

Drehzahlregelbare Elektrowärmepumpe für den Hauseinsatz bis 18 kW Heizleistung unter Einsatz eines Kleinstschraubenverdichters*

Dipl.-Ing. **P. Gaiser**, München

Zusammenfassung

Durch den Einsatz eines extrem kleinen Schraubenverdichters mit einem theoretischen Füllungsvolumen von 0,057 l, der trotz seiner Kleinheit in einem weiten Drehzahlbereich einen sehr guten Liefergrad aufweist, konnte eine stufenlos drehzahlregelbare Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe entwickelt werden, durch die auch bei den tiefsten Außentemperaturen Heizenergie kostengünstig zur Verfügung gestellt werden kann. Durch eine bei Schraubenverdichtern mögliche zweistufige Prozeßführung können vor allem bei tiefen Außentemperaturen Heizleistung und Leistungsziffer der Wärmepumpe erheblich verbessert werden.

Summary

Using an extremely small screw-compressor with a theoretical volumetric displacement of 0.057 l which despite its smallness has a very good volumetric efficiency in a wide speed range it was possible to develop a continuously speed controlled air-to-water electric heat pump, which can produce low-cost heat also at the lowest outdoor temperatures. With a two-stage operation - possible with screw compressors - the heating capacity and the COP can be increased significantly especially at low outdoor temperatures.

*Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben der Aerzener Maschinenfabrik wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03E 8335 A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Einleitung

Bei Elektrowärmepumpen zur Beheizung von Ein- und Zweifamilienhäusern wurden bisher vor allem Hubkolbenverdichter eingesetzt. Um die Investitionskosten möglichst niedrig zu halten, und um die Aussichten auf eine Fertigung in hohen Stückzahlen zu verbessern, wird überwiegend die einfach erschließbare und überall zur Verfügung stehende Umgebungsluft als Wärmequelle verwendet. Die Nutzung dieser Wärmequelle ist jedoch nicht unproblematisch: mit fallender Außentemperatur fällt auch die Verdampfungstemperatur des Kältemittels im Wärmepumpenverdampfer und damit die Sauggasdichte, während der Wärmebedarf des Hauses ansteigt.

Elektrowärmepumpen für den Hauseinsatz werden fast ausschließlich mit konstanter Drehzahl betrieben. Bei Verwendung der Umgebungsluft als Wärmequelle nimmt der Unterschied zwischen dem Wärmebedarf des Hauses und der Heizleistung von mit konstanter Drehzahl betriebenen Wärmepumpen mit der Abweichung von der Auslegungstemperatur, bei der die Heizleistung dem Wärmebedarf entspricht, noch stärker zu als es bei der Verwendung einer Wärmequelle mit konstanter Temperatur, wie z.B. dem Grundwasser schon ohnehin der Fall ist. Das führt dazu, daß in der Regel nur in einem engen Temperaturbereich ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von mit konstanter Drehzahl betriebenen Luft/Wasser-Elektrowärmepumpen möglich ist. Die größten Marktchancen für konventionelle drehzahlkonstante Luft/Wasser-Elektrowärmepumpen sind daher dann gegeben, wenn der größte Teil der Jahresheizarbeit bei Außentemperaturen über 0°C abgedeckt werden kann.

Ziel der hier vorgestellten Entwicklung war es daher, die Wirtschaftlichkeit von Elektrowärmepumpen für den Hauseinsatz zu verbessern. Hierbei handelt es sich vor allem um Maßnahmen, die besonders vorteilhaft bei einem Ersatz des üblicherweise verwendeten Hubkolbenverdichters durch einen Schraubenverdichter realisiert werden können.

Anpassung der Heizleistung an den Wärmebedarf durch Drehzahlregelung

Wird eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit konstanter Drehzahl betrieben, so werden die höchsten Verdampfer- und Heizleistungen bei den höchsten Außentemperaturen erbracht, bei denen der Wärmebedarf am geringsten ist. Für diese unnötig hohen Leistungen müßten die Komponenten der Wärmepumpen ausgelegt werden.

Oberhalb der Auslegungstemperatur kann die Heizleistung nur durch Ein- und Ausschalten dem Wärmebedarf angepaßt werden. Untersuchungen des RWE/1/ haben ergeben, daß bereits bei Wärmepumpen, die bei Außentemperaturen knapp über 0°C abgeschaltet werden, eine Verbesserung der Jahresarbeitszahl (das Verhältnis zwischen der von der Wärmepumpe gelieferten Jahresheizarbeit zu der von ihr im Verlauf dieser Zeit aufgenommenen elektrischen Energie) von ca. 20 % erwartet werden kann, wenn man von einem Betrieb mit konstanter Drehzahl auf eine genaue Anpassung der Heizleistung an den Wärmebedarf durch kontinuierliche Drehzahlverstellung übergeht. Je tiefer die Auslegungstemperatur ist, bis zu der die Wärmepumpe betrieben wird, um so größer ist die Verbesserung bei einem Übergang auf eine kontinuierliche Anpassung der Heizleistung an den Wärmebedarf. In Japan konnten bei Geräten, die im Winter zum Heizen und im Sommer zur Raumklimatisierung eingesetzt werden, durch stufenlose Drehzahlverstellung Energieeinsparungen bis zu 40 % realisiert werden /2/.

Schraubenverdichter im Wärmepumpeneinsatz

Hubkolbenverdichter sind für eine Leistungsanpassung von Wärmepumpen durch Drehzahlregelung wegen der ausgeprägten Drehzahlabhängigkeit ihres Liefergrades nur schlecht geeignet. Die starke Drehzahlabhängigkeit wird hauptsächlich durch die Ventile auf der Saug- und der Druckseite verursacht, deren Befederung nur in einem engen Drehzahlbereich optimal ausgelegt werden kann. Schraubenverdichter dagegen weisen in einem weiten Drehzahlbereich einen hohen Liefergrad auf, der nur wenig von der Drehzahl abhängt.

Ein weiterer Nachteil von Hubkolbenverdichtern, der sich beim Einsatz in Luft/Wasser-Wärmepumpen besonders ungünstig bemerkbar macht, ist das schädliche Volumen zwischen den Kolben im oberen Totpunkt und dem Auslaßventil, das prinzipiell nicht auf die Druckseiteausgeschoben werden kann.

Das in diesem schädlichen Volumen verdichtete Kältemittelgas entspannt sich während der Abwärtsbewegung des Kolbens erst bis auf den Sauggasdruck, bevor neues Kältemittel angesaugt werden kann. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen ist das Verhältnis zwischen Kondensationsdruck und Verdampfungsdruck gerade bei den niedrigsten Außentemperaturen besonders hoch, da in diesem Fall die höchsten Vorlauftemperaturen des Heizwassers gefordert werden, und die Nachteile des schädlichen Volumens machen sich besonders drastisch bemerkbar. Aufgrund der Ventilverluste und des schädlichen Volumens wächst bei Hubkolbenverdichtern der Kältemittelvolumenstrom nicht proportional, sondern meist erheblich geringer, mit der Drehzahl an. Bei Schraubenverdichtern dagegen gibt es kein schädliches Volumen und der Kältemittelvolumenstrom nimmt in einem weiten Bereich an Drehzahlen und Druckverhältnissen in guter Näherung proportional mit der Drehzahl zu.

Mit Schraubenverdichtern läßt sich daher viel leichter als mit Hubkolbenverdichtern durch Drehzahlverstellung die mit abnehmender Außentemperatur erforderliche Steigerung der Heizleistung von Luft/Wasser Wärmepumpen realisieren.

Weitere Vorteile von Schraubenverdichtern für einen Einsatz in Wärmepumpen sind:

- Schraubenverdichter sind wenig empfindlich gegen Flüssigkeitsschläge; ein Flüssigkeitsabscheider ist unnötig.
- Es gibt keine ausgeprägten Druckspitzen wie beim Hubkolbenverdichter.
- Eine Anlaufentlastung braucht nicht vorgesehen zu werden.
- Da ausschließlich rotierende Bewegungen vorkommen, gibt es keine Vibrationsprobleme.

- Schraubenverdichter werden typischerweise bei Drehzahlen betrieben, die um ein Mehrfaches höher liegen als bei Hubkolbenverdichtern. Ihr Platzbedarf ist bei gleicher Leistung viel geringer als der von Hubkolbenverdichtern.

Das Fehlen von Ventilen, die geringen Vibrationen, die konstante Leistungsaufnahme ohne ausgeprägte Spitzen des Drehmoments und damit die geringere Belastung von Welle und Lagern führen zu einer längeren Lebensdauer als bei Hubkolbenverdichtern.

Zweistufiger Prozeß mit Flüssigkeitsunterkühlung

Bei Verwendung der Umgebungsluft als Wärmequelle treten bei den tiefsten Außentemperaturen die höchsten Differenzen zwischen der Kondensations- und der Verdampfungstemperatur auf. Unter diesen Umständen verdampfen bei der Entspannung durch das Expansionsventil bereits ca. 30 bis 50 % des Kältemittels (Abb. 1, Übergang von Zustand 3 nach 4), ohne Wärme von der Umgebungsluft aufzunehmen. Die dazu benötigte Wärme wird dem sich auf die Verdampfungstemperatur abkühlenden flüssigen Kältemittel entzogen. Dieser Kältemittelanteil nimmt nur die Kompressionsarbeit im Verdichter auf und gibt sie als Kondensationswärme im Verflüssiger ab. Das führt zu einer erheblichen Verschlechterung der Leistungsziffer der Wärmepumpe. Die konstruktiven Merkmale des Schraubenverdichters ermöglichen eine Verbesserung durch einen zweistufigen Prozeß. Dabei wird wie im Schaltbild der Abb. 1 dargestellt, ein Teil des verflüssigten Kältemittels über ein Expansionsventil auf den Zwischendruck p_z entspannt, siedet bei diesem Druck und unterkühlt dabei im günstigsten Fall, der in der Abb. 1 dargestellt ist, den anderen Teil des verflüssigten Kältemittels bis auf die dem Zwischendruck p_z entsprechende Verdampfungstemperatur (Zustand 3' in Abb. 1). Das so unterkühlte Kältemittel wird dann über ein thermostatisches Expansionsventil in den eigentlichen Wärmepumpenverdampfer auf den Verdampfungsdruck p_0 entspannt (Übergang von Zustand 3' nach 4' in Abb. 1). Dabei verdampft nur noch ein kleiner Teil des Kältemittels, ohne Wärme aus der Umgebungsluft aufzunehmen. Der im Flüssigkeitsunterkühler verdampfte Kältemittelanteil wird an

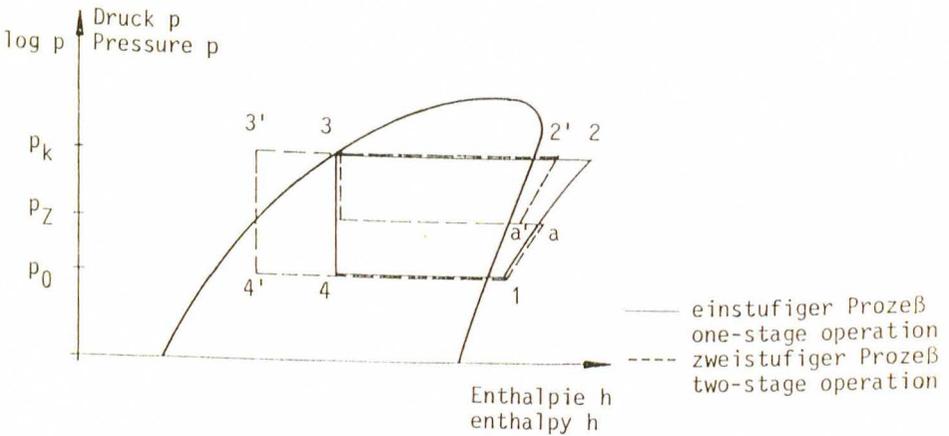
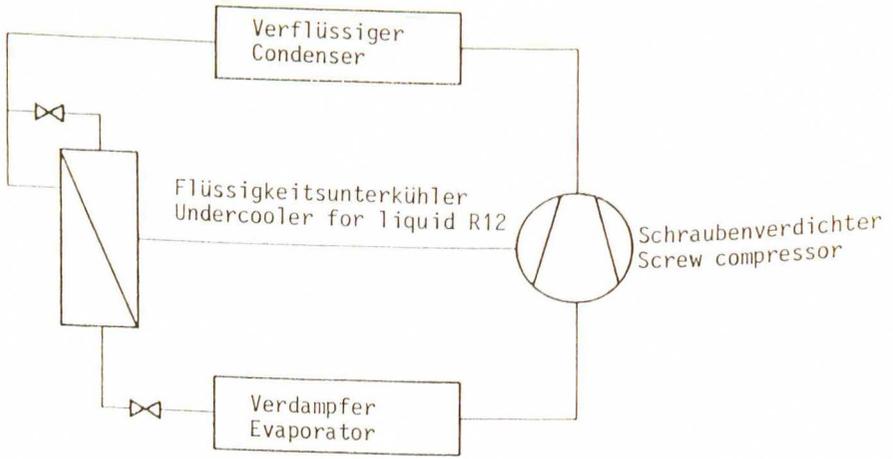


Abb. 1: Zweistufiger Prozeß mit Flüssigkeitsunterkühlung
 Fig. 1: Two-stage operation with undercooler for liquid R12

einer Stelle in den Schraubenverdichter geleitet, bei der die Verdichtung des Sauggases bereits bis auf den Zwischendruck p_z fortgeschritten ist. Dabei kühlt sich das verdichtete Sauggas vom Zustand a auf a' ab und der Kondensationsdruck p_k wird im Zustand $2'$ erreicht. Durch diesen zweistufigen Prozeß wird nicht nur die Leistungsziffer der Wärmepumpe sondern auch der Kältemittelmassenstrom durch den Verflüssiger und damit die Heizleistung erhöht.

Bei Hubkolbenverdichtern kann in ähnlich vorteilhafter Weise ein zweistufiger Prozeß realisiert werden, in dem z.B. zwei Zylinder als Niederdruckstufe und ein dritter als Hochdruckstufe eingesetzt werden /3/. Die Vorteile des zweistufigen Prozesses sind für $p_Z = \sqrt{p_k \cdot p_0}$ am größten /4/.

Bei den tiefsten Außentemperaturen kann die Heizleistung durch den zweistufigen Prozeß um ca. 25 bis 30 % gegenüber dem konventionellen einstufigen Prozeß gesteigert werden, während bei hohen Außentemperaturen die Heizleistungen in beiden Fällen ungefähr gleich groß sind. Bei einem zweistufigen Prozeß kann daher innerhalb des zugelassenen Drehzahlbereichs des Schraubenverdichters die Heizleistung innerhalb eines größeren Temperaturbereiches dem Wärmebedarf exakt durch Drehzahlverstellung angepaßt werden.

Schraubenverdichter

Die Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe für den Hauseinsatz wurde mit dem extrem kleinen in Abb. 2 dargestellten Schraubenverdichter ausgerüstet. Die technischen Daten dieses Verdichters sind in Tab. 1 zusammengefaßt.



Abb. 2: Druckseite des Verdichters VMX 0637

Fig. 2: Pressure Side of the Compressor VMX 0637

Zähnezahl Hauptrotor	4
Zähnezahl Nebenrotor	6
Durchmesser Hauptrotor:	45,7 mm
Durchmesser Nebenrotor:	43,125 mm
Achsabstand:	34,5 mm
Verwindungswinkel HR:	300 °
Länge:	57 mm
Längen-Durchmesserverhältnis:	1,25
theoretisches Füllungsvolumen:	0,057 l

Tab. 1: Technische Daten des Schraubenverdichters VMX 0637

Nach einer Anpassung der Öleinspritzung an die Verdichtung des verwendeten Kältemittels R 12 konnten sehr gute Liefergrade erreicht werden. Im gesamten Betriebsbereich der Luft/Wasserwärmepumpe, d.h. hohe Druckverhältnisse bei den höchsten Drehzahlen (10.000 Upm und Druckverhältnisse über 10) und niedrige Druckverhältnisse bei niedrigen Drehzahlen liegt der Liefergrad über 70 %. Erst bei Drehzahlen unter 3.000 Upm nimmt der Liefergrad stärker ab.

Elektrowärmepumpe

Abb. 3 zeigt ein Foto des Prototypen der entwickelten Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe. Das Bild enthält nicht den Verdampfer und auch nicht den Flüssigkeitsunterkühler. Die in Abb. 3 gezeigte Wärmepumpe enthält jedoch die Anschlüsse für diese Wärmetauscher, so daß entsprechend den Erfordernissen des jeweiligen Einsatzfalls problemlos eine konventionelle einstufige oder zweistufige Prozeßführung realisiert werden kann. Die Tabelle 2 enthält technische Daten der in Abb. 3 dargestellten Wärmepumpe für einen einstufigen Prozeß. Eine detaillierte Beschreibung dieser Wärmepumpe ist in /5/ gegeben.

Einsatzbereich bei Außentemperatur Heizbetrieb	°C	bis - 18° C monovalent oder bivalent	
Brauchwasserbereitung Regelung		möglich Mikroprozessor- Technik	
Heizleistung	kW	11.7	6.3
bei Außentemperaturen	°C	-15	+7
Vorlauftemperatur	°C	55	35
Drehzahl	1/min	10000	3000
Heizzahl		2.0	3.9
Nennspannung	380/220 V, 3N		50 Hz
Leistungsaufnahme	kW	max. 7	
max. Vorlauftemperatur	°C	55	
Heizwasserdurchsatz	l/h	1500	
Außenluft-Volumenstrom	m ³ /h	5000	
Außenluftabkühlung	K	2 - 7	
Abtautechnik		Heißgas	
Verdichterbauart		Schraube	
Verdichterdrehzahl	1/min	3000 - 10000	
Geometrisches Volumen	Liter pro Umdrehung	0.057	
Kältemittel		R 12	
Platzbedarf der Wärmepumpe	Höhe: 1.3 m	Durchmesser: 0.44m	

Tab. 2: Technische Daten der Luft-/Wasser-Elektrowärmepumpe mit Schraubenverdichter VMX 0637

Mit dieser Entwicklung steht der Prototyp einer Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe zur Verfügung, durch die auch bei den tiefsten in Deutschland auftretenden Außentemperaturen Heizenergie kostengünstig zur Verfügung gestellt werden kann.

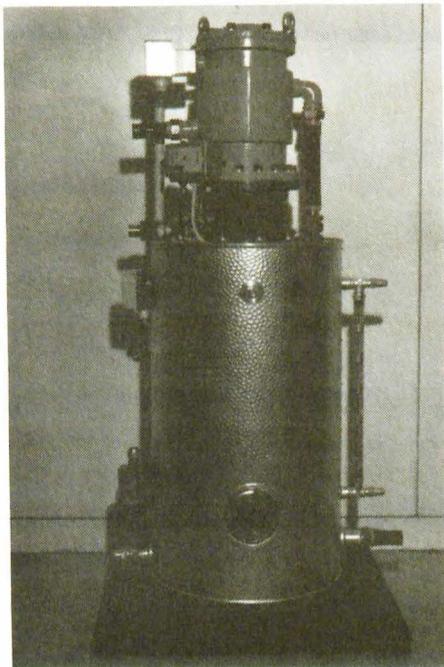


Abb. 3: Elektrowärmepumpe (ohne Verdampfer)

Fig. 3: Electric Heat Pump (without evaporator)

Literaturhinweise

- /1/ Görke, P. Einfluß der Verdichtersteuerung auf die Jahresarbeitszahl
VDI-Bericht 343, S. 39 (1979)
- /2/ Halozan, H. HPC Representatives Visit Japan, NewsLetter of the IEA
Heat Pump Center 4, Nr.1, S. 17 (1986)
- /3/ Kaiser, H. Vorteil zweistufiger Kältemittelverdichter beim Einsatz
nicht nur in Tieftemperaturanlagen, Ki Klima-Kälte-
Heizung 12 (1986) S. 683
- /4/ Baehr, H.D. Thermodynamik, Springer-Verlag 1984
- /5/ Seidel, G. Entwicklung und Erprobung einer Wärmepumpe mit Elektro-
Gaiser, P. motor und Schraubenverdichter für Heizleistungen von 10
bis 18 kW. Bericht zum BMFT Vorhaben 03E-8335-A (1986).
Zubeziehen über das Informationszentrum RAUM und BAU der
Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart.