



Schlussbericht, 26. September 2011

Effiziente Kälteerzeugung

Integration einer Expansionsmaschine in ein CO₂-Kältesystem



Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Frigo-Consulting AG
Feldstrasse 30
CH-3073 Gümligen
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

Kohlendioxid ist als Kältemittel in Anwendungen wie Warmwasserwärmepumpen, Autoklimaanlagen und vor allem der Gewerbekühlung bereits effizient. Die Leistungszahl eines transkritischen CO₂-Prozesses kann durch Minimierung der thermodynamischen Drosselverluste durch eine Expansions-Kompressions-Maschine (ECU) weiter erhöht werden.

In diesem Projekt wurde eine ECU, basierend auf dem Prinzip einer Freikolbenmaschine, in ein CO₂-Kältesystem integriert, um die Machbarkeit und die Leistungsfähigkeit im Feld zu prüfen.

Die ECU wurde dimensioniert, konstruiert und zusammengebaut. Die Integration der Maschine in das Kältesystem erforderte Evaluation, Auslegung und Einbau zusätzlicher Komponenten wie Zwischenkühler, Verbindungsleitungen, Ventile und Regeleinrichtungen. Ein Steuer- und Regelkonzept wurde erarbeitet und erfolgreich in die Standardregelung integriert.

Technische Probleme in Bezug auf die Schmierung der Maschine, der Regelstrategie, Anlagedynamik und Pulsationen nach der Inbetriebnahme des Kältesystems konnten grösstenteils gelöst werden.

Abstract

Carbon dioxide is known to perform well as a refrigerant in applications like heat pump water heaters, mobile air conditioning and commercial refrigeration. The coefficient of performance in a transcritical CO₂ cycle can further be improved by minimizing the thermodynamic throttling losses with an expansion-compression-unit (ECU).

In this project, an ECU, based on a free piston design, was integrated into a CO₂ refrigeration system to verify the practicability and the performance of the system in the field.

The ECU was designed and dimensioned, machined and assembled. The integration of the machine into the refrigeration system required evaluation, design and assembling of additional components such as an intercooler, piping, valves and control components. A regulation scheme was developed and has successfully been implemented into the standard refrigeration controls.

Technical challenges have been met in terms of lubrication, control strategy, dynamics and mechanics after commissioning the refrigeration plant and the ECU.

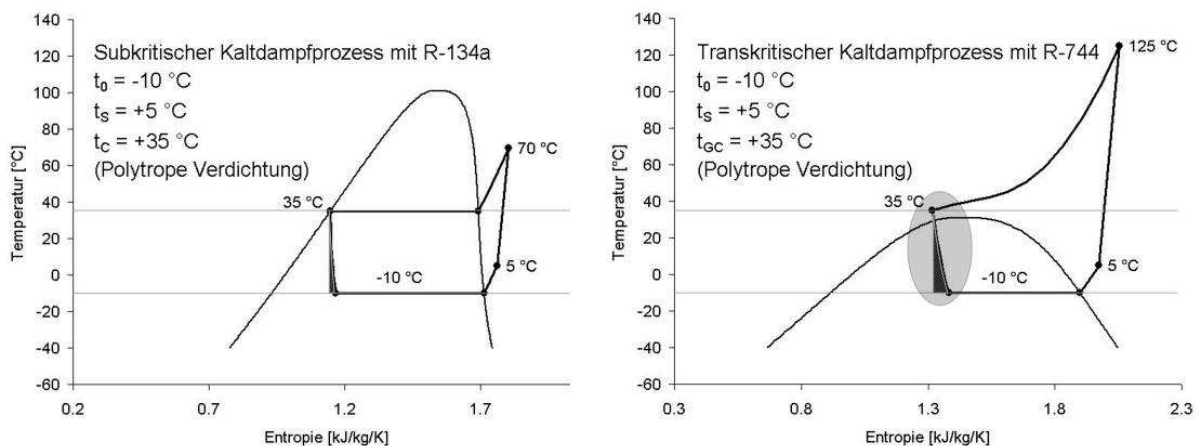
Einleitung

Aufgrund seines vernachlässigbaren Treibhauspotenzials gewinnt Kohlendioxid (CO_2) als Kältemittel an Bedeutung und genießt mittlerweile eine hohe Akzeptanz. Der natürliche Stoff kommt inzwischen in vielen Anwendungen zum Einsatz. Alleine in der Schweiz dürfte die Anzahl CO_2 -Anlagen inzwischen auf über 300 gestiegen sein und weiter steigen. Im Bereich Grossgewerbe- und Industriekühlung gilt CO_2 als Standard. Im Jahresmittel weisen Pluskühlanlagen bei Grossgewerbekälteanlagen gegenüber herkömmlichen Kältemitteln bereits etwa 10% bessere Leistungszahlen auf, obwohl der Prozess mit CO_2 bei hohen Aussentemperaturen grosse thermodynamische Verluste beim Drosselvorgang aufweist.

Die thermodynamischen Eigenschaften von CO_2 führen zu einer verhältnismässig schlechten Leistungszahl des Kälteprozesses bei hohen Temperaturen der Wärmesenke. Der transkritische CO_2 -Kälteprozess weist hohe Druckdifferenzen, hohe Verdichtungsendtemperaturen und ebenfalls hohe Exergieverluste während der Drosselung auf. Die Leistungszahl einer solchen Anlage verbessert sich daher, wenn man das Drosselventil mit einer arbeitsleistenden Maschine ersetzt und die gewonnene Arbeit nutzt [1].

In Figur 1 sind zwei Kälteprozesse im Druck-Enthalpie-Diagramm für die Kältemittel R-134a und R-744 (CO_2) als Vergleich dargestellt, um die thermodynamischen Unterschiede bei der Verdichtung und Expansion zu illustrieren. Der schraffierte Bereich zeigt die Verluste bei der Drosselung und somit auch das Verbesserungspotenzial, das bei R-744 höher ist.

Eine effiziente Möglichkeit, Entspannungsarbeit zu gewinnen und zu nutzen ist das Konzept einer Freikolbenmaschine [2]. Die Technische Universität Dresden hat in den vergangenen Jahren eine solche Maschine entwickelt. Sie erlaubt eine Einsparung der Verdichterleistungsaufnahme um ca. 25% [3] bei einer Wärmesenkentemperatur von $+35^\circ\text{C}$ verglichen mit einem Standard-Kälteprozess mit Drosselorganen. Die jährliche Energieaufnahme der Verdichter nimmt bei einer Kühlanwendung um schätzungsweise 10% ab. Entsprechend wird mit der Expansions-Kompressions-Maschine (ECU) mit einer Einsparung von jährlich ungefähr 10'000 kWh elektrische Energie gerechnet.



Figur 1: Kälteprozess für R-134a (links) und R-744 (rechts) zum Vergleich der Drosselverluste

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit war es, erste Erfahrungen mit einer CO₂-Kälteanlage mit integrierter ECU im Feld zu erhalten und technische Herausforderungen und Lösungen aufzuzeigen.

Mit dem Projekt sollte 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.

In einer neuen Kälteanlage mit ca. 80 kW Kälteleistung ist ein Prototyp der Expansions-Kompressions-Maschine (ECU) im Feldversuch in die CO₂-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.

Die geeignete Einbindung für die konkrete Anwendung wurde definiert, eine Maschine anhand des geforderten Lastprofils dimensioniert und konstruiert sowie diese in die Kälteanlage eingebunden und in Betrieb genommen.

Methode

Im neuen Cash+Carry Markt Prodega CC Basel ist eine ECU in die neue Kälteanlage integriert und in Betrieb genommen worden. Die ECU ersetzt das Hauptdrosselorgan und nutzt die Entspannungsarbeit für eine zweite Verdichtungsstufe. Die durch die Druckdifferenz angetriebene ECU entlastet die Hauptverdichter während der Verdichtung und kann die elektrische Leistungsaufnahme der Verdichter reduzieren.

Das Projekt wurde neben dem Bundesamt für Energie finanziell durch den Kunden transGourmet Schweiz AG und dem Planer Frigo-Consulting AG getragen.

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

Zusätzliche Komponenten

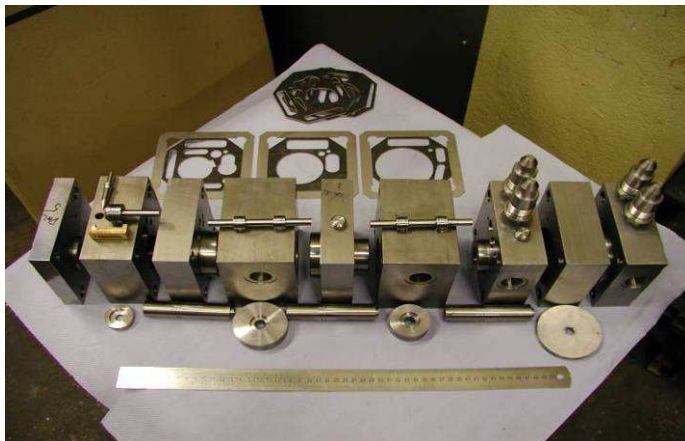
Um die ECU in die Verbundanlage zu integrieren war es nötig, folgende zusätzliche Komponenten zu evaluieren, auszulegen und einzubauen:

- Sicherheits-, Absperr- und Regelventile, teilweise automatisiert
- Filter
- Ölabscheider und Ölrückführsystem
- Magnetventile
- Zwischenkühler und Wärmeübertrager
- Sensorik für Druck und Temperatur
- elektrische Komponenten und Regler
- Frei programmierbare Steuerung (SPS)
- Gas- und Flüssigkeitspulsationsdämpfer
- Druckanzeigergeräte
- Zusätzlicher Frequenzumformer für die Leistungsregelung von Verdichter 2

Expansions-Kompressions-Einheit

Die Technische Universität Dresden hat die Maschine anhand eines durch Frigo-Consulting AG definierten Lastprofils ausgelegt, konstruiert und hergestellt. Dabei war es wichtig, die Maschine so auszulegen, dass den klimatischen Bedingungen Rechnung getragen und somit die jährliche Energieeinsparung maximiert wird. Was nicht zwingend eine maximale Energieeinsparung bei hoher Aussentemperatur bedeutet.

Bild 2 zeigt die Einzelteile der ECU vor dem Zusammenbau und dem Einbau in die Kälteverbundanlage. Die hydraulische Integration der ECU in die Anlage erfolgte sehr vorsichtig, damit während dem Anschliessen keine Schmutzpartikel in die Maschine eindringen konnten.



Figur 2: Expansions-Kompressions-Einheit vor dem Zusammenbau [4]

Konzept zur Integration

Weltweit zum ersten mal wurde eine ECU in eine Kälteanlage im Cash+Carry Markt Prodega CC Basel für den Betrieb unter reellen Bedingungen eingebaut. Tabelle 1 fasst die Daten der Anlage zur Kühlung von Räumen im Temperaturbereich zwischen +2 °C und +5 °C zusammen.

Die Abwärme der Anlage wird über einen Wärmeübertrager an die Gebäudeheizung oder mittels luftgekühltem Gaskühler auf dem Gebäudedach an die Umgebung abgegeben. Das

System beinhaltet zudem einen internen Wärmeübertrager zur Unterkühlung der Flüssigkeit zu den Kühlstellen.

Tabelle 1: Anlagedaten bei Volllast und einer Aussentemperatur von +34 °C

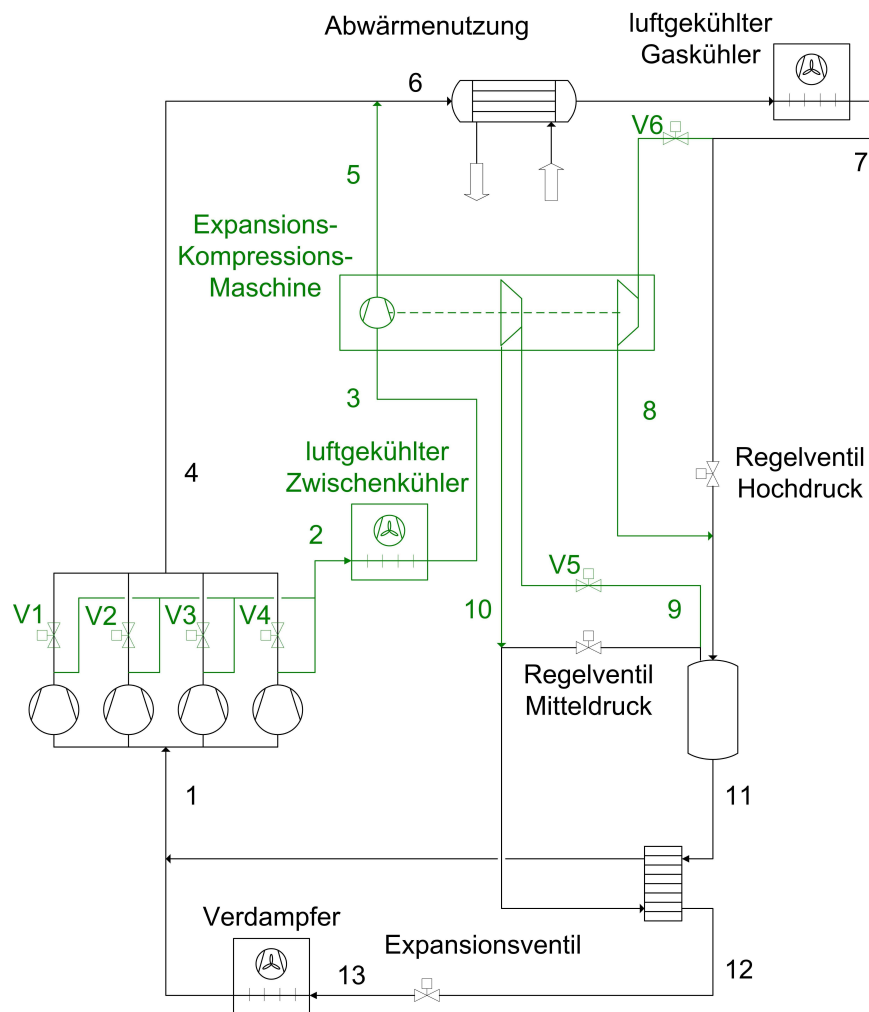
Kälteleistung	85 kW	Anzahl Verdichter	4
Gaskühlerleistung	140 kW	Verdampfungsdruck	-8 °C
Leistung Abwärmenutzung	65 kW	Hochdruck	92 bar
Anzahl Verdampfer	9	Maximal zulässiger Hochdruck	115 bar

Die Einbindung der ECU in ein Kältesystem wurde bereits untersucht [5]. Basierend auf dem daraus hervorgehenden Vorschlag ist ein Konzept gewählt worden, das den Verdichtungsdruck der Hauptverdichter reduziert und somit die Leistungsaufnahme der Verdichter reduziert.

Das Konzept der Einbindung ist in Figur 3 ersichtlich. Es war eine unverzichtbare Bedingung, die ECU so zu integrieren, dass die Kälteanlage auch ohne die ECU voll funktionsfähig ist und damit für den Betrieb nur eine Option darstellt. Das gewählte Konzept erlaubt einen Betrieb der Kälteanlage ohne ECU mit Hilfe von Drosselventilen zur Regelung von Hoch- und Mitteldruck, wie dies in einer Standardanlage erfolgt. Diese Drosselventile sind parallel zur ECU installiert. Zusammen mit automatisierten Absperrventilen ist es möglich, zwischen dem Betrieb mit und dem Betrieb ohne ECU umzustellen sowie die beiden Betriebsarten zu vergleichen.

Die Standard-Verbundanlage besteht aus vier einstufigen Hubkolbenverdichtern gefolgt von einem Wärmeübertrager zur Abwärmenutzung. Restliche Abwärme gelangt mit dem anschließenden luftgekühlten Gaskühler an die Umgebung. Das System ist im Standardbetrieb, wenn die Ventile V5 und V6 geschlossen und die Ventile V1 bis V4 offen sind. Die Expansion des Kältemittels erfolgt in zwei Stufen: die erste Expansion erfolgt im Hochdruckregelventil und die zweite Expansion erfolgt bei den Verdampfern in den Kühlräumen.

Im Betrieb mit ECU werden die Ventile V1, V3, V5 und V6 geschlossen. Die ECU ersetzt dann die Hauptregelventile Hoch- und Mitteldruck und nutzt die gewonnene Entspannungsarbeit, um gasförmiges CO₂ zu verdichten.



Figur 3: Integration der Expansions-Kompressions-Maschine in die Standard-Kälteanlage

Die erste Stufe expandiert CO₂ von Hochdruck auf Mitteldruck in den Flüssigkeitsabscheider. Die zweite Stufe expandiert Flashgas von Mitteldruck auf Niederdruck (Saugdruck).

Figur 4 zeigt, wie die ECU in die Verbundanlage in horizontaler Lage eingebaut ist.



Figur 4: Verbundanlage zur Pluskühlung mit integrierter Expansions-Kompressions-Maschine im Feld

Ölmanagement

Die ECU wird sowohl im Verdichterteil als auch im Expansionsteil durch einen Ölanteil im Kältemittel geschmiert, weil diese über kein integriertes Ölverteilsystem verfügt.

Weil das Kälteöl sowohl zur ECU als auch zu den Verdichtern gelangen muss, ist ein zweiter Ölabscheider integriert worden. Dieser ist vor dem Verdichterteil der ECU platziert. Das Öl aus dem Hauptölabscheider und dem zusätzlichen Ölabscheider wird über zeitgesteuerte Ventile verteilt. Ein geringer Ölanteil ist insbesondere an den Eintritt der Expansionsstufen wichtig.

Es wurde eine Steuerung für die Ölrückführung zu den Verdichtern und der ECU erarbeitet und diese in einer Speicher Programmierbaren Steuerung umgesetzt. Eine einwandfreie Schmierung der Maschine ist aufgrund der bewegten Teil im inneren der Maschine grundlegend wichtig.

Die Ölrückführung erforderte einige Anpassungen an der Anlage und der Steuerung, um den Druckverhältnissen in den Verteilleitungen Rechnung zu tragen.

Umstellung zwischen Expansionsbetrieb und Drosselbetrieb

Weil die Anlage mit integrierter ECU eine Feldanlage ist, galt es, der Betriebssicherheit höchste Priorität beizumessen. Die Kälteanlage kann daher entweder mit ECU oder mit Drosselventilen arbeiten. Um die Betriebsarten zu wechseln, ist ein Konzept mit automatischer Umstellung mit Hilfe von automatisierten Ventilen, den Drosselventilen selbst und einer Speicher Programmierbaren Steuerung realisiert worden. Die automatische Umstellung vom Betrieb mit ECU auf einen Drosselbetrieb erfolgt zudem bei einer Fehlfunktion der ECU.

Die Speicher Programmierbare Steuerung stellt ebenfalls sicher, dass ein Betrieb der Anlage mit ECU nur erfolgt, wenn die Ventile V1 bis V6 gemäss Figur 3 die richtige Position aufweisen. Diese Ventile verfügen über einen elektrischen Antrieb mit relativ hoher Stellzeit, was jedoch die Funktion der Anlage nicht beeinträchtigte. Die Speicher Programmierbare Steuerung gibt den Betrieb der Anlage mit ECU ab einer Aussentemperatur von +10 °C frei.

Mit zunehmender Betriebserfahrung und somit erhöhter Betriebssicherheit wird es künftig nicht mehr nötig sein, die Anlage für beide Betriebsarten zu konzipieren, weil die Anlage grundsätzlich immer mit der ECU betrieben werden kann. Das vereinfacht das System erheblich.

Regelung

Basierend auf der erstellten Datenpunktliste ist 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.

Das Erstellen des Regelbeschriebes sowie dessen Realisierung zeigte sich als wichtigen und aufwändigen Teil des Projektes.

Regelung von Massenstrom und Überhitzung

Während dem Betrieb der ECU muss die volumetrische Leistung der Maschine an die verschiedenen Betriebspunkte angepasst werden. Der Massenstrom zum Verdichterteil der ECU wird mit Hilfe einer durch die Technische Universität Dresden entwickelte Regelstrategie beeinflusst [4].

Mit Bezug auf Figur 3 werden die Ventile 1 und 3 für einen Betrieb der Anlage mit ECU automatisch geschlossen. Die Verdichter 1 und 3 verdichten dann zur ECU während die Verdichter 2 und 4 direkt auf Hochdruck verdichten und damit die ECU umgehen. Die Verdichter 1 und 2 sind mit einem Frequenzumformer zur stufenlosen Leistungsregelung zwischen 50 und 100% ausgerüstet. Auf den Expansionsteil der ECU wird immer der gesamte Kältemittelmassenstrom geleitet.

Der Kältemittelmassenstrom wird bestimmt durch die Regelung von Verdampfungsdruck sowie der Überhitzung des Kältemittels am Eintritt in die Verdichtungsstufe der ECU. Eine minimale Überhitzung muss zudem stets vorhanden sein, um flüssiges Kältemittel im Hauptölabscheider zu vermeiden.

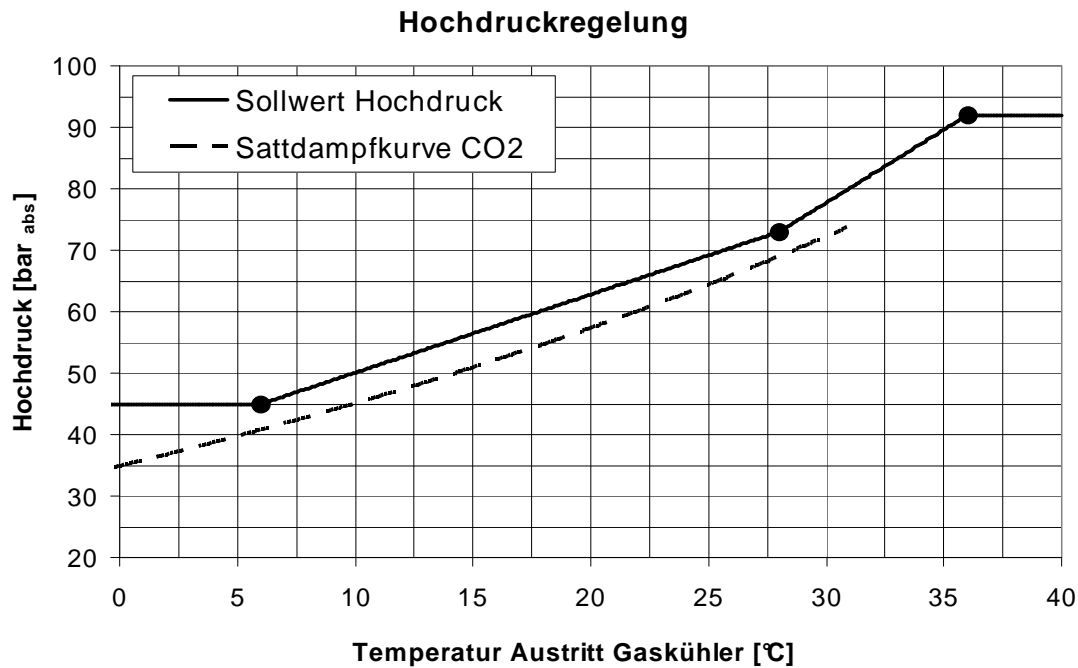
In erster Priorität bestimmt die Verbundregelung den gesamthaft nötigen Volumenstrom, um den gewünschten Saugdruck zu erreichen. In einer zweiten Priorität variiert die Regelung das Verhältnis von gefördertem Volumenstrom der Verdichter zur ECU zum gefördertem Volumenstrom der Verdichter, die direkt auf Hochdruck fördern, um die gewünschte Überhitzung zu erreichen. Dies wird in erster Linie durch Variieren der Drehzahlen von Verdichter 1 und 2 und bei Bedarf durch zu- und abschalten der Verdichter 3 und 4 erreicht.

Beispielsweise führt eine Reduktion der Drehzahl an Verdichter 1 zu einem reduzierten Massenstrom zur ECU und dadurch zu einer Zunahme der Überhitzung. Gleichzeitig nimmt die Drehzahl an Verdichter 2 um den gleichen Betrag zu. In diesem Beispiel nimmt der Massenstrom zu ECU ab während der Massenstrom direkt auf Hochdruck zunimmt. Dieser Regelalgorithmus ist in den CO₂-Regler der Standardanlage integriert worden.

Hochdruckregelung

Die Regelung des Hochdrucks in einem transkritischen Kältesystem ist von grundlegender Bedeutung, um optimale Leistungszahlen und genügende Kälteleistung sowohl im subkritischen als auch im transkritischen Betrieb zu erreichen.

Die ECU ist eine volumetrische Maschine, deren Frequenz mit Hilfe einer Drosselspindel beeinflusst und somit der Hochdruck der Anlage geregelt werden kann [3]. Für die Hochdruckregelung kommt in der beschriebenen Anlage ein Standardregler für transkritisches CO₂ zur Anwendung, welcher lineare Funktionen zur Sollwertvorgabe anhand der Gaskühleraustrittstemperatur gemäss Figur 5 nutzt.



Figur 5: Sollwerte des Hochdruckreglers

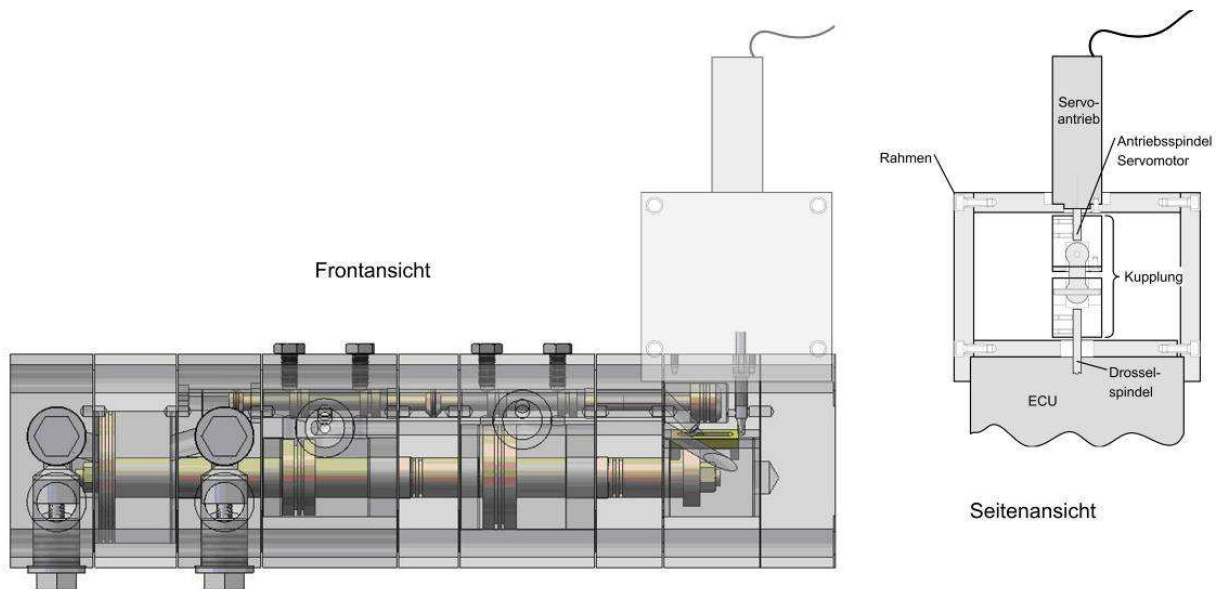
Die Frequenz der ECU ist abhängig von deren Geometrie, Prozessbedingungen – Druck und Temperatur am Eintritt in die Expansionsstufen – sowie der Position der Drosselspindel [4].

Ein robuster Servoantrieb wurde evaluiert, konstruiert und auf die ECU aufgebaut, die eine zuverlässige und automatisierte Hochdruckregelung durch die Beeinflussung der Frequenz der ECU gemäss vorgängig beschriebener Methode ermöglicht. Dieser Servoantrieb ist durch eine flexible Kupplung direkt mit der Drosselspindel verbunden und auf einem geschlossenen und geheizten Gehäuse aus Aluminium gemäss Figur 6 aufgebaut. Diese Konstruktion schützt die bewegten Teil vor Schmutz und kondensierter Luftfeuchtigkeit. Der Antrieb erwies sich als sehr zuverlässig und bringt den Vorteil, diverse Antriebsparameter verstellen zu können. Insbesondere war es bei der Inbetriebnahme wichtig, den richtigen Bereich für das Antriebsmoment festzulegen, um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen.

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.

Die Hochdruckregelung generiert ein Stellsignal von 0 bis 10 V, das die Antriebselektronik des Stellenantriebs in den einstellbaren Rotationsbereich umwandelt. Der Servomotor dreht die Drosselspindel, wodurch sich die Frequenz der ECU verändert.

Die Konstruktion der Drosselspindel musste angepasst werden, weil die Dichtung nach etwa 200 Arbeitsstunden defekt war. Mit der neuen Konstruktion entfallen axiale Bewegungen an der Dichtung und somit steigt die Betriebssicherheit.



Figur 6: Expansions-Kompressions-Einheit [3] mit aufgebautem Stellantrieb für die Regelspindel

Regelbereich

Die grösste Herausforderung bei der Definition der richtigen Regelstrategie und Regelparameter ist die Anforderung an die Maschine, verschiedene Betriebspunkte möglichst gut abzudecken. In der beschriebenen Feldanlage treten verschiedene Betriebspunkte vor allem aufgrund der Aussentemperatur auf, die im Bereich von -15 °C bis $+35\text{ °C}$ schwankt, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Kältelast.

Dies benötigte eine entsprechende Auslegung der Maschine und die passende Regelstrategie, wie sie vorgängig beschrieben ist.

Ergebnisse

Betriebserfahrungen

Inbetriebnahme

Die ECU konnte wie geplant in Betrieb genommen und anschliessend einige technische Probleme hinsichtlich Schmierung, Regelstrategie, Dynamik und Vibrationen gelöst werden.

Die ersten Betriebsstunden der Anlage haben gezeigt, dass die ECU die Drosselventile in ihrer Funktion komplett ersetzen kann und dass in gewissen Betriebszuständen eine Druckerhöhung am Verdichterteil erzeugt wird. Allerdings erfolgt die Druckerhöhung noch erst ausnahmsweise – im Mittel ist der Zwischendruck etwa gleich dem Hochdruck.

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.

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses war die ECU gesamthaft über 2'000 Stunden in Betrieb.

Dynamik

Das Stellverhalten der Kälteanlage in Bezug auf den Hochdruck ist im ECU Betrieb anders als im Drosselbetrieb, weil die Stellglieder deutlich unterschiedliche Stellverhalten aufweisen. der Standartregler ist aus diesem Grund so erweitert worden, dass separate Regelparameter für die Hochdruckregelung in den beiden Betriebsarten möglich sind.

Vibrationen

Der Betrieb der ECU führt zu merklich mehr Vibrationen der Verbundanlage verglichen mit einem reinen Drosselbetrieb. Der Rahmen der Verbundanlage, die Kälteleitungen und die Gaskühler schwingten periodisch mit der Frequenz der ECU, was bestätigte, dass die Schwingungen von der ECU stammen. Die beteiligten Personen und ein Schwingungsexperte waren sich einig, dass die Ursache der Schwingung in Druckpulsationen liegt und nicht in der Schwingung der ECU selbst. Diese Vermutung wird dadurch verstärkt, dass die oszillierenden Kolbenteile in der ECU ein Gewicht von lediglich 150 Gramm aufweisen und somit nicht die Hauptquelle von Schwingungen sein können. Die Schwingungen konnten anschliessend durch Integration von Pulsationsdämpfern und zusätzliche Befestigung von Kälteleitungen auf ein akzeptables Niveau reduziert werden. Vermutlich würde eine vertikale anstelle einer horizontalen und zudem starre Montage der ECU zu weniger Vibrationen führen, weil dadurch die Vibrationen der Maschine selbst nicht auf das System übertragen würde. Für die Analyse wurde ein Experte beigezogen.

Erste Betriebserfahrungen haben zudem bestätigt, dass die ECU keine merklichen Schallemissionen erzeugt und durch den Lärm der Verdichter übertönt wird.

Messungen

Messkonzept

Die Feldanlage ist mit Drucksensoren und Temperaturfühlern ausgerüstet, die eine Kontrolle der Funktionen und eine Analyse von verschiedenen Betriebspunkten erlauben. Mit einem Gateway können Messwerte regelmässig per Datenfernübertragung abgespeichert werden. Tabelle (2) zeigt die einzelnen Messpunkte in der Anlage mit Bezug auf Figur 3.

Tabelle 2: Messstellenliste

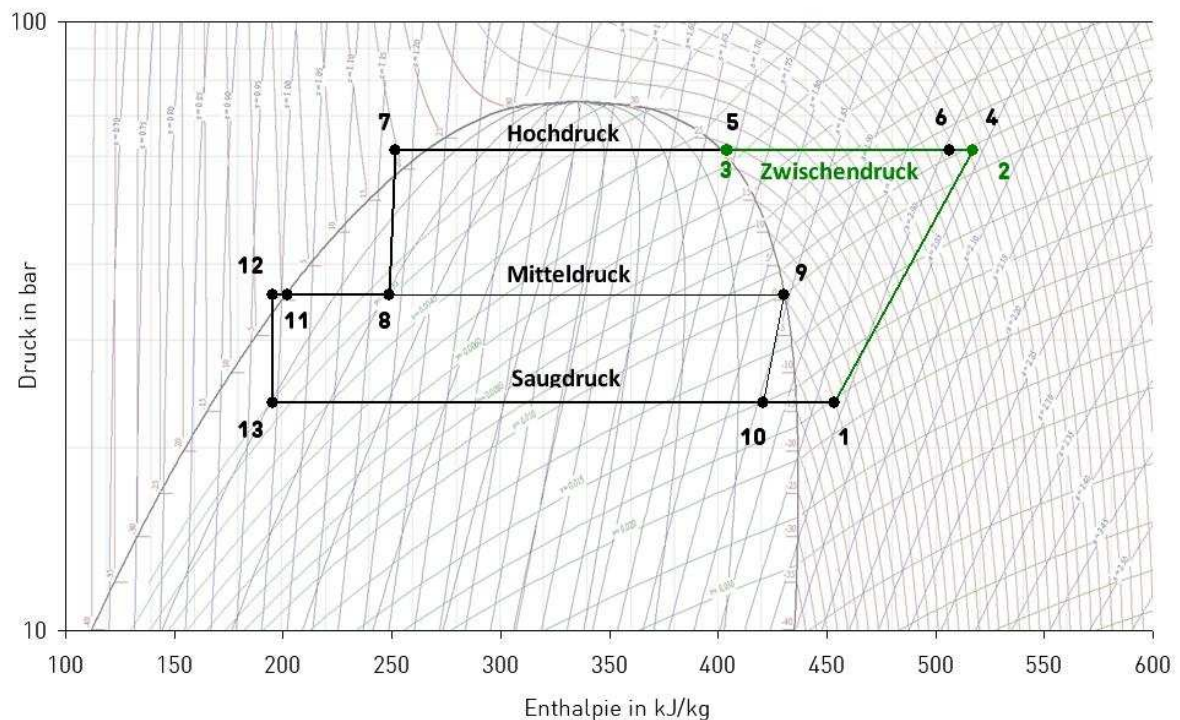
Messgrösse	Messstelle	Bezeichnung	Messverfahren	Fabrikat	Typ	Genauigkeit
Druck	7	Hochdruck [bar]	piezorestiv	WURM	DAI120	±0.5%*
Druck	9	Mitteldruck [bar]	piezorestiv	WURM	DAI60	±1.0%*
Druck	2	Zwischendruck [bar]	piezorestiv	WURM	DAI120	±0.5%*
Druck	1	Saugdruck [bar]	piezorestiv	WURM	DAI40	±1.0%*
Temperatur	1	Sauggastemperatur Hauptverdichter [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	-	Aussentemperatur [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	7	Gaskühleraustrittstemperatur [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	3	Temperatur Austritt Zwischenkühler [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	12	Temperatur Flüssigkeit Austritt Sammler [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	13	Temperatur Flüssigkeit Austritt FLUK [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	5	Temperatur Austritt ECU Verdichterteil [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	6	Temperatur Heissgas gesamt [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
Temperatur	2	Temperatur Austritt Verdichter Zwischendruck [°C]	NTC	WURM	TRK277	±0.5%
* bezogen auf den Endwert						

Die Anlage ist bereit für die Analysen von Betriebspunkten sowie die Erfassung und Auswertung von Messwerten im Betrieb mit oder ohne ECU. Dabei wäre von besonderem Interesse, die eingesparten Energie in Abhängigkeit der Wärmesenktemperatur und unterschiedlichen Lastbedingungen zu ermitteln.

Einsparung

Figur 7 zeigt beispielhaft den Kälteprozess für gemittelte Messdaten an einem Tag im Juli 2011, dargestellt im Druck-Enthalpie-Diagramm. Die Messwerte sind dabei gemittelt und die Aussentemperatur betrug +18 °C.

Mittelwerte vom 11.7.2011



Figur 7: Messdaten 11.7.2011, Mittelwerte 3 Stunden Betrieb eingetragen in einem Druck-Enthalpie-Diagramm für CO₂

In Tabelle 3 sind die Messdaten vom 11.7.2011 rechnerisch ausgewertet. Dabei wurden Stoffdaten mit Hilfe einer elektronischen Datenbank ermittelt und die Messwerte im Zeitraum zwischen 08.30 und 11.30 gemittelt.

Tabelle 3: Auswertung der Messwerte vom 11.7.11 und Vergleich der Prozesse

	ohne ECU (Basis)	mit ECU (Messwerte)	Differenz
Verdampfungsdruck	-15.3 °C		
Mitteldruck	36.5 bar		
Verdichterkälteleistung	46.9 kW		
Hochdruck	61.4 bar	61.4 bar	
Druckerhöhung Verdichterteil	-	0.0 bar	
Leistung ECU	-	1.2 kW	
Stellgrösse ECU	-	12%	
Leistungszahl Kälte (COP)	3.30	3.20	+3%

Aus der Auswertung ist ersichtlich, dass die Druckerhöhung im Mittel nicht erfolgt. Weil die Kälteleistung durch die polytrope Expansion jedoch zunimmt, erhöht sich die Leistungszahl Kälte trotzdem. Der Auswertung liegen folgende Berechnungsgänge zu Grunde:

Wenn die ECU nicht in Betrieb ist und somit Druckentspannungen durch den Drosselvorgang bei konstanter Enthalpie verlaufen, ist die Leistungszahl Kälte gemäss Formel 1 definiert.

$$COP_{ohneECU} = \frac{h_1 - h_7}{h_4 - h_1} \quad (1)$$

Im Betrieb mit ECU werden die Drosselvorgänge 7-8 und 9-10 durch polytrope Expansionsvorgänge ersetzt. Die den Berechnungen zugrunde liegenden Expansionswirkungsgrade wurden mit 0.65 [2] angenommen und sind gemäss Formel 2 bis 5 in die Auswertung eingeflossen.

$$\eta_{isEX} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8,is}} \quad (2)$$

wobei

$$s_7 = s_{8,is} \quad (3)$$

und

$$\eta_{isEX} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10,is}} \quad (4)$$

wobei

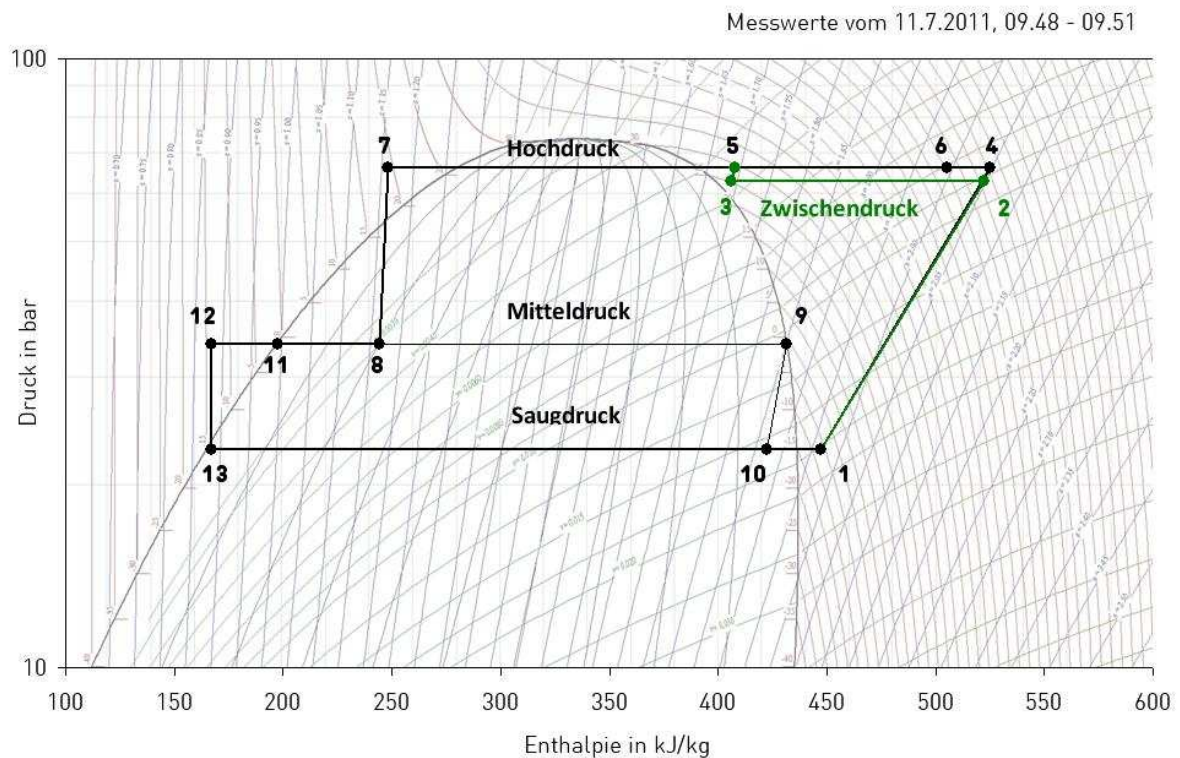
$$s_9 = s_{10,is} \quad (5)$$

Formel (6) beinhaltet dann die Leistungszahl Kälte im Betrieb mit ECU, wobei die Massenströme der einzelnen Verdichter einfließen. Verdichter 1 und 3 fördern auf Zwischendruck und Verdichter 2 und 4 fördern direkt auf Hochdruck.

$$COP_{mitECU} = \frac{(\dot{m}_{V1} + \dot{m}_{V2} + \dot{m}_{V3} + \dot{m}_{V4}) \cdot (h_1 - h_8)}{(\dot{m}_{V1} + \dot{m}_{V3}) \cdot (h_2 - h_1) + (\dot{m}_{V2} + \dot{m}_{V4}) \cdot (h_4 - h_1)} \quad (6)$$

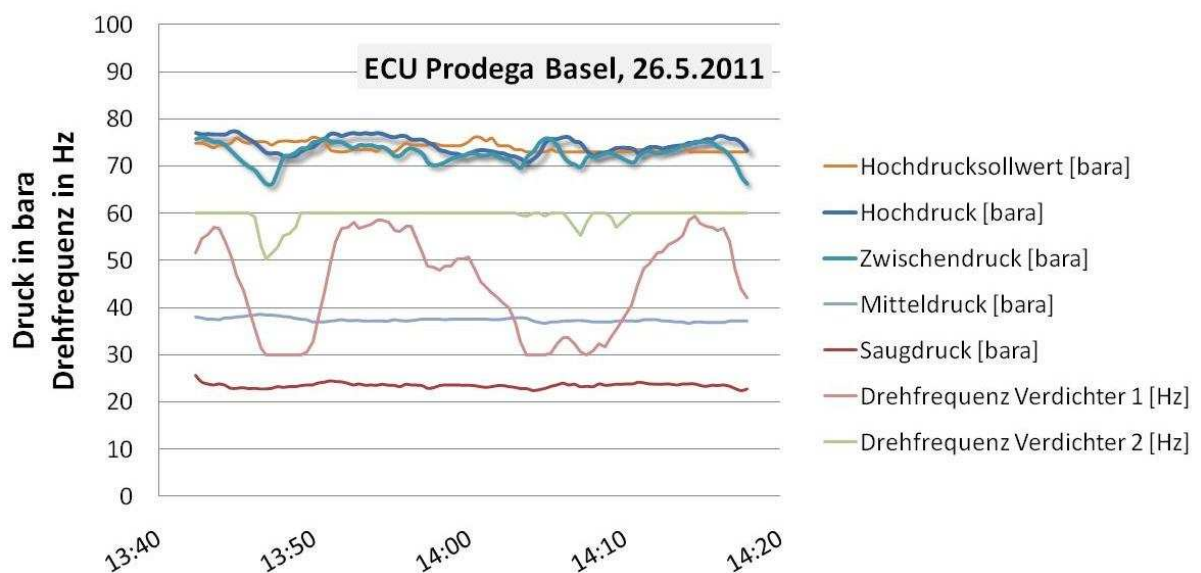
Figur 8 zeigt ein Betriebspunkt, in dem eine Druckerhöhung stattfindet. Aus der Darstellung ist ebenfalls ersichtlich, dass die Endtemperatur nach der ersten Verdichtung durch den Betrieb mit der ECU leicht abnimmt. Die Expansion von Flashgas anstelle einer Drosselung führt dazu, dass die Enthalpie am Eintritt in den internen Wärmeübertrager reduziert wird. Die resultierende Abnahme der Sauggastemperatur konnte beobachtet werden. Eine minimale Sauggasüberhitzung muss dabei immer aufrecht erhalten bleiben, um einen sicheren Betrieb der Verdichter zu ermöglichen. Der Verbundregelung überwacht diese Sauggasüberhitzung.

Aus dem Prozess in Figur 8 ist ersichtlich, dass die Druckerhöhung in diesem Betriebspunkt 3-4 bar betrug und damit die Hauptverdichter um diesen Betrag entlastet wurden. Allerdings konnte eine Druckerhöhung nur in wenigen Betriebszuständen festgestellt werden und erfordert weitere Analyse. Dies ist aus Figur 9 ersichtlich, obwohl in diesem Beispiel die Druckerhöhung verhältnismässig oft zustand kommt.



Figur 8: Messdaten 11.7.2011, Mittelwerte aus 3 Minuten Betrieb eingetragen in einem Druck-Enthalpie-Diagramm für CO₂

Erste Betriebserfahrungen bestätigten auch die Wichtigkeit einer zuverlässigen Hochdruckregelung weil ein zu niedriger Hochdruck dazu führt, dass das Kältemittel sich nicht vollständig verflüssigen kann. Dies wiederum führt zu einem überhöhten Flashgasanteil und zu einer zu tiefen Sauggastemperatur. Wichtig ist daher eine stabile Hochdruckregelung und ein korrekt dimensionierter innerer Wärmeübertrager.



Figur 9: Darstellung der gemessenen Drücke und Drehfrequenzen an einem warmen Tag

Diskussion und weiterführende Arbeiten

Der Hoch- und Mitteldruck im Betrieb mit der ECU sind deutlich weniger stabil als im Betrieb mit Drosselorganen. Um eine hohe Effizienz und Betriebssicherheit von Kälteanlagen zu gewährleisten, ist aber die Anlagendynamik von grundlegender Wichtigkeit. Daher könnte in weiterführenden Arbeiten die Regelgüte untersucht und beispielsweise durch Anpassung der Regelparameter optimiert werden.

Für den weiteren Betrieb ist es nötig, den Membranspeicher zur Dämpfung der Fluidpulsationen jährlich zu warten. Sinnvoll wäre eine regelmässige Prüfung der Betriebsparameter und insbesondere die Funktion der Ölrückführung. Zudem ist offen, in welchen Betriebszuständen die Druckerhöhung im Verdichterteil der ECU effektiv stattfindet und bedarf weiterer Untersuchungen.

Interessant wäre zudem ein Ausbau der ECU selbst für die Analyse von Verschleiss und Korrosion und damit eine Aussage über die Lebensdauer der Maschine zu ermöglichen. Weil die Vibrationen an der Anlage nur teilweise reduziert werden konnten, wäre ein zusätzlicher Aufwand dahingehend sinnvoll, Anlagenteile noch besser zu befestigen oder verschiedenen Befestigungsarten der ECU selbst zu testen, um die Vibrationen weiter zu reduzieren.

Die Betriebssicherheit liesse ich weiter erhöhen, indem die Stromversorgung des Stellantriebes an der ECU mit Notstrom versorgt würde, damit diese nach einem Stromunterbruch den Betrieb wieder selbständig aufnehmen würde, was momentan nicht der Fall ist.

Die beschriebene Arbeit beinhaltete nur die Einbindung und Inbetriebnahme der Maschine in ein CO₂-Kältesystem und die beispielhafte Auswertung von Messwerten. In einem Folgeprojekt sollte der Betrieb längerfristig analysiert und die effektive Energieeinsparung ausgewertet werden. Verschiedene Messperioden und eine relevante Anzahl Messpunkte würden als Grundlage dafür dienen, die ganzjährige Einsparung zu ermitteln. Dazu wird es nötig sein, das Messkonzept zu prüfen und die Auswertung gut zu planen. Dies würde interessante Ergebnisse zum energetischen Gewinn und der Wirtschaftlichkeit liefern.

Kältemittelleckagen beeinflussen die Betriebssicherheit wesentlich und müssen soweit möglich vermieden werden. Undichtheiten traten an hydraulischen Anschlüssen und an der Abdichtung der Drosselspindel auf. Lösbare Verbindungen sollte daher soweit möglich vermieden werden und die Fluidpulsationen und hohen Drücke bei der Konstruktion von Teilen mit beweglichen Komponenten berücksichtigt werden. Generell sind Fluidpulsationen bei der oszillieren Maschine durch Einbau entsprechender Dämpfer soweit möglich zu dämpfen.

Schlussfolgerungen

Die ECU ist ausgelegt, konstruiert, gefertigt, zusammengebaut und erfolgreich in eine CO₂-Kältesystem eingebaut worden. Erste Betriebserfahrungen zeigten eine Reduktion der Druckdifferenz und der Heissgastemperatur der Hauptverdichter in einigen Betriebspunkten. Nach der Inbetriebnahme konnten einige technische Probleme hinsichtlich Schmierung, Regelstrategie, Dynamik und Vibrationen gelöst werden.

Die entwickelte Regelstrategie ist erfolgreich in die Standard-Regelung integriert. Die Arbeit hat gezeigt, welche zusätzlichen Komponenten für die Integration einer ECU nötig sind. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass sich die Massenströme zur ECU und direkt auf Hochdruck mit der entwickelten Regelstrategie beeinflussen lassen.

Es bestätigte sich zudem die Herausforderung, die ECU in verschiedenen Betriebspunkte zuverlässig zu betreiben. Den Hochdruck mit Hilfe der ECU anstelle des Drosselventils zu regeln ist grundsätzlich möglich und erfordert nur eine geringfügige Anpassung am Standardregler.

Der weitere Betrieb der Anlage wird die Kontrolle der Ölrückführung und die Optimierung der Regelparameter ermöglichen. Zudem wäre es nötig, den Betrieb der ECU dahingehend zu optimieren, dass eine Druckerhöhung am Verdichterteil der ECU stattfindet, um die Hauptverdichter zu entlasten. Weiter ist ein detaillierter Vergleich von Betriebspunkten mit und ohne ECU anstehend.

Die Integration einer ECU in eine Kältesystem war erfolgreich aber aufwändig. In zukünftigen Anlagen wäre eine einfachere Einbindung wünschenswert.

Referenzen

- [1] J. Riha: Einbindung einer Expansionsmaschine in CO₂ Supermarkt-Kälteanlagen, DKV-Tagung Würzburg, 2005.
- [2] J. Nickl: Entwicklung einer Expander-Kompressor-Einheit zur Realisierung eines transkritischen Linksprozesses mit dem Arbeitsstoff Kohlendioxid, DKV- Forschungsbericht Nr. 75, 2007.
- [3] M. Wenzel, U. Hesse, J. Nickl: CO₂-Expander-Kompressor-Einheit, DKV-Tagung Magdeburg, 2010.
- [4] M. Wenzel, J. Nickl: CO₂-Expander-Kompressoreinheit: Weiterentwicklung, Einbindung in Kälteanlagen und Regelung, DKV-Tagung Berlin, 2009.
- [5] J. Nickl, G. Will, H. Quack, W. Kraus: Integration of a three-stage expander into a CO₂ refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 2005, 28, 1219-1224.