

Scroll-Verdichter für Wärmepumpen zur

Wohnraumbeheizung in Alt- und Neubauten*

Dr. Norbert Kämmer, Welkenraedt/Belgien

Elektrisch betriebene Wärmepumpen für die Wohnraumheizung sind unter Umweltgesichtspunkten eine sinnvolle Alternative zur fossilen Wohnraumbeheizung. Sowohl beim Primärenergieeinsatz, wie auch bei den CO₂-Emissionen bieten sie ein nennenswertes Reduzierungspotential, welches durch die zukünftigen Verschiebungen in der Zusammensetzung bei der Erzeugung elektrischer Energie noch verstärken werden wird. Ein großer Anteil des heutigen Heizungsanlagenmarktes ergibt sich aus dem Sanierungsbedarf für ältere Anlagen. Von allen möglichen Wärmepumpenkonzepten ist die Luft/Wasser-Wärmepumpe, die Umgebungsluft als Wärmequelle nutzt, für diesen Einsatzfall diejenige mit dem geringsten Umbauaufwand und damit am preisgünstigsten. Allerdings stellt sie auch für den Betrieb der Wärmepumpe die schwierigsten Betriebsbedingungen dar. Durch gezielte Veränderungen an Scroll-Verdichtern lassen sich diese Betriebspunkte erreichen, und es ergibt sich auch eine Steigerung des Gütegrades, verglichen mit Standard-Klima-Verdichtern. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden zwei Wärmepumpen-Scroll-Baureihen entwickelt, die auf der Kälte-Scroll-Baureihe aufbauen.

Obwohl Wärmepumpen zur Wohnraumheizung bereits eine lange Geschichte aufweisen, konnten sie sich über viele Jahre hinweg nicht gegen die konventionelle fossile Heizung durchsetzen. Mittlerweile stehen technisch ausgereifte Wärmepumpen zur Verfügung, und es zeichnet sich eine wachsende Akzeptanz bei der Wohnraumbeheizung ab. Diese Akzeptanz ist zur Zeit noch regional sehr unterschiedlich und spiegelt das unterschiedliche Umweltbewusstsein in breiten Schichten der Bevölkerung wieder. Die Diskussion über Klimaveränderungen und Energieeinsparungen hat aber das Interesse an der Wärmepumpe zur Wohnraumheizung erneut belebt und schlägt sich in einem wachsenden Wärmepumpeneinsatz nieder. Damit ist dieser Markt auch für Komponentenhersteller zunehmend interessant geworden und rechtfertigt gesonderte Entwicklungen von Komponenten für den Einbau in Heizungswärmepumpen. Obwohl grund-

sätzlich alle in der Kälte- und Klimatechnik im Einsatz befindlichen Verdichtertechnologien in Frage kommen, hat sich der Scroll-Verdichter unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten als idea-

zum Autor

Dr.-Ing.
Norbert Kämmer,
Vice President
Engineering,
Copeland S. A.,
Welkenraedt,
Belgien



le Lösung herausgestellt. Deshalb beziehen sich die weiteren Ausführungen, soweit sie sich auf Verdichter erstrecken, ausschließlich auf diesen Typ.

Wärmepumpen unter Umwelt- und Marktgesichtspunkten

Um die Stellung der Wärmepumpe in der Energie- und Umweltdiskussion einzuordnen, sollen hier der Primärenergiebedarf verschiedener Heizungskonzepte und deren CO₂-Emissionen dargestellt werden.

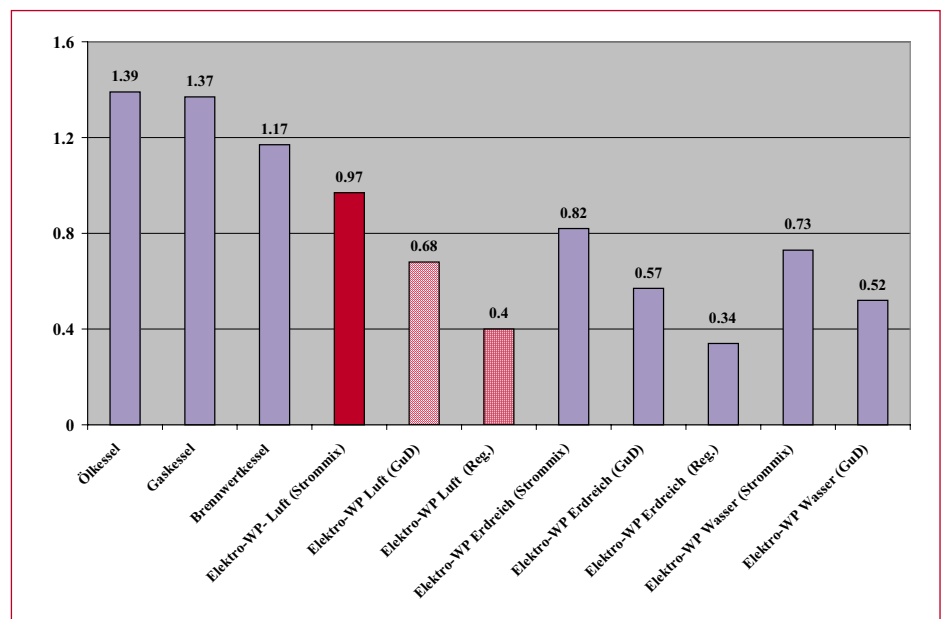


Bild 1 Vergleich des Primärenergiebedarfes verschiedener WP-Systeme

* Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 20. November 2003 in Bonn

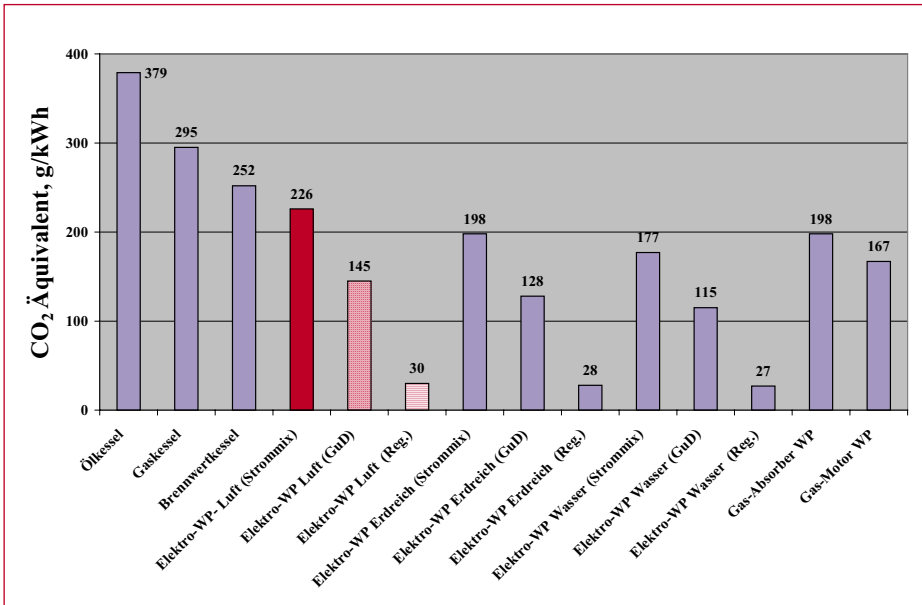


Bild 2 Vergleich der CO₂-Emissionen verschiedener WP-Systeme

Bild 1 zeigt die auf den Primärenergiebedarf bezogene kumulierte Energieaufnahme (KEA) verschiedener Heizungssysteme [1]. Bei Heizungssystemen mit fossilen Brennstoffen liegt dieser KEA-Wert über 1, bedingt durch die verschiedenen Verluste der Energiebereitstellung, des Transportes und der Verbrennung, wohingegen die KEA-Werte der Wärmepumpen unter 1 liegen. Bei Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle, die als Alternative zur fossilen Wohnraumheizung eine besondere Stellung einnehmen, lässt sich je nach Art der elektrischen Energieerzeugung eine wesentliche Ersparnis im Primärenergieeinsatz zur Wohnraumheizung erreichen.

Aus Bild 1 ist auch zu entnehmen, dass sich bereits beim jetzigen Strommix eine Energieeinsparung erzielen lässt. Günstigere Bedingungen in der Energieerzeugung und die Verwendung von Energiequellen mit höherem Temperaturniveau bewirken weitere Verbesserungen. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die CO₂-Emissionen (siehe Bild 2)[1]. Auch hier sind alle untersuchten Wärmepumpenvarianten in den CO₂-Emissionen einer fossilen Feuerung überlegen. Insofern zeigt sich, dass die Elektrowärmepumpe bei den beiden drängendsten umweltpolitischen Problemen, nämlich dem primären Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen, einen nennenswerten positiven Beitrag leisten können.

Von daher mag es verwundern, dass die Wärmepumpe im gesamten Heizungsmarkt zur Zeit nur eine sehr kleine Rolle spielt, wie aus Bild 3 für den europäischen Heizungsmarkt 2002 ersichtlich ist. Im Jahre 2002 betrug der Anteil der Wärmepumpen-

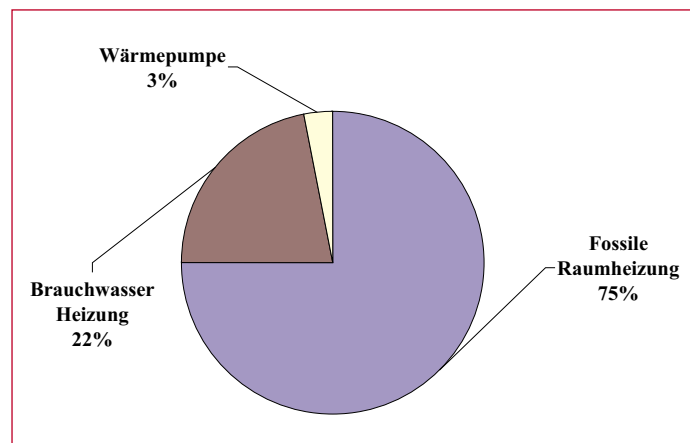


Bild 3 Europäischer Heizungsmarkt 2002

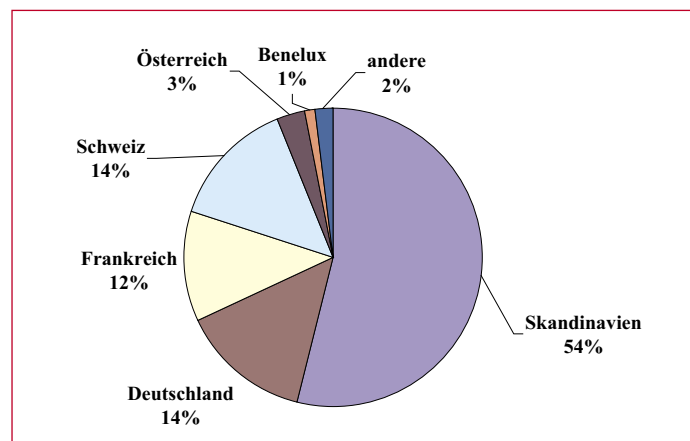


Bild 4 Europäischer Wärmepumpenmarkt 2002

heizungen am gesamten Heizungsmarkt nur ca. 3%, während 3/4 der Wohnraumheizungen fossil betrieben wurden. Von diesem Anteil wiederum sind ca. 75% Ersatzinvestitionen in bestehende Gebäude, die für die entsprechenden Auslegungsparameter der Heizungsanlagen geeignet sein müssen. Der so genannte Retrofit-Markt stellt daher das größte Wachstumspotential für Wärmepumpen dar. Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Wärmepumpen für diesen Retrofit-Markt optimiert werden müssen, um erfolgreich sein zu können.

Betrachtet man die Anzahl der verkauften Wärmepumpen im europäischen Markt (Bild 4) so zeigt sich ein sehr starkes regionales Ungleichgewicht. Den größten Anteil in diesem Marktsegment stellt mit über 50% Skandinavien dar. Des Weiteren besitzt die Schweiz einen ebenso starken Anteil wie das wesentlich bevölkerungsreichere Deutschland mit 14%. Hierin spielt sich hauptsächlich das unterschiedliche Umweltbewusstsein in den Bevölkerungen dieser Länder wieder. Gleichzeitig ist in den genannten Ländern der Einsatz der Elektrowärmepumpe ökologisch besonders vorteilhaft, da dort der Anteil an regenerativ erzeugter, elektrischer Energie

höher ist als etwa in Deutschland. Wie noch gezeigt wird, sind die Betriebsbedingungen zwischen diesen Regionen für Wärmepumpen durchaus unterschiedlich. Dies hat Auswirkungen auf die Anforderungen an die Verdichter.

Anforderungen an Wärmepumpenverdichter

Die Anforderungen an die Wärmepumpenverdichter ergeben sich aus zwei Randbedingungen, nämlich aus der genutzten Wärmequelle und aus dem verwendeten Heizungssystem. Bei den Heizungsanlagen ist im wesentlichen zwischen einer Altbauheizung mit relativ hohen Betriebstemperaturen und einer Neubauheizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen, insbesondere bei Fußbodenheizungen, zu unterscheiden. Für die Bereitstellung von Brauchwasser wird ebenso eine relativ hohe Wasservorlauftemperatur benötigt.

In Bild 5 wird versucht, die sich aus diesen Randbedingungen ergebenden

	Altbau-Heizung	Neubau-Niedertemperatur-Heizung	Brauchwasser
Luft/Luft		t qu=-10°C t VL=40°C	
Luft/Wasser	t qu=-10°C t VL=65-90°C	t qu=-10°C t VL=35°C	t qu=-10°C t VL=60°C
Wasser/Luft		t qu=8°C t VL=40°C	
Wasser/Wasser	t qu=8°C t VL=65-90°C	t qu=8°C t VL=35°C	t qu=8°C t VL=60°C
Sole/Luft		t qu=-5°C t VL=40°C	
Sole/Wasser	t qu=-5°C t VL=65-90°C	t qu=-5°C t VL=35°C	t qu=-5°C t VL=60°C

Bild 5 Auslegungstemperaturen für Wärmepumpen

Temperaturen der Wärmequelle und der Wasservorlauftemperatur der Heizung systematisch darzustellen. Hierin steht t qu für die Temperatur der Wärmequelle und t VL für die Vorlauftemperatur des Heizungssystems. Natürlich unterliegen diese Temperaturen sehr starken täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen, und die in Bild 5 aufgeführten Temperaturen sind

als Auslegungstemperaturen für die ungünstigsten Bedingungen anzusehen. Für Altbauheizungen gelten Wasservorlauftemperaturen zwischen 60 und 90°C als Auslegungsbedingung [2], während für heutige Niedertemperatur-Heizungen wesentlich niedrigere Temperaturen von ca. 35°C [3] verwendet werden. Um der Gefahr der Legionellenkrankheit entgegenzuwirken,

muss für die Brauchwassererwärmung zumindest zeitweise eine Temperatur von 60 °C erreicht werden.

In dieser vereinfachten Darstellung kommen als Wärmequellen Luft, Wasser oder Sole bei Erdwärmetauschern in Betracht. Unter dem Gesichtspunkt der Anlagenkosten, sowohl für Neubauten, als auch bei der Altbauanierung, ist mit Sicherheit eine Wärmepumpe, die Umgebungsluft als Wärmequelle benutzt, als die Interessanteste anzusehen. Leider stellt sie auch die schwierigsten Anforderungen an den Betrieb der Wärmepumpe, nicht nur, was die zu realisierenden Temperaturdifferenzen angeht, sondern auch im Hinblick auf ihre energetische Effizienz, der besonderen Abtau-Erfordernisse, usw.

Diese Betriebsbedingungen sind in Bild 6 im Hinblick auf die Erfordernisse an den Verdichterbetrieb umgesetzt worden. Der Betrachtung liegt die Annahme zugrunde, dass im Verdampfer eine Temperaturdifferenz von 5 K und im Verflüssiger von 3 K erforderlich ist. Da für die Wärme-

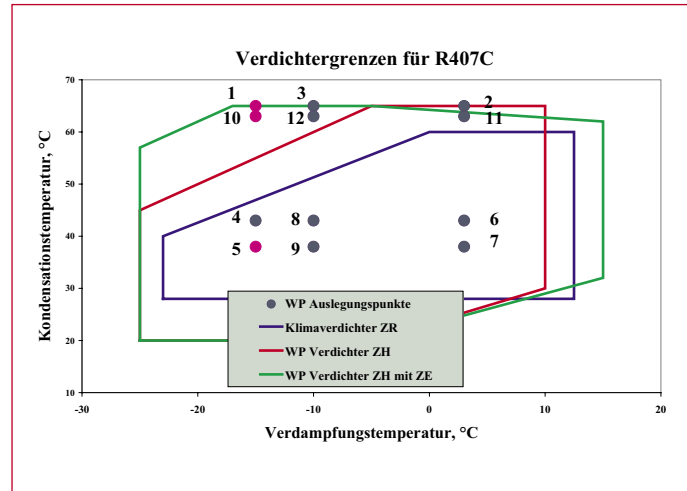


Bild 6
WP-Auslegungs-
bedingungen und
Verdichtergrenzen

übertragung an den Heizkreislauf im Gegenstromwärmetauscher auch die Enthitzung nutzbringend eingesetzt werden kann, ergibt sich diese geringe Temperaturdifferenz auf der heißen Seite. Ebenso kommt zum Tragen, dass die erforderliche Vorlauftemperatur für Altbauten gegenü-

ber den ursprünglichen Auslegungsbedingungen gesenkt werden kann und nun bei ca. 60 °C liegt [3].

Gleichzeitig sind hier drei verschiedene Anwendungsgrenzen dargestellt, gültig für das Kältemittel R407C. Da sich dieses Kältemittel auf dem Wärmepumpenmarkt

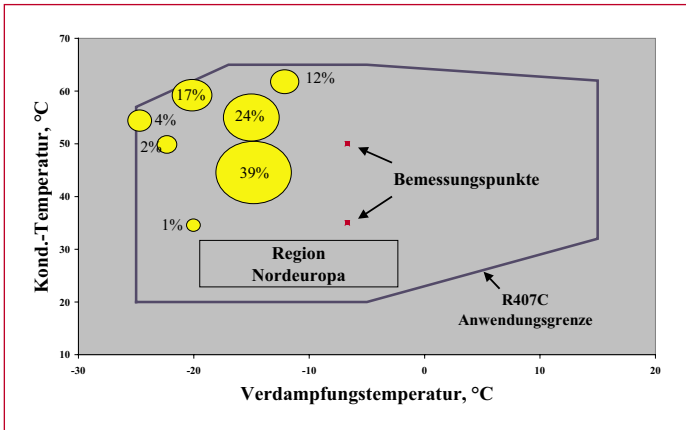


Bild 7 Verteilung des WP-Energieverbrauchs in Nordeuropa

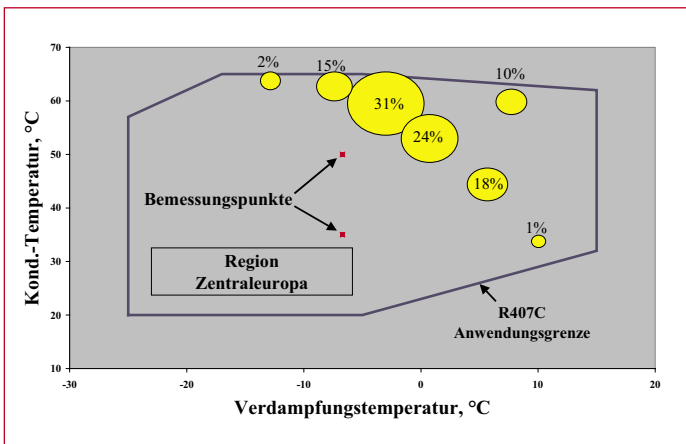


Bild 8 Verteilung des WP-Energieverbrauchs in Zentraleuropa

durchgesetzt hat, gelten dafür alle folgenden Ausführungen. Gezeigt werden die Anwendungsgrenzen eines Standard-Klimaverdichters und zusätzlich die Grenzen zweier verschiedener Verdichter, die speziell für die Wärmepumpenanwendung entwickelt wurden. Es wird deutlich, dass mit einem Standard-Klimaverdichter nicht der ganze Teil der Wärmepumpenerfordernisse abgedeckt werden kann. Zwar liegen alle Betriebspunkte für Niedertemperaturanwendungen in Neubauten innerhalb des Anwendungsbereichs eines Standard-Klima-Verdichters, aber der sehr wichtige Betriebspunkt für die Brauchwassererwärmung ist nicht enthalten. Dieser Punkt ist aber entscheidend, da er von einer Wärmepumpenanlage erreicht werden muss, um einen monovalenten Betrieb, also ohne Zusatzheizung, z. B. in Form einer elektrischen Widerstandsheizung, zu ermöglichen. Ebenso liegt der Betriebspunkt für die Altbausanierung (Punkt 1) außerhalb der Anwendungsbereiche eines normalen Klima-Verdichters. Um diese beiden wichtigen Punkte, Brauchwassererwärmung und der Ersatz einer konventionellen Hei-

zungsanlage durch eine Luft/Wasserwärmepumpe erreichen zu können, ist es erforderlich, einen speziellen Wärmepumpenverdichter mit Zwischeneinspritzung zu

entwickeln. Es sind gerade diese beiden Betriebspunkte, deren Erreichen erforderlich ist, um einen wirtschaftlich interessanten Anteil des Heizungsmarktes für die Wärmepumpe zu erschließen. Auf die dazu erforderlichen technischen Modifikationen wird noch näher eingegangen.

Die folgenden Bilder 7 und 8 zeigen, wie sich die Verteilung der Betriebsbedingungen über ein Jahr hin ergibt. Es wird hier jedoch nicht die pure zeitliche Verteilung der Betriebsbedingungen gezeigt, sondern diese ist gewichtet mit der jeweiligen elektrischen Energieaufnahme. Die aufgeführten Prozentzahlen stellen also dar, wie sich der jährliche Verbrauch an elektrischer Energie auf die verschiedenen Betriebspunkte verteilt. Die Größe der Kreise symbolisiert in etwa den prozentualen Anteil. Zusätzlich sind die Referenzpunkte nach EN 255 dargestellt, nach der die Gütezahlen von Wärmepumpen bewertet werden. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Region Nordeuropa, Bild 7 und der Region Mitteleuropa, Bild 8. Der Betrieb in Nordeuropa ist durch relativ niedrigere Verdampfungstemperaturen, aber auch durch niedrigere Kondensatortemperaturen gekennzeichnet. Nahezu 40% der Energieaufnahme des Wärmepumpenverdichters geschieht bei -15°C Verdampfung und 45°C Kondensation.

Im Gegensatz dazu ist der Betrieb in Zentraleuropa durch höhere Verdampfungstemperaturen gekennzeichnet. Allerdings liegen auch die Kondensationstem-

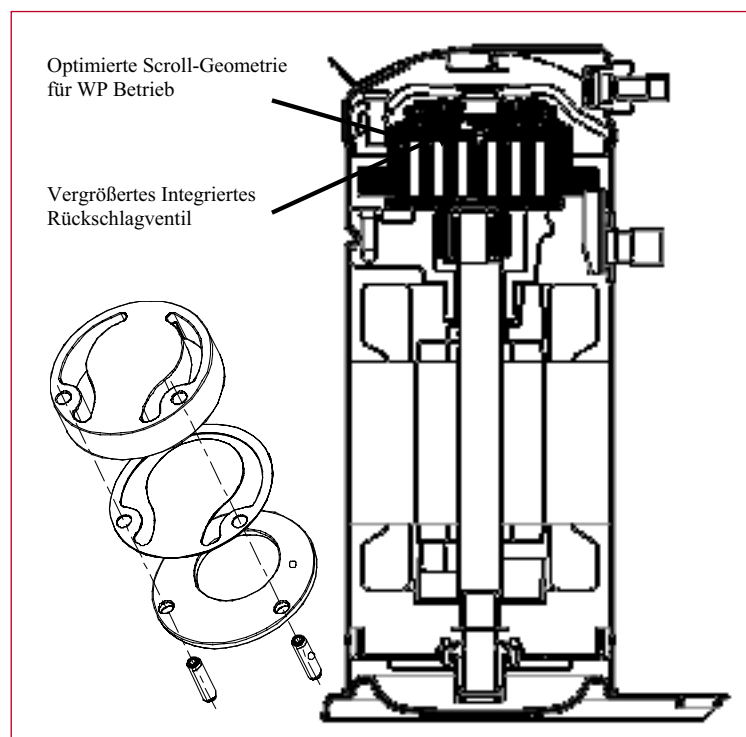
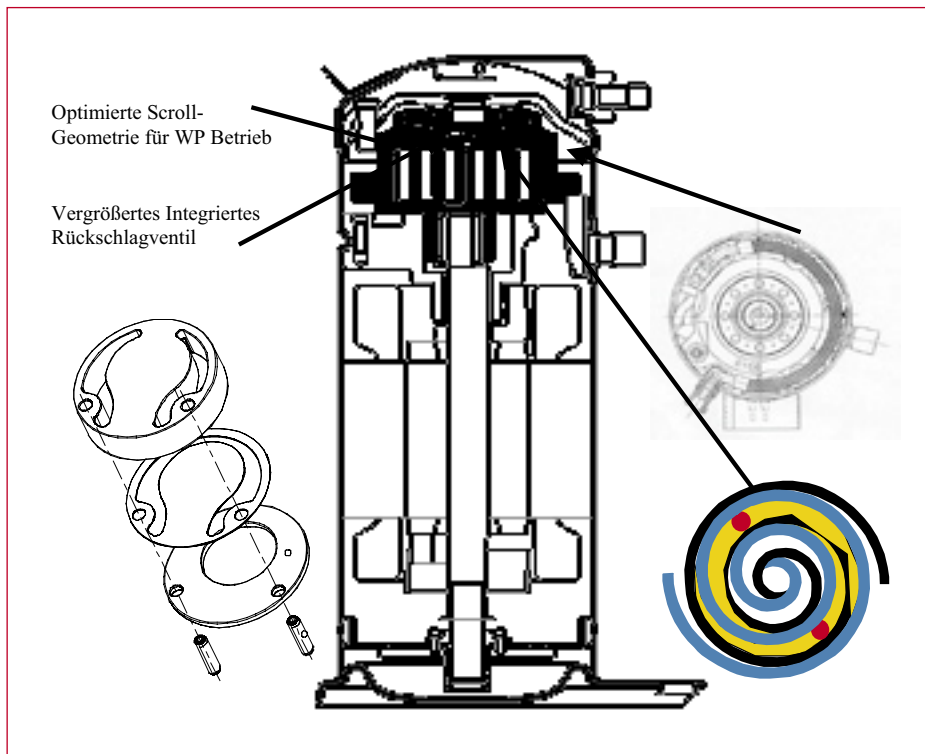


Bild 9 WP-Verdichter-Ausführung ohne Zwischeneinspritzung

Bild 10 WP-Verdichter-Ausführung mit Zwischeneinspritzung



speziellen konstruktiven Änderungen gegenüber einem Kälte-Scrollverdichter vorgenommen wurden, um einen Wärmepumpenverdichter zu erhalten. Wie der Kälte-Scroll hat auch der Wärmepumpenverdichter eine Spiral-Geometrie, die speziell für den Wärmepumpenbetrieb angepasst wird. Ebenso verfügt der Wärmepumpen-Scroll-Verdichter über ein integriertes Rückschlagventil, um die durch das fest eingebaute Volumenverhältnis bedingten Verluste gering zu halten. Wegen des im Vergleich zum Kälte-Scroll größeren Volumenstromes im Austritt ist dieses integrierte Rückschlagventil allerdings vergrößert worden, um die darin verbundenen Strömungsverluste gering zu halten. Das in Bild 9 gezeigte Modell verfügt über keine Zwischeneinspritzung und sein Anwendungsbereich entspricht dem in Bild 6 gezeigten gegenüber dem Klima-Scroll

peraturen höher, was vermutlich an den höheren Auslegungstemperaturen der Heizungsanlagen liegt. Für diese Region liegt der Punkt mit dem relativ gesehen größten Energieverbrauch bei einer Verdampfungstemperatur von ca. -7°C und einer Kondensationstemperatur von 60°C . Für beide Regionen wird deutlich, dass die Bemessungspunkte wenig repräsentativ sind für die am häufigsten vorkommenden Betriebspunkte der Heizungsanlage. Eine optimale Auslegung müsste so geschehen, dass gerade in den Punkten mit den im Jahresdurchschnitt höchsten Energieverbräuchen ein besonders hoher Gütegrad der Wärmepumpe und damit des Verdichters erreicht wird.

Konstruktionsmerkmale von Wärmepumpen-Scroll-Verdichtern

Alle Sonderentwicklungen von Scroll-Verdichtern basieren auf dem Konstruktionsprinzip des Klima-Scrolls. Parallel dazu hat sich die Konstruktion eines Kälte-Scrolls als eigene Baureihe etabliert. Die extremen Auslegungspunkte für Wärmepumpenverdichter sind durch besonders hohe Druckverhältnisse gekennzeichnet, so dass sich der Kälteverdichter als Basis für eine gesonderte Wärmepumpenverdichterbauweise anbietet. Bild 9 zeigt, welche

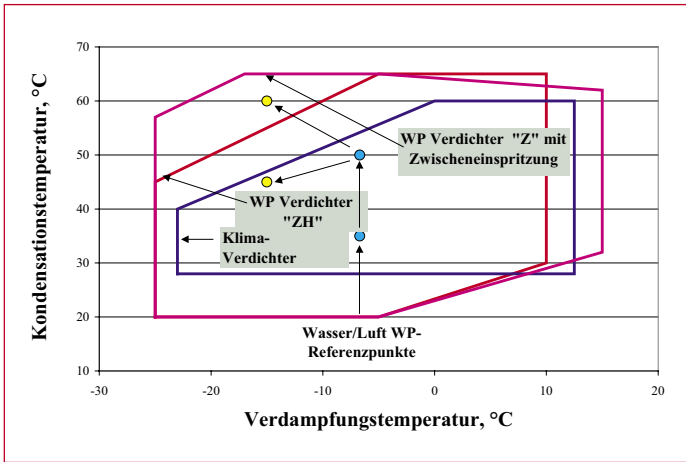


Bild 11 Vergleich der Verdichter-Anwendungsgrenzen

sanierungsmarktes erschlossen. Bestehende Anlagen, die mit noch höheren Vorlauf-temperaturen arbeiten und damit über 65°C hinausgehende Kondensationstemperaturen benötigen, stellen einen sehr kleinen Anteil des Marktes dar, so dass eine weiterreichende Entwicklung nicht gerechtfertigt ist.

Für den ökonomischen Erfolg der Wärmepumpe ist aber nicht nur das Erreichen der extremen Betriebsbedingungen erforderlich, sondern gleichermaßen wichtig ist das Erreichen hoher Gütegrade, um zu niedrigen Betriebskosten zu kommen. Bild 12 zeigt einen Vergleich der Leistungsdaten der beiden Wärmepumpentypen im Vergleich zum Standard-Klima-Verdichter ZR. Bereits beim Betriebspunkt -6,7°C/35°C, der als Referenzpunkt dient, weisen die Wärmepumpenverdichter höhere Gütegrade als der Klimaverdichter auf, aber wie bereits erwähnt, ist dieser Punkt für den eigentlichen Betrieb

vergrößerten Anwendungsbereich. Allerdings erreicht dieser Anwendungsbereich noch nicht alle erforderlichen Wärmepumpenbetriebspunkte, insbesondere nicht die für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe in der Altbausanierung. Um diese zu erreichen, ist zusätzlich eine Zwischeneinspritzung von Kältemitteldampf erforderlich, wie in Bild 10 dargestellt. Diese Dampfeinspritzung bewirkt zum einen eine Vergrößerung der Kälte- bzw. Heizleistung bei geringfügig gestiegenem Leistungsbedarf, aber zum anderen auch eine Kühlung des komprimierten Gases und damit eine Verringerung der Verdichteraustrittstemperatur. Dieses Prinzip der Zwischeneinspritzung ist identisch mit dem bei Kälte-Scrolls verwendeten Verfahren und wurde bereits in [4] eingehend beschrieben. Um diese Vorteile des erweiterten Anwendungsbereiches sowie des verbesserten COP realisieren zu können, ist natürlich ein erhöhter Anlagenbauaufwand erforderlich.

Mit den in Bild 9 und 10 beschriebenen Modifikationen stehen zwei speziell für Wärmepumpenanwendungen entwickelte Baureihen zur Verfügung, die je nach gefordertem Betriebsbereich und dem zu leistenden Bauaufwand eingesetzt werden können. In Bild 11 sind nochmals die dazu gehörigen Anwendungsgrenzen dargestellt, ebenso wie die Referenzbetriebspunkte für Wasser/Luftwärmepumpen. Zwei besonders wichtige Betriebspunkte für den praktischen Einsatz sind der maximale Auslegungspunkt für eine Luft/Wasserwärmepumpe in der Altbausanierung -15°C/60°C sowie der Betriebspunkt bei -15°C/45°C, der einen betrieblich wichtigen Anwendungspunkt in Nordeuropa darstellt. An diesem Diagramm wird deutlich, dass die Veränderung der Scroll-

Geometrie sowie das eingebaute Rückschlagventil bereits eine wesentliche Erweiterung des Anwendungsbereichs gegenüber dem Klima-Verdichter ergibt. Darüber hinaus lässt sich durch die Zwischeneinspritzung mit Kältemitteldampf

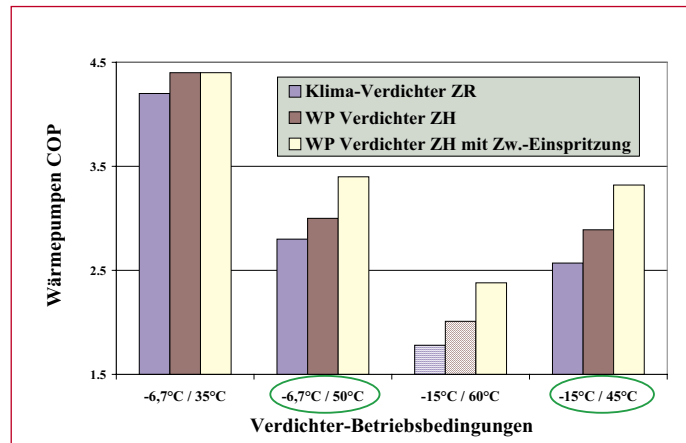


Bild 12 Leistungsdatenvergleich

eine wesentliche Erweiterung des Anwendungsbereichs bei niedrigen Verdampfungs- und hohen Kondensationstemperaturen, also bei hohen Druckverhältnissen, erzielen. Mit diesen Anwendungsgrenzen wird bereits der größte Anteil des Altbau-

nicht sehr relevant. Wesentlich wichtiger ist der Betriebspunkt -6,7°C/50°C, und hier zeigt sich bereits, dass die Zwischeneinspritzung eine deutliche Steigerung des Gütegrades gegenüber dem Wärmepumpenverdichter ohne Zwischeneinspritz-

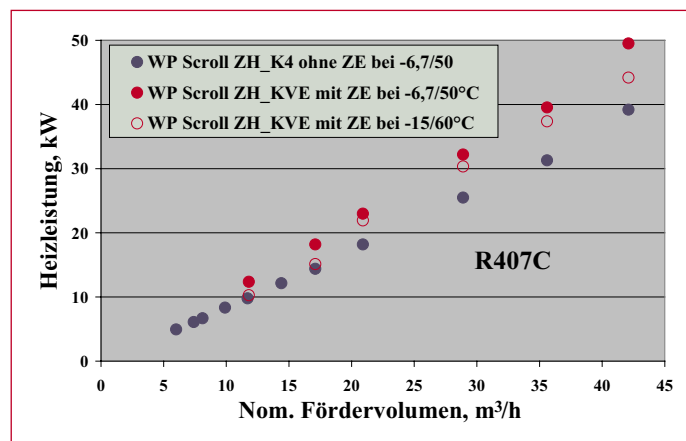


Bild 13 Produktfamilie Wärmepumpen-Scroll „ZH“

zung erreicht. Für den Extrempunkt mit $-15^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$ sind die beiden Werte für den Klimaverdichter und den Wärmepumpenverdichter ohne Zwischeneinspritzung nur schraffiert dargestellt, da beide Punkte außerhalb des zugelassenen Anwendungsbereichs liegen. Man kann jedoch zu Vergleichszwecken die Gütegrade dieser Verdichter abschätzen, und man sieht auch hier eine deutliche Gütegradsteigerung durch Zwischeneinspritzung. Wegen des besonders hohen Druckverhältnisses für diesen Betriebspunkt sind natürlich die COP-Werte die niedrigsten aller hier betrachteten vier Fälle, aber die relative Steigerung durch Dampfeinspritzung ist hier am Größten. Für den Bereich Nordeuropa ist der Betriebspunkt $-15^{\circ}\text{C}/45^{\circ}\text{C}$ der wirtschaftlich wichtigste Arbeitspunkt, da hier im jährlichen Mittel nahezu ein Drittel des gesamten Verbrauchs an elektrischer Energie stattfindet. Hier weist bereits der einfache Wärmepumpenverdichter gegenüber dem Klimaverdichter eine COP-Steigerung um 10% auf, die nochmals bei Zwischeneinspritzung um weitere 15% vergrößert werden kann. Letztendlich bleibt es einer Abwägung der mit einer Zwischeneinspritzungsanlage verbundenen Investitionskosten und den niedrigeren Betriebskosten vorbehalten, sich für eine solche Zwischeneinspritzungslösung zu entscheiden, oder einen einfacheren Wärmepumpenverdichter einzusetzen.

Mit der Verdichterbaureihe ZH steht die in Bild 13 gezeigte Produktfamilie für den Bereich zwischen 5 und ca. 40 m^3 Förder volumen zur Verfügung. Bezogen auf den Betriebspunkt $-6,7^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ lassen sich damit Heizleistungen zwischen 5 kW und 40 kW verwirklichen. Setzt man jedoch bei dieser Bedingung einen Verdichter mit Zwischeneinspritzung ein, so ergibt sich eine deutliche Steigerung der Kälteleistung, und es sind max. 50 kW zu erreichen. Im Bereich unterhalb von 10 m^3 nominellem Fördervolumen ist aus konstruktiven Gründen die Möglichkeit einer Zwischeneinspritzung nicht gegeben.

Man kann vereinfachend sagen, dass die Leistungsdaten eines Verdichters ohne Zwischeneinspritzung ZH_K4 denjenigen eines Verdichters mit Zwischeneinspritzung ZH_KVE entsprechen, bei dem jedoch die Einspritzung unterbunden bzw. nicht aktiviert ist. Insofern lassen sich die beiden Leistungsverläufe für $-6,7^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ mit bzw. ohne Zwischeneinspritzung in der Weise interpretieren, dass zwischen diesen beiden Kurven gewechselt werden kann, je nach Zu- oder Abschaltung der Zwischeneinspritzung. Es ergibt sich hieraus eine Modulationsmöglichkeit, mit der die gelieferte Heizleistung besser an den Heizleistungsbedarf angepasst werden kann. Dies ist besonders wichtig für das nicht kohärente Verhalten zwischen angebotener Heizleistung und Heizleistungsbedarf für eine Luft/Wasserwärmepumpe. □

Literatur

- [1] Öko-Institut, Darmstadt (Bearb.): GEMIS 4.0 – Globales Emissionsmodell integrierter Systeme. Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Wiesbaden (Hsg.). 2000
- [2] Kruse, H., Heidelck, R.: Heizen mit Wärmepumpen, BINE Informationsdienst, 3. Auflage, TÜV Verlag, 2002
- [3] Hoffmann, L., Beck, A., Ziegler, F.: Innovative Technologien zur Deckung des Restwärmebedarfs. Vortrag FKW-Seminar 19 in Hannover, 30. 10. 1997
- [4] Kämmer, N., Willingham, T. R.: Entwicklungsfortschritte bei Scroll-Verdichtern für Kälteanwendungen, DKV Vortrag Leipzig, 2003