



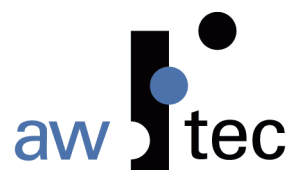
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 14. Dezember 2009

ÖLFREIER CO₂-KOMPRESSOR FÜR GROSSWÄRMEPUMPEN ZUR WARMWASSERERZEUGUNG



AG für Technologie und Innovation

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

KSB AG, D-67227 Frankenthal

Auftragnehmer:

awtec AG für Technologie und Innovation
Leutschenbachsstrasse 48
CH-8050 Zürich
www.awtec.ch

Autoren:

Dr. Markus Friedl, awtec AG, info@awtec.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153989 / 103073

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

Abstract

CO₂ Wärmepumpen sind mit ihrem natürlichen Kältemittel sehr umweltfreundlich und besonders gut für die Bereitstellung von Warmwasser geeignet. Trotzdem werden sie im Bereich der Grosswärmepumpen erst vereinzelt eingesetzt, da verfügbare Kompressoren mit Öl betrieben werden müssen und das Ölmanagement für Anlagenbauer schwierig zu realisieren ist. Deswegen ist es das Ziel des vorliegenden Projekts, eine ölfreie Kompressorbaureihe zu entwickeln, mit der effiziente CO₂-Grosswärmepumpen gebaut werden können.

Ein umfangreicher Technologiescreen hat gezeigt, dass dieses Ziel am besten mit einem Turbokompressor erreicht werden kann. In der Konzeptphase dieses Projektes wurde ein Konstruktionskonzept einer Kompressorbaureihe entwickelt, das gemäss theoretischer Auslegung den geforderten Wirkungsgrad erreicht. Diese Auslegungen müssen in der zweiten Phase des Funktionsmusters auf Experimente abgestützt werden. Erste Testresultate bezüglich Lagertechnologie und Rotorfertigung haben viel versprechende Resultate geliefert.

Die weiteren Tests in der Phase des Funktionsmusters werden weitere Resultate liefern, mit denen in der dritten Phase ein Prototyp gebaut werden kann.

Summary

CO₂ heat pumps are very environmental friendly, due to their natural working fluid and are especially suited to generate domestic hot water. Nevertheless they are only rarely used for large scale heat pumps, since available compressors have to be operated with oil. In contrast to plants with other working fluids, the oil management is much more difficult to achieve for plant constructors. Therefore it is the goal of the current project to develop an oil free compressor series, which enables plant constructors to build efficient large-scale CO₂ heat pumps.

An extensive technology screen has revealed that this goal can best be achieved with turbo compressors. During the conceptual phase of the project, a design concept of a compressor series has been developed. According to theoretical calculations, the concept can reach the required efficiencies. During the second phase of the project these theoretical models need to be evaluated by means of experiments. A functional model is built, where the different effects and loss mechanisms are quantified and compared to the theoretical calculations. First test results from bearings and rotor manufacturing have delivered promising results.

Further testing of the functional model will generate more results, which allow to design a prototype in the subsequent phase of the project.

Projektziele

Im Bereich der Wärmepumpen ist der Trend zu natürlichen Kältemitteln durch den Gesetzgeber in der Schweiz und auf europäischer Ebene klar vorgegeben. CO₂ als Kältemittel ist im Gegensatz zu anderen natürlichen Kältemitteln weder giftig noch brennbar und eignet sich aufgrund seiner thermodynamischen Eigenschaften besonders für die Erwärmung von kaltem Wasser zu warmem Brauchwasser. Obwohl die theoretische und praktische Machbarkeit in zahlreichen Projekten bewiesen wurde, werden CO₂-Wärmepumpen in der Praxis noch kaum eingesetzt. Aufgrund der Ölschmierung heutiger Verdichter muss das Öl aus dem Kreislauf in den Verdichter zurückgeführt werden, was – anders als bei anderen Kältemitteln – bei CO₂ technisch sehr schwierig zu realisieren und nicht mit den geltenden Regeln der Technik realisierbar ist.

Eine ölfreie und skalierbare CO₂-Verdichterbaureihe wird es erlauben, dass Anlagenbauer Grosswärmepumpen wie mit anderen Kältemitteln auslegen und bauen können, ist also eine zwingende Voraussetzung für den Markterfolg von CO₂ Wärmepumpen. Zusätzlich hat eine ölfreie Wärmepumpe die folgenden Vorteile, die sowohl für standardisierte Anlagen als auch für Einzelanfertigungen zutreffen.

- Einfacherer Aufbau der Anlage.
- Besserer Wärmeübergang in konventionellen Wärmetauschern, Verdampfung wird durch Öl nicht behindert.
- Ermöglicht es, Wärmetauscher mit Mikro- und Nanostrukturen einzusetzen, die einen besseren Wärmeübergang aufweisen. Öl verstopft diese Strukturen und macht sie wirkungslos.
- Auf dem Markt sind Erdsonden erhältlich, die mit CO₂ betrieben werden. Mit einem ölfreien CO₂-Kompressor kann das gleiche CO₂ in die Sonde geleitet werden, das auch im Kreislauf verwendet wird. Somit entfällt ein Wärmetauscher und der Wirkungsgrad wird grösser.
- Der Trend bei Wärmepumpen geht in Richtung Leistungsregelung. Dabei wird der Kältemittelfluss der geforderten Leistung angepasst. Wenn der Kältemittelfluss jedoch abnimmt, nimmt die Strömungsgeschwindigkeit in den Rohren ab, welche zur Ölfalle werden können.
- Bei mehreren Kompressoren im gleichen Kreislauf kann das Öl zu Problemen führen, da ein Kompressor dem anderen das Öl wegsaugen kann oder beim Betrieb mit nur einem Kompressor eine Ölfalle entstehen kann.
- Leitungen müssen nicht mehr dahingehend dimensioniert werden, dass Öl mittransportiert wird sondern auf Minimierung des Druckabfalls, was zu weniger Verlusten führt.

Für die Erzeugung von warmem Brauchwasser hat eine solche Kompressorbaureihe in der Schweiz ein realistisches, jährliches Absatzpotential von 70 Anlagen, die jedes Jahr in der Grössenordnung 28 Mio. kWh fossile Energie durch 7 Mio. kWh elektrische Energie ersetzen können. Das entspricht einer Reduktion des CO₂-Ausstosses von zusätzlichen 9000 Tonnen in jedem Jahr¹. Die Erzeugung von Brauchwarmwasser mittels CO₂ Wärmepumpen ist nicht nur ökologisch interessant, sondern macht auch ökonomisch für den Endverbraucher Sinn (vergleiche – Friedl, 2006).

¹ In der Schweiz müssen jährlich ca. 700 Grossanlagen zur Warmwassererzeugung erneuert werden (Hotels, grosse Wohngebäude, Hallen- und Freibäder, Sportanlagen). Es wird hier mit einem Marktanteil von 10 % gerechnet werden. 70 Anlagen pro Jahr mit einer Warmwasserproduktion von 400'000 kWh pro Jahr substituieren jedes Jahr zusätzliche 28 Mio kWh fossile Energie durch 7 Mio kWh Elektrizität. „Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2004“ (www.bfe.admin.ch) Tabelle 4 Seite 7: Von den im Bereich Haushalt und Dienstleistung verbrauchten fossilen Energie stammen 74% aus Erdöl (0.4 kg CO₂/kWh) und 26% aus Erdgas (0.2 kg CO₂/kWh). Das ergibt für die 28 Mio kWh zusätzliche fossile Energie pro Jahr ein CO₂ Ausstoss von 9700 t CO₂. Mit dem schweizerischen Strommix ergibt sich eine Belastung von 0.1 kg CO₂/kWh Elektrizität (Energie-Spiegel Nr. 11/Juni 2004 Grafik 2 Seite 2, Paul Scherrer Institut, www.psi.ch), was für die 7 Mio kWh Elektrizität pro Jahr einen CO₂ Ausstoss von 700 t CO₂ pro Jahr ergibt. Das Potential für die CO₂-Reduktion des vorliegenden Projekts beträgt somit jedes Jahr 9000 zusätzliche Tonnen.

Die Kompressorbaureihe soll es erlauben, eine Wärmepumpe mit den folgenden Kennwerten zu bauen: Im Referenzpunkt mit einer Erdsonde als Wärmequelle soll aus Wasser mit einer Eintrittstemperatur von 10 °C (Rücklauf) mit 40 bis 200 kW Wärmeleistung Wasser mit einer Austrittstemperatur von 60 °C (Vorlauf) mit einem Wirkungsgrad (COP) von 4 produziert werden können. Es sollen Wasseraustrittstemperaturen von bis 70 °C und als Wusch auch bis zu 130 °C erreicht werden können. Falls als Wärmequelle Luft dient, sind Lufttemperaturen von -12 °C bis 35 °C zu berücksichtigen. Die geforderte Lebensdauer ist auf 15 Jahre bei 4000 Betriebsstunden pro Jahr, also total 60'000 Betriebsstunden festgelegt. Einmal pro Jahr darf eine Instandhaltung und alle 5 Jahre eine umfangreiche Wartung durchgeführt werden. Aus diesen Anforderungen an die Wärmepumpe leitet sich das in Tab. 1 aufgeführte Pflichtenheft der Kompressorbaureihe ab.

Referenzbedingung:	Saugseite: 37.7 bara, 8.0 °C Druckseite: 90 bara	
Medium:	CO ₂	
Bereich Saugseite:	Luft -12 °C: 20.3 bara -19 °C bis -4 °C	Luft 35 °C: 68.8 bara 28 °C bis 43 °C
Bedingungen Druckseite:	80 bara bis 120 bara Option 150 bara	
elektrische Leistungsaufnahme:	40 kW Wärmeabgabe:	9.5 kW
	200 kW Wärmeabgabe:	47.6 kW
ölfrei:		
Lebensdauer:	15 Jahre bei 4000 Betriebsstunden pro Jahr.	
Wartung/Instandhaltung:	- jedes Jahr max. 4 h Instandhaltung - alle 5 Jahre umfangreiche Wartung	

Tab. 1: Pflichtenheft der Kompressorbaureihe.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Als Vorabklärungen zu diesem Projekt wurde ein Technologiescreen durchgeführt. Es wurde die am besten geeignete Technologie gesucht, mit der das Pflichtenheft aus Tab. 1 erfüllt werden kann. Das Ergebnis des Technologiescreens war, dass sich das Konzept des Turbokompressors für die vorliegenden Anforderungen am besten eignet. Der Turbokompressor beinhaltet im Konzept, dass auf die Lager keine Querkräfte wirken. In einem vom Bundesamt für Energie geförderten Projekt wurde das Konzept des Kolbenkompressors bereits einmal verfolgt (– Baumann, 2001). Es war ursprünglich auch vorgesehen, im vorliegenden Projekt eine Kolbenkompressorbaureihe zu entwickeln. Zusammen mit Herrn Baumann wurde jedoch keine schmierstofffreie Lösung für den Kurbeltrieb gefunden, welche die hohe Lebensdauer von Wärmepumpen erreicht.

Das Projekt ist in die Phasen 1 bis 3 gemäss Tab. 2 gegliedert. Das Projekt ist zum jetzigen Zeitpunkt Ende 2009 in der Mitte der Phase des Funktionsmusters.

Phase	Zeitraum
1: Konzeptphase	März 09 bis Juli 09
2: Funktionsmuster	Juli 09 bis Juni 10
3: Prototyp	Juli 10 bis Juni 11

Tab. 2: Projektplan.

Die erste Phase, die Konzeptphase, wurde im Sommer 2009 abgeschlossen. Das Ergebnis ist ein Konzept eines Turbokompressors und eine detaillierte Konstruktion einer Baugrösse. Dieses Konzept hat rechnerisch das Potential, die Anforderung aus Tab. 1 zu erfüllen und

eine CO₂-Wärmepumpe mit einem Wirkungsgrad (*COP*) von 4 zu ermöglichen. Dabei wurden umfassende Literaturstudien vorgenommen und daraus abgeleitete Bemessungsformeln verwendet um die elektrischen Bauteile, den Motor, die aerodynamischen Verluste zwischen bewegten und stillstehenden Teilen (Windage Losses), die Impeller und die Rotordynamik zu berechnen. Zusätzlich wurden werkstofftechnische und fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt.

In der zweiten Phase des Funktionsmusters, die seit Sommer 2009 läuft, wurden erste Fertigungsversuche erfolgreich durchgeführt. Beim Funktionsmuster wird stufenweise vorgegangen: Zunächst wird nur die Lagertechnologie getestet, dann nur der Motor und die Rotorkonstruktion und schliesslich wird das Funktionsmuster mit einem Motor und einer einstufigen Verdichterstufe getestet. Diese Phase wird Mitte 2010 abgeschlossen sein.

Die dritte Phase des Prototyps besteht darin, dass ein mehrstufiger Kompressor gebaut wird, der den gesamten geforderten Betriebsbereich des Kompressors abdecken kann.

Nationale Zusammenarbeit

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

- Drivetek, Ipsach bei Biel (www.drivetek.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 betreut eine Diplomarbeit, die sich mit der Auslegung der Impeller und Diffusoren befasst.

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
- Daniel Trüssel KWT

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). 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.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Arbeiten im Jahr 2009 haben zu einem detaillierten Konzept eines Turbokompressors geführt, das gemäss theoretischen Berechnungen den gewünschten Wirkungsgrad liefern kann. Die theoretischen Berechnungen basieren auf publizierten Formeln, die aber zum Teil ausserhalb ihres bisherigen Anwendungsbereichs eingesetzt wurden. Erste Tests der Lagertechnologie und der Rotorfertigung haben viel versprechende Resultate geliefert. Trotzdem steht das Detailkonzept erst auf theoretischen Füßen und es konnte erst wenig experimentell nachgewiesen werden. Diese Lücke zu schliessen ist das Ziel der laufenden Phase des Funktionsmusters, das Mitte 2010 in Betrieb genommen wird. Die experimentellen Resultate werden zu Grundlagen führen, aufgrund derer der Prototyp entwickelt und gebaut werden kann.

Für gewisse Aspekte der konstruktiven Ausführung werden Patentierungen angestrebt.

Referenzen

- Baumann, H. (2001) **Ölfreier CO₂-Kleinkompressor** Schlussbericht, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie, November 2001
- Friedl, M.J. (2006) **Ein heisser Fall: CO₂-Wärmepumpe**, Zürcher Hauseigentümer Verband HEV, Februar 2006, <http://www.hev-zuerich.ch/ms-zeitschrift/jahr-2006/ms-art-200603-06.htm>