



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**

---

# **Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung**

## **Funktionsmuster**

---

**Auftraggeber:**

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

**Kofinanzierung:**

Firma KSB Aktiengesellschaft, DE-67227 Frankenthal

**Auftragnehmer:**

Firma awtec AG für Technologie und Innovation  
Leutschenbachstr. 48  
CH-8050 Zürich  
[www.awtec.ch](http://www.awtec.ch)

**Autoren:**

Dirk Uhlenhaut, awtec AG, [dirk.uhlenhaut@awtec.ch](mailto:dirk.uhlenhaut@awtec.ch)  
Daniel Frehner, awtec AG, [daniel.frehner@awtec.ch](mailto:daniel.frehner@awtec.ch)  
Josephine Vega Völk, KSB Aktiengesellschaft, [josephine.vegavoelk@ksb.com](mailto:josephine.vegavoelk@ksb.com)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Thomas Kopp

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 153989 / 103073 / SI/500161-01

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

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Fortschritte in der Entwicklung eines Verdichters für das natürliche Kältemittel  $\text{CO}_2$ , welcher in Grosswärmepumpen eingesetzt werden soll. Aus Gründen der erforderlichen Lebensdauer soll der Kompressor schmierstofffrei ausgeführt werden, wozu sich ein Turbokompressor aufgrund der geringen Querkräfte in den Rotorlagern anbietet. Weitere Vorteile der Ölfreiheit sind die daraus resultierende Vereinfachung des Systems sowie die potentiell höheren Wirkungsgrade in den Wärmetauschern. Die Spanne zwischen Grundlagenforschung und angewandter Entwicklung macht eine Aufteilung der Arbeit in verschiedene Technologieträger zur gesonderten Untersuchung der Teilkomponenten nötig. Diese Teilarbeiten beinhalten unter anderem die Entwicklung eines Elektromotors, welcher hermetisch in den Verdichter mit eingebaut wird, sowie die numerische und experimentelle Bestimmung der Rotordynamik. In beiden Feldern wurden im vergangenen Jahr signifikante Fortschritte erzielt. Als Ergebnis dieser Arbeiten wird momentan ein erster Verdichter aufgebaut, welcher ausreichend mit Sensorik versehen ist, um die aerodynamische sowie konstruktive Auslegung zu verifizieren.

## Abstract

This work describes the progress in developing a compressor for the natural working fluid  $\text{CO}_2$ , for application in large scale heat pumps. To obtain a reasonable product life time, the compressor is designed to be oil-free, which can more easily be achieved by building a turbo compressor due to the small lateral bearing loads. Further advantages of being oil-free are the resulting simplification of the system as well as potentially higher efficiencies of the heat exchangers. The resulting span between applied science and engineering requires a separate treatment of the components used to build the compressor. These partial technological challenges include amongst others the development of an electrical drive, which is hermetically built into the compressor, as well as numerical and experimental quantification of rotor dynamics. During the past year, significant progress could be achieved in both fields. As a result of this work, a first compressor is currently being built, which will be sufficiently equipped with sensors to verify the aerodynamic as well as the mechanical design.

# Ölfreier $\text{CO}_2$ -Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung

## Einleitung und Projektziele

Für Wärmepumpen und Kälteanlagen ist ein Trend zu natürlichen Kältemitteln zu beobachten, welcher auch durch Vorschriften und Gesetze unterstützt wird. Vor diesem Hintergrund soll in diesem Projekt ein ölfreier Kompressor für das natürliche Kältemittel  $\text{CO}_2$  entwickelt werden.  $\text{CO}_2$  bietet als Substanz eine Reihe von Vorteilen im Bezug auf Thermodynamik und Umweltverträglichkeit, mit dem Nachteil, dass die Verwendung von Schmiermitteln durch deren Löslichkeit im Kältemittel zu erhöhter Komplexität des Kreislaufs, sowie zu geringeren Wirkungsgraden führt. Für weitere Details über die Motivation siehe [1]. Als geeignetes technologisches Konzept für die Erfüllung der Ansprüche wurden Turbokompressoren identifiziert, da sie keine Querkräfte auf die Lagerstellen produzieren und es dadurch einfacher ist, schmierstofffreie Lager einzusetzen. Mit Danfoss Turbocor ist heute ein schnelldrehender Verdichter für die Anwendung in Kältekreisen auf dem Markt, allerdings für synthetische (fluorierte) Kältemittel [2].

Phase	Zeitraum
0: Vorabklärung mit Technologiescreening	vor März 2009
1: Konzeptphase	März 2009 bis Juli 2009
2: Funktionsmuster	Juli 2009 bis Dezember 2010
3: Prototyp	Januar 2011 bis Juni 2011

Tab. 1: Projektplan.

In der vergangenen Phase („Funktionsmuster“, seit Juli 2009) wurden unterschiedliche Aspekte der notwendigen technischen Neuentwicklungen genauer untersucht, zum Teil auch experimentell. Darunter fielen unter anderem die Fluid- und Rotordynamik, die Elektromotorenentwicklung sowie die Konzipierung und Konstruktion des ersten Verdichters mit den Möglichkeiten, die Bestandteile der Umsetzung der elektrischen Leistung in das Fluid zu quantifizieren. Die Arbeiten wurden mit dem Ziel durchgeführt, den in der Konzeptphase berechneten möglichen Wirkungsgrad und dadurch erreichbaren COP zu bestätigen. Im folgenden soll der Stand einiger dieser Arbeiten beschrieben werden.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Der nach den in der Konzeptphase definierten Ansprüchen an die rotierende Welle benötigte Elektromotor wurde von der Firma Drivetek AG in Ipsach ausgelegt. Er erfüllt folgende Eckdaten: 2-poliger Permanentmagnetmotor, Stator mit 3 Phasen, die elektrische Leistungsaufnahme im Referenzbetriebspunkt kann für die Drehzahlvariation zur Erfüllung der Anforderungen an die Betriebsbedingungen um bis zu 50% überhöht werden. Der Motor sollte nach intensiven Simulationen der Firma Drivetek im Referenzpunkt einen Wirkungsgrad von >96% erreichen (resultierend in der mechanisch an der Welle zur Verfügung stehenden Leistung). Zur Verifizierung des Motorenkonzepts wurde von uns ein Motorenprüfstand gebaut, welcher 2 Statoren (Antrieb und Bremse) mit einer gemeinsamen Welle verbindet. Beide Statoren sind schwimmend gelagert und erlauben dadurch die Bestimmung der jeweiligen Drehmomente, woraus Schlussfolgerungen über die Effizienz der Teilmotoren gezogen werden können. Der Motorenprüfstand kann nun (nach Abstimmung Frequenzumrichter, Lagesensor und Kugellager) im relevanten Drehzahlbereich betrieben werden. Es zeigt sich, dass die Motorkonstante sehr gut mit der Auslegung übereinstimmt. Rotordynamische Beobachtungen an diesem Prüfstand können aufgrund detaillierter Aufzeichnungen zur Kalibrierung der diesbezüglichen Simulationen verwendet werden.

Zur Zeit befindet sich das Funktionsmuster, d.h. ein erster Verdichter im Aufbau, der den oben beschriebenen Elektromotor verwendet. Der Prüfstand ist mit einer Vielzahl an Sensoren versehen, welche eine umfassende Charakterisierung erlauben. Dazu gehören Hochgeschwindigkeits-Wirbelstromsensoren zur Überwachung und Verifizierung der rechnerisch vorbereiteten Rotordynamik, sowie eine Reihe von Druck- und Temperaturmessungen an den einzelnen Verdichterteilen (so kann zum Beispiel der Zustand unmittelbar nach Austritt Verdichter, zwischen Diffusor und Rückführkanal als auch nach der Stufe bestimmt werden, um die Auslegung der Stufe überprüfen zu können). Wiederum ist der Stator zur Drehmomentbestimmung schwimmend gelagert, so dass die thermodynamischen Ergebnisse der Verdichtung mit den mechanisch an der Welle anliegenden Leistungen verglichen werden können.

Um den definierten Einsatzbereich bzw. die gewählten Betriebspunkte des Funktionsmusters des CO<sub>2</sub>-Kompressors einstellen zu können, wurde im vergangenen Jahr ein CO<sub>2</sub>-Kreislauf aufgebaut, welcher allerdings nicht einem vollständigen Wärmepumpenkreis entspricht. Der technische Aufbau des CO<sub>2</sub>-Kreislaufs entspricht dem im Temperatur-Entropie-Diagramm (Abb. 1) dargestellten Verlauf.

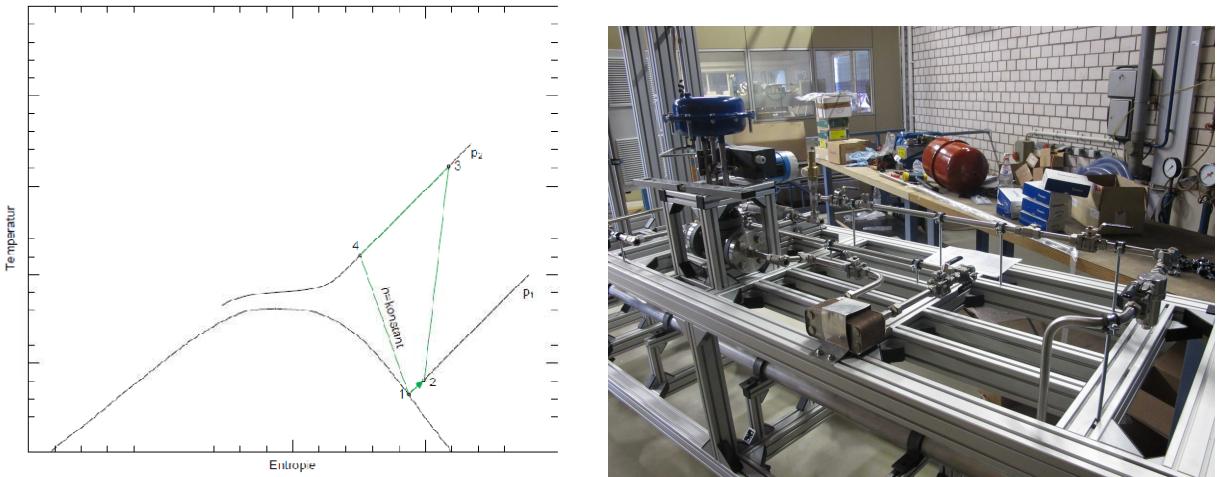


Abb. 1: Darstellung Prinzipskizze  $\text{CO}_2$ -Kreislauf anhand Temperatur-Entropie Diagramm (links). Versuchsaufbau (rechts)

Neben dem  $\text{CO}_2$ -Kreislauf beinhaltet der Versuchsaufbau nötige Kühlkreise, um die Betriebspunkte 1 und 2 (vgl. Abb. 1) sowie Betriebsszenario 3 nach 4 zu gewährleisten. Als Wärmesenke für den kompletten Versuchsaufbau dient eine herkömmliche regelbare Kältemaschine mit Ausseneinheit.

Anfang des kommenden Jahres 2011 stehen intensive Test im Zusammenhang mit dem Funktionsmusters des  $\text{CO}_2$ -Kompressors an. Diese Versuche werden im Labor der Firma awtec durchgeführt. Ziel der Experimentierreihe ist die Verifizierung der Auslegung im Hinblick auf Fluid- und Rotordynamik sowie die experimentelle Bestätigung des zu erreichenden COPs basierend auf der Verdichtereffizienz. Die Erkenntnisse werden zur Konzipierung eines Prototyps verwendet. Dieser Prototyp soll in seiner Konstruktion näher an dem Konzept des Kompressors sein, weniger Messtechnik enthalten und die relevanten Erkenntnisse aus der Funktionsmusterphase evolutionär umgesetzt haben.

## Nationale Zusammenarbeit

Die Entwicklung eines Turbokompressors an der Grenze des Machbaren erfordert den Bezug von Experten mit Erfahrung in den jeweiligen Fachgebieten. In diesem Projekt wirken die folgenden Partner mit:

- Drivetek, Ipsach bei Biel ([www.drvetek.ch](http://www.drvetek.ch)). Diese Firma entwickelt die Steuerung, die Leistungselektronik und den Motor des Turbokompressors.
- Prof. emer. Dr. Karl Schöllhorn, früher Institut für Thermo- und Fluid-Engineering, Fachhochschule Nordwestschweiz. Herr Schöllhorn führt rotordynamische Berechnungen durch.
- Prof. emer. Dr. Willy Schlachter, Institut für Thermo- und Fluid-Engineering, Fachhochschule Nordwestschweiz. Prof. Schlachter betreute die Bachelorarbeit von Patrik Langer, die sich mit der Auslegung der Impeller und Diffusoren befasst.

Zusätzlich wurden verschiedene Entwicklungen bei Fertigern durchgeführt, um den aussergewöhnlichen Präzisionsansprüchen zu genügen (z.B. Fertigung der Impeller, Schleifen, etc.).

Das Projekt wird das Bundesamt für Energie gefördert und durch eine vom Bundesamt eingesetzten Begleitgruppe betreut. Diese setzt sich zusätzlich zum BFE-Projektbegleiter Prof. Dr. Thomas Kopp aus den folgenden Personen zusammen:

Dr. Beat Wellig, Hochschule für Technik und Architektur Luzern

Urs Berger, Migros Genossenschaftsbund

Adrian Altenburger, Amstein + Walthert

Georg Dubacher, Energiecontracting Zürich

## Internationale Zusammenarbeit

Auf internationaler Ebene ist das Projekt in die folgenden Partnerschaften eingebunden.

- Prof. Michael Casey, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium, Universität Stuttgart ([http://www.itsm.uni-stuttgart.de/public\\_html/index.en.html](http://www.itsm.uni-stuttgart.de/public_html/index.en.html)). Die Zusammenarbeit mit Prof. Casey bezieht sich auf die Auslegung der Impeller und Diffusoren.
- Firma KSB, Frankenthal. Das Projekt wird zum grössten Teil durch die Firma KSB finanziert. Dieser starke Industriepartner stellt auch sicher, dass das entwickelte Produkt in den Markt gebracht werden kann.

Dazu kommen verschiedene Zulieferfirmen, welche Entwicklungsarbeit in unserem Auftrag durchführen (Präzisionswuchten, Kältekreisläufe).

## Bewertung 2010 und Ausblick 2011

Im Jahr 2010 konnten viele der konzeptuell entwickelten Elemente in Konstruktion und Fertigung umgesetzt werden. Die ersten rotierenden Maschinen wurden in Betrieb genommen. Die Elektromotorenauslegung war robust und zuverlässig. Die Rotordynamik-Simulationen konnten von den unterschiedlichen Erkenntnissen profitieren, wobei die Erkenntnisse in die Konzipierung und Auslegung des ersten Verdichters mit einflossen. Dieser Verdichter wird in den nächsten Tagen in Betrieb genommen und geprüft.

Gleichzeitig sind insbesondere bei der Fertigung und Inbetriebnahme unterschiedliche Schwierigkeiten aufgetaucht, die den Projektplan etwas verzögerten. Daher ist der Abschluss der Funktionsmusterphase noch in diesem Jahr nicht möglich, und muss in den Anfang des nächsten Jahres ausgedehnt werden.

Im Jahr 2011 wird die Umsetzung all dieser Erkenntnisse zum Bau eines Verdichters führen, welcher in seiner Konzipierung Basis weiterer Untersuchungen sein wird.

## Referenzen

- [1] Friedl, M. (2009) **Ölfreier CO<sub>2</sub>-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung** Jahresbericht 2009, Ressortforschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte, Bundesamt für Energie, Dezember 2009
- [2] <http://www.turbocor.com/>