kraftübertragung über Zahnräder als Stellenantrieb für die Regelung der Frequenz war zuwenig betriebssicher und die Konstruktion zudem zu anfällig auf Korrosion und Verschmutzung. Es wurde daher ein neuer Antrieb evaluiert, dessen Anbau konzipiert und entsprechend aufgebaut. Dieser Servoantrieb ist nun zuverlässiger und direkt mit der Drosselspindel gekoppelt.

Die ersten Betriebserfahrungen haben unter anderem gezeigt, dass eine minimale Versorgung der ECU mit Schmieröl, wie dies in der beschriebenen Feldanlage erfolgt, wichtig und notwendig ist. Die Parametrierung der Ölrückführung musste bei der Inbetriebnahme entsprechend angepasst werden.

## **Regelung**

Basierend auf der im Vorjahr erstellten Datenpunktliste ist zu Beginn des Jahres für die Umsetzung der Steuerung und Regelung ein detaillierter Regelbeschrieb erstellt worden. Die TUD hat die Anforderungen aus sich der ECU formuliert und diese galt es dann mit den Grundanforderungen der Kälteanlage zu vereinen. Entsprechend ist ein Regelbeschrieb entstanden, der die Regelung folgender Teile beschreibt:

- Frequenzregelung
- Ölrückführung
- Umstellung der Absperrventile
- Alarmmanagement

Die definierten Anforderungen sind in ausführlichen Arbeiten in den verschiedenen Teilen der Regelung umgesetzt worden. Einerseits galt es, die Standardregelung der Kälteanlage entsprechend zu erweitern und andererseits zusätzliche Funktionen mit einfachen Logikbausteinen zu realisieren und zusätzlich Funktionen in einer SPS umzusetzen. Diese Arbeiten konnten grösstenteils abgeschlossen werden. Die Beteiligten haben die einzelnen Teile in verschiedenen Schritten getestet und angepasst. Vermutlich sind nur noch kleine Anpassungen an den Regelungen nötig, welche sich nach weiterer Betriebserfahrung zeigen werden.

Nebst dem automatisierten Umstellen zwischen Standardbetrieb der Kälteanlage und Betrieb mit ECU war die Inbetriebnahme der Hoch- und Mitteldruckregelung mit Hilfe der Frequenz der ECU wichtig. Es hat sich gezeigt, dass die Regelung des Kältemittelvolumenstroms gegenüber der Regelung mit Hilfe von Drosselventilen, wie dies im Betrieb ohne ECU erfolgt, eine ganz andere Dynamik aufweist.

Bei der Inbetriebnahme konnte bereits festgestellt werden, dass in bestimmten Betriebszuständen die gewünschte Druckerhöhung im Verdichterteil der ECU stattfindet.

## **Nationale und internationale Zusammenarbeit**

Im Projekt arbeiten national vorwiegend Mitarbeiter der Firma Frigo-Consulting AG sowie Mitarbeiter der Firma Alpiq zusammen, wobei letztere in die Bereiche Kältetechnik und Prozessautomation einzuteilen ist. Die Zusammenarbeit zeigt sich sehr konstruktiv und fruchtend. Das spezielle und sehr interessante Projekt motiviert die Beteiligten sehr. Die gute Zusammenarbeit war nötig, weil sich das Erstellen des Regelbeschriebes sowie dessen Realisierung als wichtigen und aufwändigen Teil des Projektes zeigte.

Die TUD tritt als Projektpartner in einem Unterauftrag auf. Die Entwicklung, Konstruktion und Herstellung der ECU erfolgte durch Dr. J. Nickl und dipl. Ing. M. Wenzel, der das beschriebene Projekt als Bestandteil seiner Doktorarbeit nutzt. Die Zusammenarbeit mit der TUD war sehr angenehm und konstruktiv.

Die Firma Wurm als Lieferant der Regelung für die Standardanlage zeigte sich äusserst kompetent und kooperativ in der Erweiterung ihrer Komponenten für die Realisation des Projektes. Die Firma Wurm hat bei der Inbetriebnahme der ECU gewinnbringend mitgewirkt und zeigte sich flexibel. Die schnell ausgeführten Anpassungen an der Regelung waren sehr hilfreich.

# Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Zu den Erfolgen im Berichtsjahr zählen die erfolgreiche Integration der ECU in die Kälteanlage sowohl mechanisch als auch elektrisch. Auch die Inbetriebnahme der ECU sowie der Zusatzeile verlief trotz den hohen Anforderungen an technischem Verständnis für die thermodynamischen Abläufe sehr gut. Erfreulicherweise konnten die unerwarteten Druckpulsationen im System gedämpft werden.

Erfolgreich war auch das Erstellen des detaillierten Regelbeschriebes, welches eine enge Zusammenarbeit der Beteiligten erforderte und deren vollen Einsatz bewies.

Frigo-Consulting AG änderte erfolgreich den Stellantrieb der ECU konstruktiv ab, um dessen Zuverlässigkeit zu verbessern.

Schwierig zeigte sich nach ersten Betriebserfahrungen die Dynamik der Anlage, weil die Regelung von Hoch- und Mitteldruck noch nicht stabilisiert werden konnte. Man hofft, dass diese Regelung noch stark optimiert werden kann.

Unerwartet und enttäuschend waren die hohen Druckpulsationen im System, welche zwar auf ein akzeptables Mass reduziert werden konnten aber die Lebensdauer der Komponenten in der Anlage reduzieren könnten. Zudem zeigte sich die Frequenzregelung der ECU als sensiblen Teil der Maschine und führte aufgrund einer grossen Leckage sowie aufgrund der nötigen Modifikation des Stellantriebs zu Mehraufwand für die Forscher und zu zusätzlichen Kosten.

Momentan bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die Lebensdauer der ECU und die Funktion des Ölrückführsystems. Zudem ist offen, in welchen Betriebszuständen die Druckerhöhung im Verdichterteil der ECU effektiv stattfindet.

Um die geplanten Projektziele zu erreichen und das Projekt per Mitte 2011 abzuschliessen sind folgende Arbeiten geplant:

- Umbau der Drosselspindel zur Frequenzregelung an der ECU
- Kontrolle des Zustandes der ECU, insbesondere Korrosionsbildung
- Kontrolle und Konfiguration der Messdatenerfassungssysteme
- Wiederinbetriebnahme und generelle Kontrolle der Funktionen, u. a. die Ölrückführung zur ECU
- Parametrierung der Hoch- und Mitteldruckregelung mit dem Ziel, die Regelung zu stabilisieren

Bis zum Projektschluss ist zudem geplant, Messwerte von einigen Betriebspunkten beispielhaft zu erfassen, um die Funktion der ECU und den Vergleich zu einem Drosselbetrieb zu zeigen.

In weiterführenden Arbeiten ausserhalb dieses Projektes könnten dann verschiedene Messperioden und eine relevante Anzahl Messpunkte ausgewertet werden. Dies würde sehr interessante Ergebnisse zum energetischen Gewinn und der Wirtschaftlichkeit liefern.

## Referenzen

- [1] Riha, J., 2005, Einbindung einer Expansionsmaschine in CO<sub>2</sub> Supermarkt-Kälteanlagen, DKV Tagung, Würzberg
- [2] Wenzel, M., Hesse, U., Nickl, J., 2010, Erste Erfahrungen zu Betrieb und Regelung sowie Versuchsergebnisse an Anlagen der Gewerbekälte, DKV Tagung, Magdeburg