



Entwicklung einer R410A - Wärmepumpe



Vellmar im Juli 2000
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Lohr

LOHRconsult GmbH - Frommershäuser Str. 109 - 34246 Vellmar - Telefon (0561) 98235-44
Telefax (0561) 98235-45 - e-mail LOHRconsult@t-online.de www.LOHRconsult.de

1 Einleitung

Das Entwicklungsziel ist, eine monoenergetische Sole-Wasser-Wärmepumpe im Leistungsbereich von 5...20 kW für den Einsatz in kleineren Gebäuden, Ein- und Mehrfamilienhäusern, auf Basis des Kältemittels R 410 A zu konzipieren und zur Marktreife zu führen. Es ist daran gedacht, eine kostengünstige und effiziente Wärmepumpe für Arbeitsbereiche bei Verdampfungstemperaturen von ca. -5°C (Wärmequellentemperaturen ca. 0°C) und Kondensationstemperaturen von max. $+40^{\circ}\text{C}$ (Heizungsvorlauftemperaturen ca. 35°C) den Herstellern und somit dem Markt und z.Vfg. zu stellen und weitere innovativen Lösungen mit dem Einsatz von R 410 A zu forcieren. Zukünftig wird nur eine kostengünstige und gleichzeitig effiziente Wärmepumpe den vorhandenen Markt erschließen können.

Für die Wärmepumpenanwendung ist das Kältemittel R410A eine sehr interessante Alternative. Es ergeben sich mit R410A im Vergleich zu R22, R407c, R134a und Propan wesentlich kleinere Baueinheiten bei gleichwertigen oder besseren Heizleistungszahlen. Einige Feldversuche mit R410A wurden bereits mit Erfolg durchgeführt. Ein Beispiel ist der Einsatz von Wärmepumpen dieser Bauart in den USA, Österreich und der Schweiz. Der vorgestellte Versuchs- und Erfahrungsbericht basiert auf Langzeituntersuchungen seit 1997. Die neuen Aggregate mit R410A haben bereits zu einer deutlichen Impulswirkung auf dem amerikanischen Markt geführt. Basierend auf diesen Erfahrungen, ist die Weiterentwicklung und Markteinführung vorzunehmen. Da bisher aber nur wenige europäische Hersteller dieses Thema intensiv verfolgen, sind weitere Entwicklungen bis zur endgültigen Marktreife notwendig.

Die Wärmepumpentechnologie ist eine Möglichkeit, Primärenergieeinsparung zu realisieren. Als Fußboden- oder Wandheizung mit maximalen Vorlauftemperaturen von 35°C wird die Wärmepumpe in bestehende Wohnhäusern und Neubauten (Niedrigenergiehäusern) verstärkt eingesetzt werden können. Insbesondere in diesem sensiblen Bereich werden die Arbeitsmedien der Wärmepumpe kontrovers diskutiert. Hier stehen die Arbeitsfluide Propan und nichtexplosive

Kältemittel wie R134a, R407c und R410A dem bisher eingesetzten R12 und R22 gegenüber.

Der Einsatz von R12 ist seit dem 30.06.1998 nicht mehr möglich, da der Verbrauch dieser Stoffe der FCKW-Verbotsverordnung unterliegt. Somit kommt R134a verstärkt in bisherigen R12-Anlagen zum Einsatz. Aber auch für R22 gibt es einen weltweiten Verbotszeitplan der in *Abbildung 1* dargestellt ist.

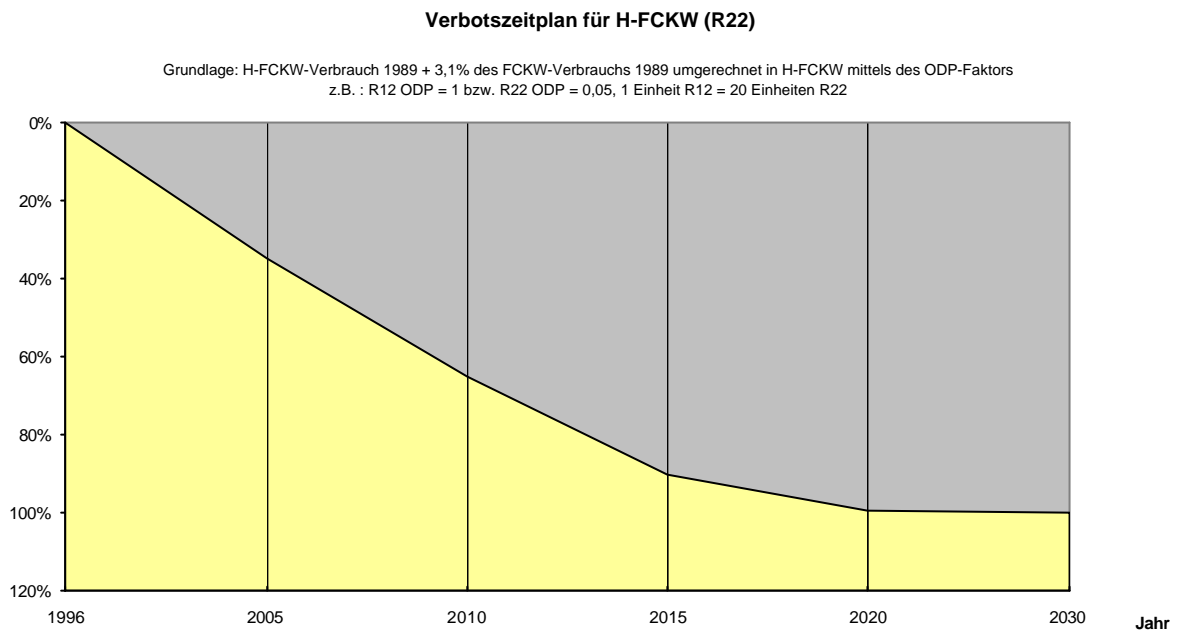


Abbildung 1 Verbotszeitplan für H-FCKW (R22)

Anmerkung: Das Montreal-Protokoll in seiner überarbeiteten Fassung der Kopenhagener Konferenz, legt für die Industrienationen eine kontinuierliche Reduzierung von Verbrauch und Produktion sämtlicher H-FCKW bis 0% im Jahre 2030 fest.

Aufgrund der Gesetzeslage in der Bundesrepublik Deutschland besteht ein Verbot von R22 in Neuanlagen zum 01. Januar 2000.

Als Auswahlkriterium für den Einsatz aller Kältemittel ist neben den Einflussparametern

- **Gefährdung des Menschen durch Kältemittelaustritt,**
- **Energetische Bewertung (Leistungszahl),**
- **Gerätekosten und Raumbedarf (Baugröße)**

zusätzlich eine „ganzheitliche“ Betrachtung des Erwärmungsanfalls (TEWI = Total Equivalent Warming Impact) erforderlich (siehe Kapitel 3)

Physikalische Daten von R 410A

Chemische Bezeichnung	[-]	Difluormethan/ Pentafluorethan
Chemische Formel	[-]	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃
CAS Nr.	[-]	75-10-5/354-33-6
Molekulargewicht	[kg/kmol]	72,6
Siedepunkt ¹	[°C]	-51,5
Kritische Temperatur	[°C]	71,8
Kritischer Druck	[bar]	48,9
Dichte der gesättigten Flüssigkeit ²	[kg/m³]	1068
Dichte des gesättigten Dampfes ²	[kg/m³]	65,183
Dampfdruck ²	[bar]	16,627
Verdampfungsenthalpie ¹	[kJ/kg]	274,5
Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit ²	[W/mK]	87,249E-3
Wärmeleitfähigkeit des Dampfes ²	[W/mK]	17,003E-3
Oberflächenspannung der Flüssigkeit ²	[N/m]	5,158E-3
Spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit ²	[kJ/kgK]	1,6895
Spezifische Wärmekapazität des Dampfes ^{1,2}	[kJ/kgK]	0,8273
Viskosität der Flüssigkeit ²	[Pas]	0,1217E-3
Explosionsgrenze in Luft ¹	[Vol.-%]	keine ³

¹ bei 1,013 bar ² bei 25°C ³ nach DIN 51649 und UL 2128

2 Vergleich von R 410A zu anderen Kältemitteln

Tabelle 1 Technische Daten unterschiedlicher Kältemittel

	R22	R407c R32/R125/R134a	R410A R32/R125	R290
Zusammensetzung [Gew. %]	100	23/25/52	50/50	100
Siedepunkt bei 1bar [°C]	-40,8	-44	-51,5	-42,1
Kritische Temperatur [°C]	96,2	86,4	71,8	96,7
Kritischer Druck [bar]	49,8	46,2	48,9	42,4
Temperatur-Glide [K]	0	5-7	0,02	0
ODP ¹ [rel. zu R12]	0,055	0	0	0
HGWP ²	0,36	0,37	0,44	0
GWP ³	1700	1600	1600	0
brennbar	nein	nein	nein	ja

Dargestellt sind die Ersatzkältemittel R410A, R407c, R22 und R290, die auch bei den weiteren Betrachtungen und Vergleichen eine Rolle spielen. Bei R410A handelt es sich um ein nahezu azetropes Kältemittel mit einer hohen Drucklage. Das Kältemittel R410A ist ein Gemisch aus:

Kältemittel	Siedepunkt [°C]	Anteile [Gew. %]
R32 (CH ₂ F ₂)	-51,7	50
R125 (CHF ₂ CF ₂)	-48,1	50
R410a	-51,5	100

Tabelle 2 Zusammensetzung von R410A

¹ Ozone Depletion Potential

² Halocarbon Global Warming Potential

³ Global Warming Potential

Es zeichnet sich gegenüber allen anderen Ersatzkältemitteln durch eine sehr hohe Energieeffizienz (volumetrische Kälteleistung) aus. Gegenüber dem Kältemittel R22 ergibt sich ein Potential der TEWI-Reduktion (TEWI = Total equivalent warming impact). Der Chloranteil bewirkt einen Ozonabbau. R410A kann durch sein nahezu azetropes Verhalten in der Praxis wie ein Einstoff-Kältemittel angewandt werden.

3 Bewertungskriterien von Kältemitteln

Bei der Bewertung sind grundsätzlich das Treibhauspotential GWP (Global Warming Potential) und das Smogpotential PCOP (Photochemical Ozone Creation Potential) qualitativ von Bedeutung. Zusätzlich sind Toxizität und Brennbarkeit weitere Bewertungskriterien.

Ersatzkandidaten für FCKW- und H-FCKW-Kältemittel haben eines gemeinsam: Ihr direkter Beitrag zur Erwärmung der Erdatmosphäre, ausgedrückt durch den GWP-Wert (Global Warming Potential), bewegt sich in derselben Größenordnung wie der GWP-Wert von H-FCKW 22. Es hat sich jedoch erwiesen, daß der GWP-Wert ein unzureichendes Maß für Grenzwerte und damit die Eignung eines Kältemittels ist, da damit ausschließlich direkte Emissionen in die Atmosphäre erfaßt werden. Der GWP-Wert berücksichtigt nicht die unterschiedliche Systemleistungsfähigkeit bei der Verwendung von Medien in energieverbrauchenden Anlagen.

Aus diesem Grund wurde ein zusammengesetzter Wert für die übergeordnete Vergleichbarkeit des Treibhauseffektes eingeführt, der TEWI-Wert.

Der TEWI-Wert

Dieser Wert wird für Systeme ermittelt, die ein GWP-Medium als Kältemittel verwenden und gleichzeitig aufgrund des Energieverbrauchs indirekt CO₂-Emissionen erzeugen.

Der TEWI-Wert errechnet sich aus der Masse der Treibhausgase, die in die Atmosphäre abgegeben werden, multipliziert mit deren GWP-Wert, zuzüglich Systemlebenszeit, multipliziert mit der jährlichen CO₂-Emission aufgrund des Energieverbrauchs. In die Berechnung kann auch ein Beitrag für die Systementsorgung eingehen.

Folgende Parameter beeinflussen die Größe des TEWI-Wertes:

- GWP-Wert,
- Füllmenge,
- COP-Niveau des Systems (Coefficient of Performance) bzw. Energieverbrauch,
- Energiequelle der Stromerzeugung und
- Zeithorizont.

Kältemittelleistung und Systemwirkungsgrad wiegen bei der Berechnung des TEWI-Wertes am schwersten.

Wortbedeutung:

TEWI = Total Equivalent Warming Impact

zu deutsch: **Globaler Treibhauseffekt**

TEWI-Wert = Addition von direkten und indirekten Einflüssen der Kältemittel zum Treibhauseffekt

direkter Einfluß = GWP (Global Warming Potential)

indirekter Einfluß = Energieverbrauch während der Lebensdauer

Zur Berechnung des TEWI wird folgende Formel zu Grunde gelegt:

$$\text{TEWI} = m_{\text{KMK}} * \text{GWP}_{\text{KMK}} * a * E_a * L_a$$

Formel 1 Berechnung des TEWI-Wertes

Hierin bedeutet:

m_{KMK} = Masse Kältemittelkreis [kg]

E_a = jährlicher Energiebedarf [kWh/a]

a = Umrechnungsfaktor [kg CO₂/kWh]*
(für die Arbeit der eingesetzten Energie)

L_a = erwartete Lebensdauer [a]

GWP_{KMK} = Werte für den Zeithorizont der eingesetzten Kältemittel

Jahre	R 123	R134	R22	R11	R12	R 407c	R 290	R 410A
	a							
20	310	3200	4100	4500	7100	-	0	-
100	85	1200	1500	3500	7300	1600	0	1890
500	29	420	510	1500	4500	-	0	-
atm. Lebensd.	1,6	16	15	60	130			

Tabelle 3 GWP*-Werte für unterschiedliche Zeithorizonte von Kältemitteln

*Wert bezogen auf CO₂ (0,55 kg CO₂/kWh)

Die folgende Berechnung zeigt die maßgeblichen Kriterien der Bewertung von Kältemitteln:

3.1 TEWI - Berechnungsbeispiel für R 22 im Vergleich zu R 410A

Tabelle 4 Wärmepumpenanlage mit Scroll-Verdichter ($Q_H = 6,00$ kW)

	R22	R12	R134a	R 410A	R 290
Wärmequelle S [°C]	0	0	0	0	0
Heizwasser W [°C]	+35	+35	+35	+35	+35
Kältemittelfüllung**[kg]	2,5	3,0	3,0	1,12	0,9
Leistungsaufnahme [kW]*	1,95	2,30	2,35	1,65	1,80
Vollaststunden [h/a]	1600	1600	1600	1600	1600
Lebensdauer [a]	15	15	15	15	15

*einschl. Hilfsenergie ** Abweichungen je nach Konstruktion möglich

Daraus ergibt sich folgendes Ergebnis:

R 22 (Zeithorizont GWP 100) => GWP = 1500
direktes Potential 3.750 kg
indirektes Potential 25.740 kg
Globaler Treibhauseffekt 29.490 kg

R 12 (Zeithorizont GWP 100) => GWP = 7300
direktes Potential 21.900 kg
indirektes Potential 30.360 kg
Globaler Treibhauseffekt 52.260 kg

R 134a (Zeithorizont GWP 100) => GWP = 1200
direktes Potential 3.600 kg
indirektes Potential 31.020 kg
Globaler Treibhauseffekt 34.620 kg

R 410A (Zeithorizont GWP 100) => GWP = 1890
direktes Potential 2.100 kg
indirektes Potential 21.780 kg
Globaler Treibhauseffekt 23.880 kg

R 290 (Zeithorizont GWP 100) => GWP = 0
direktes Potential 0 kg
indirektes Potential 23.760 kg
Globaler Treibhauseffekt 23.760 kg

Gegenüberstellung des direkten / indirekten Treibhauspotentials

bezogen auf eine Wärmepumpenheizleistung von 6,0 kW (S0/W35)

TEWI

kg CO₂

	R22	R407c	R134a	R410A	R290
indirektes Potential	25740	24420	31020	21780	23760
direktes Potential	4000	4860	3600	2160	

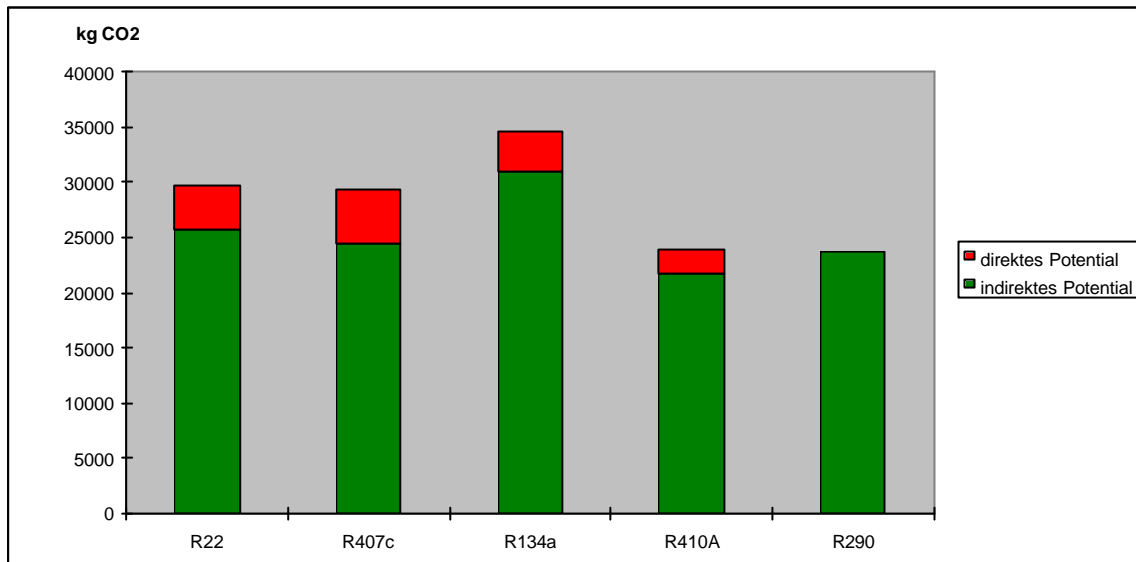


Abbildung 2 TEWI-Werte der Kältemittel

Das Berechnungsbeispiel zeigt, daß sowohl R 290 als auch R 410A den günstigsten TEWI-Wert haben und die Absolutwerte beider Kältemittel nahezu identisch sind. Bei R 410A ergibt sich ein geringes direktes Potential von 2100 kg CO₂, wobei das indirekte Potential von 21780 kg CO₂ das niedrigste aller in der Gegenüberstellung beinhalteter Kältemittel ist.

4 Einsetzbarkeit von Retrofit-Ersatzstoffen für R22

Bei Betrachtung der Dampfdruckkurven der Kältemittel, ergeben sich grundsätzlich für R22-Ersatzstoffe nur zwei Möglichkeiten: Die Dampfdruckkurve wird nachgebildet durch Mischungen aus R32, R125 und R134a oder der Ersatzstoff ist brennbar wie z. B.: Propan, R290. In *Abbildung 2* ist die Dampfdruckkurve von allen langfristig als R22-Ersatz in Frage kommenden Kältemitteln dargestellt.

Das nahezu azeotrope Kältemittel R410A fällt durch seine deutlich höhere Drucklage auf. Im folgenden Abschnitt wird auf R410A eingegangen und am Beispiel der Wärmepumpenanwendung gezeigt, daß eine höhere Kälteleistung im Vergleich zu R22, R407c und auch zu Propan erreicht wird. Der Einsatz von R410A führt hier auf erheblich kleinere Baugrößen und zu geringeren Kosten als bei R22, R407c und R290 (Propan). Das Kältemittel R410A kann jedoch aufgrund der hohen Drucklage nicht als Retrofit-Kältemittel für R22 eingesetzt werden. Das Zeotrope Kältemittel R407c, bestehend aus den Komponenten R32, R125 und R134a ist entwickelt worden, um die Dampfdruckkurve von R22 wiederzugeben. Dies ist einerseits gelungen - wie *Abbildung 2* zeigt-, andererseits ist damit ein stark zeotropes Verhalten vorhanden. Der Temperatur-Glide beträgt ca. 6 K. Die beim Einsatz von zeotropen Kältemitteln entstehende Problematik ist insbesondere für den Service-Fall gegeben. Grundsätzlich führt das zeotrope Verhalten zu zahlreichen Nachteilen: schlechter Wärmeübergang, Entmischung bei Leckagen und im Servicefall, Separation im Kältemittelkreislauf etc. Das zeotrope Kältemittel R407c eignet sich nur in Sonderfällen als direkter Retrofit-Ersatzstoff für R22, wenn die gleichen Randparameter und Leistungsdaten erreicht werden sollen.

Die zweite grundsätzliche Möglichkeit ist der Einsatz von R290 (Propan). Die dann erforderliche Sicherheitstechnik führt in der Regel zu höheren Kosten, der Einsatz

der indirekten Kühlung mit Kälte­träger ist energetisch nachteilig und kostenintensiv und darüber hinaus bei Altanlagen nicht anwendbar.

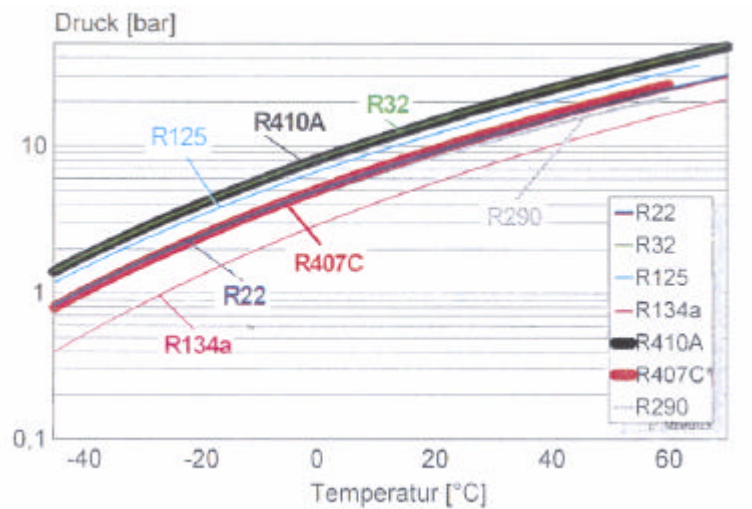


Abbildung 3 Dampfdruckkurven unterschiedlicher Kältemittel

5 Wärmepumpenanwendungen mit R 410A

In Österreich und vor allem der Schweiz werden verstärkt Erdreich-Wärmepumpen eingesetzt, die nach dem Prinzip der Direktexpansion arbeiten. Hierbei wird das Kältemittel im Boden, in speziellen kunststoffummantelten Rohren expandiert und nimmt somit ohne zusätzlichen Wärmeübergang (Reduzierung um einen Wirkungsgrad) die Wärme aus dem Boden auf. Diese Technologie ist mit einem erheblichen Marktanteil verbreitet und ermöglicht optimale Jahresarbeitszahlen. In Deutschland hat sich diese Technologie nicht durchgesetzt. Neben dieser vorgenannten Technologie setzt sich die Wärmenutzung aus dem Erdreich mittels vertikaler Erdwärmesonden zunehmend mehr und mehr durch.

Um jedoch auch die Wärmequelle Luft zu erschließen, die in allen Bereichen unbegrenzt z. Vfg. steht, ist es notwendig, geeignete Verdampfer- und Abtausysteme zu entwickeln um einen problemlosen Betrieb zu gewährleisten, da nur so dieser interessante Marktbereich erschlossen werden kann. Für

monovalente bzw. monoenergetische Luft-Wasser- und Luft-Luft-Wärmepumpen besteht ein vergleichsweise hoher Bedarf für deren Einsatz.

5.1 Vergleichsrechnung für R22, R407c, R410A und Propan (R290)

Anhand von Vergleichsrechnungen für den Anwendungsfall der Wärmepumpen wird zunächst theoretisch dargestellt, welche Unterschiede bei Verwendung der Kältemittel R22, R290, R407c, R134a und R410A aufgrund der thermophysikalischen Stoffdaten zu erwarten sind. Als Vergleichsparameter werden die Heizleistungszahl ϵ_H und die volumetrische Kälteleistung q_{oV} herangezogen.

$$\text{Heizleistungszahl } \epsilon_H = Q_C/P_V$$

$$\text{volumetrische Kälteleistung } q_{oV} = Q_0/V_{VL}$$

Die Kälteleistung für den Vergleich wurde mit 5,0 kW angenommen, was der Leistung eines Einfamilienhauses entspricht. Die für den monovalenten Wärmepumpenbetrieb relativ hohe Verdampfungstemperatur von $t_0 = -5^\circ\text{C}$ kann insbesondere im Winterbetrieb durch die Direktexpansion im Erdreich oder auch Sole-Wasser-Wärmepumpen aufrecht erhalten werden. Die Überhitzung beträgt $\Delta t_0 = 7\text{K}$. als Wärmesenke kommen Niedrigtemperaturheizflächen mit einer maximalen Vorlauftemperatur von $t_{H,Vorl.} = +35^\circ\text{C}$ zum Einsatz, hier läßt sich eine Verflüssigungstemperatur von $+40^\circ\text{C}$ und niedriger bei einer Unterkühlung von $\Delta t_U = 5\text{K}$ realisieren. Bei optimierten Plattenwärmetauschern ergeben sich Temperaturdifferenzen von ca. 2 K, was durch Messungen an Anlagen bestätigt werden kann.

In *Abbildung 4* ist das Ergebnis dieser Vergleichsrechnung dargestellt. Hierbei ist zu beachten, daß die Füllmengen von ca. 5-6 kg -je nach Anlage und

Seite -13- zum Bericht vom 09.01.2005 -R410A Wärmepumpenentwicklung-

Direktexpansion im Erdreich- liegen. Durch die hohen Füllmengen von ca. 5-6 kg bei Einsatz von R290 (Propan) ist eine Außenaufstellung mit entsprechender wetterfester Einhausung aus Sicherheitsgründen erforderlich. Bei Sole-Wasser-Anlagen ergeben sich kleinere Füllmengen in der Größenordnung von 1-2 kg. Aus diesen theoretischen Vergleichsrechnungen wird deutlich, dass die Leistungszahlen der betrachteten Kältemittel nur geringfügig abweichen. Auch die Heizleistung ist nahezu identisch. Ein wesentlicher Unterschied lässt sich jedoch bei der „Stoffgröße: volumetrische Kälteleistung“ erkennen. Während R290 (Propan) eine um 14 % und R407c eine um 9 % schlechtere volumetrische Kälteleistung aufweisen, ergibt sich für R410A eine Verbesserung um 48 % gegenüber R22 (Ansatz 100%).

Diese signifikante Erhöhung der volumetrischen Kälteleistung führt zu deutlich kleineren Maschinen und Komponenten. Im nachfolgenden wird auf die Auswirkungen in der Praxis eingegangen, da sich hier interessanten Konstruktionsmöglichkeiten ergeben.

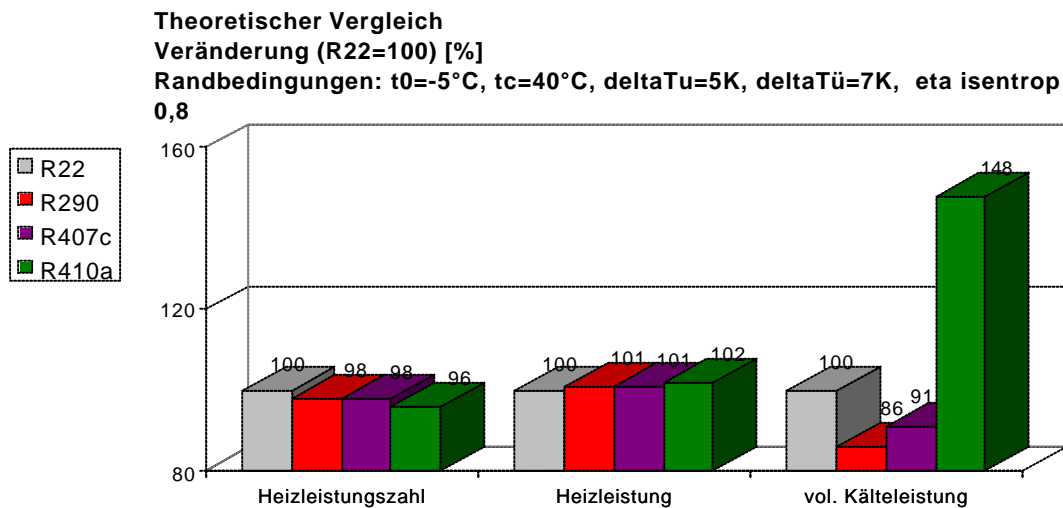


Abbildung 4 theoretischer Vergleich thermodynamischer Eigenschaften von Kältemitteln

5.2 Feldversuche mit R410A in Wärmepumpen

Es werden nun die Ergebnisse von Messungen beschrieben, die an Wärmepumpe im Feldtest ermittelt wurden. Die eingesetzten Wärmepumpen

entsprachen im wesentlichen schon den Anforderungen an Serienaggregate. Für den beschriebenen Anwendungsfall ist in *Abbildung* die gemessene Heizleistungszahl R22, R290 (Propan) und R410A aufgetragen. Die Heizleistung für die drei Kältemittel und zusätzlich für R407c ist ebenfalls dargestellt. Hierbei wurden die baugleichen Komponenten wie Verdichter, Verdampfer und Verflüssiger verwendet um einen vergleichbaren Versuchsaufbau zu gewährleisten.

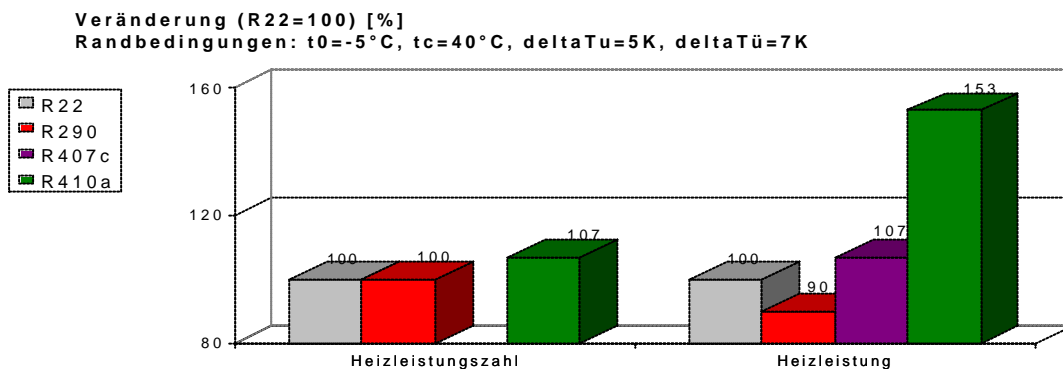


Abbildung 5 Praxisvergleich thermodynamischer Eigenschaften von Kältemitteln

Aus diesen Messungen wird deutlich, daß sowohl die Heizleistungszahl als auch die Heizleistung höhere Werte mit R410A aufweisen als mit den Kältemitteln R22, R290 und R407c. Die erhebliche Erhöhung der Heizleistung um 53 % läßt sich direkt auf die in *Abbildung 5* dargestellte volumetrische Kälteleistung beziehen. Im Gegensatz zur theoretischen Berechnung wurden auch höhere Heizleistungszahlen gemessen, die sich u. a. auf den sehr guten Wärmeübergang innerhalb der Wärmetauscher, Verdampfer und Kondensatoren, von R410A im Vergleich zu den anderen Kältemitteln zurückführen lassen.

Mit Scroll-Verdichtern ausgestattete Maschinen wurden vermessen. Die Messungen, die über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden, ergaben die in *Abbildung 6* dargestellten Jahresarbeitszahlen von 4,5 für R410A und 4,1 für R22. Bei R410A-Serienwärmepumpen wurden mittlererweile bei dem Betrieb mit

Erdwärmesondenanlagen (indirekte Nutzung) Jahresarbeitszahlen von 4,6...4,8 (Basis B0/W35 im Auslegungspunkt) gemessen.

Für Propan und R407c wurden aufgrund der relativ geringen Erfolgsaussichten keine Langzeittests realisiert.

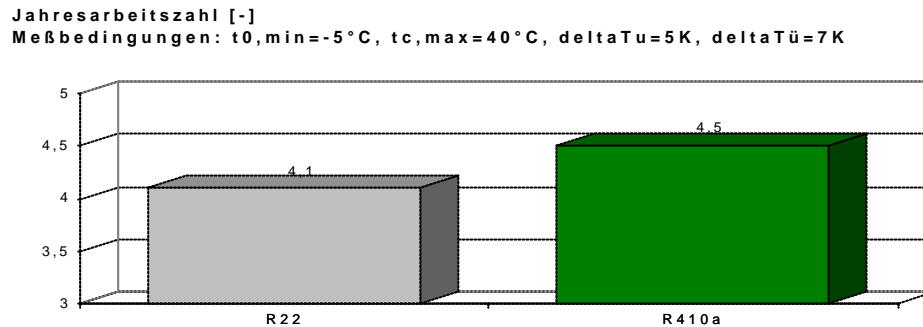


Abbildung 6 Jahresarbeitszahlen von Kältemittel R22 und R410a

6 Qualitativer Vergleich von Primärenergie und Anschaffungskosten

Die beschriebene und bereits realisierte Anwendung von R410A als Ersatzstoff in Wärmepumpen ermöglicht eine z.T. deutliche Kostenreduzierung gegenüber R22. Auch gegenüber R407c, das aufgrund der „nur“ gleichen Leistungsdaten für diese Anwendung ausscheidet, ergibt sich mit R410A eine Verkleinerung der Einzelkomponenten und insbesondere des Verdichters und der Wärmetauscher (Verdampfer, Kondensator). Die Konstruktion auf den Einsatz von Propan auszulegen, bedeutet einen deutlich höheren Kostenanteil im Vergleich zu R22, bei ebenfalls in etwa gleichen Leistungsdaten. Mit Propan (unter der Voraussetzung von Direktverdampfung im Erdreich) ist eine zusätzliche Einhausung und eine Außenaufstellung erforderlich, da die Füllmengen die für Innenaufstellung tolerierbare Menge bei weitem übersteigt. Bei Außenaufstellung ist in jedem Fall eine entsprechende Frostschutteinrichtung, d.h. eine Ölwannenheizung erforderlich, die im Stillstand das Öl kontinuierlich auf

Seite -16- zum Bericht vom 09.01.2005

-R410A Wärmepumpenentwicklung-

Betriebstemperatur hält. Diese Einrichtung empfiehlt sich auch bei Innenaufstellung, ist dann jedoch nur zur Ölerwärmung von Raumtemperatur, d.h. ca. 10-15 °C im Heizungsraum, auf Betriebstemperatur des Öls von ca. 40 °C nach längerem Stillstand erforderlich. Bei Außenaufstellung sind im Winter aufgrund der Außentemperatur erheblich tiefere Öltemperaturen möglich, was eine zusätzliche Bereitstellung von Primärenergie in Form von elektrischer Energie bedeutet. Aber auch bei Kompaktanlagen mit weitaus geringeren Kältemittelfüllungen (ohne Direktexpansion im Erdreich) ergeben sich für R 410A-Anlagen erhebliche Kosteneinsparungen gegenüber den anderen Systemen, da die Dimensionierung der Bauteile aufgrund der Drucklage und der besseren Wärmeübergangswerte zu kleineren Einheiten führt.

Bei weiteren Tests von R 410A konnte im Gegensatz zu R22 ein um bis zu zwei Baugrößen kleinerer Verdichter verwendet werden. Hierdurch sind Kosteneinsparungen von 20 bis 30 % realisierbar. Die ermittelte Jahresarbeitszahl lag trotz dieser Veränderungen noch über der von R22. Der Einsatz von Propan (R290) fällt aufgrund der nicht verbesserten Heizleistungszahl und dem zusätzlichen Primärenergieaufwand durch die Ölwannenheizung stark hinter dem Arbeitsfluid R410A zurück. Durch die verbesserte Jahresarbeitszahl, hervorgerufen durch die höhere Heizleistungszahl, ergibt sich ein mindestens gleichwertiger TEWI-Wert für R410A im Vergleich zu R22 und R290 (Propan), wobei die Anteile des direkten/indirekten Potentials variieren.

7 Prototyp einer R410A-Serienwärmepumpe

In den nunmehr weiteren Phasen der Entwicklung wurde eine Optimierung der Anlagenkomponenten durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit dem amerikanischen Verdichterhersteller Copeland zeigt sich in allen Bereichen als sehr interessant, da die Erfahrungen aus dem Einsatz des Kältemittels R410A aus

den USA Berücksichtigung finden konnten. Die Beschaffung der Einzelkomponenten, insbesondere der Wärmetauscher, ausgelegt auf einen Betriebsdruck von 40 bar zeigt sich jedoch als äußerst schwierig. Hier wurden für die ersten Testphasen spezielle Wärmetauscher vom Fabrikat GEA Ecoflex eingesetzt.

Bisher bietet der europäische Markt wenige Komponenten, die für den Einsatz von R410A entwickelt wurden. Es ist jedoch zu erkennen, daß R410A in vielen Unternehmen auf reges Interesse stößt.

Bei der Entwicklung einer 5...6 kW-(Heizleistung) Wärmepumpe durch unser Institut ist eine Sole-Wasser-Variante in Kompaktbauweise das Ziel der Arbeiten. Ausgestattet mit einem Scroll-Verdichter und gelöteten Edelstahl-Plattenwärmetauschern, ist eine robuste und kostengünstige Anlagenkonzeption möglich. Weiterhin ist daran gedacht, eine Baureihe von 5...20 kW zu realisieren.

8 Scrollverdichter im Einsatz bei R410A Wärmepumpen

Zum Einsatz bei den Klein-Wärmepumpen auf R410A-Basis kommen ausschließlich Scroll-Verdichter. Der Scroll ist ein einfaches Verdichtungsprinzip, das 1905 erstmalig patentiert wurde. Ein Scroll ist eine Evolventenspirale, die bei Paarung mit einer dazu passenden Scrollform zwischen den beiden Elementen eine Reihe sichelförmiger Gastaschen bildet.

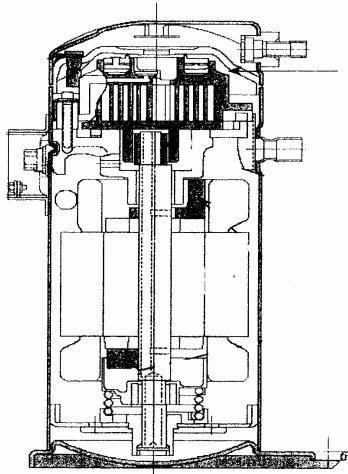


Abbildung 7 Scroll-Verdichter

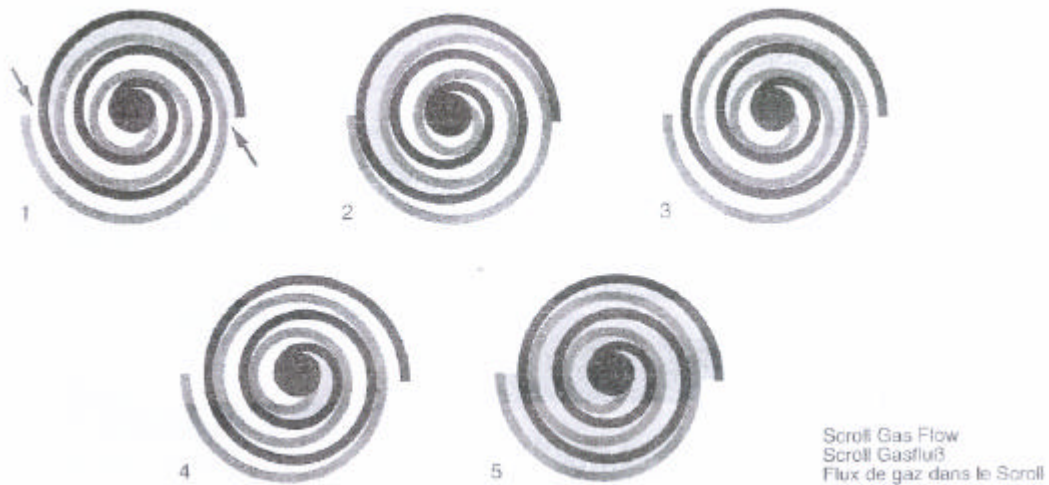


Abbildung 8 Scroll-Prinzip

Bei dem Verdichten bleibt der eine Scroll stationär (fester Scroll), während man die andere Form (den umlaufenden Scroll) die erste Form umkreisen (aber nicht rotieren) läßt. Im Verlauf dieser Bewegung werden die Gastaschen zwischen den beiden Formen langsam zum Mittelpunkt der beiden Scrolls verschoben, wobei zugleich ihr Volumen abnimmt. Wenn die Tasche den Mittelpunkt der Scrollformen erreicht, wird das nunmehr unter hohem Druck stehende Gas durch einen dort angeordneten Auslaß abgeleitet. Da gleichzeitig mehrere Gastaschen verdichtet werden, ergibt sich ein sehr gleichmäßiger Prozeß. Sowohl der Ansaugvorgang

(am Außenteil der Scrollelemente) als auch der Ausströmungsvorgang (am Innenteil) ist nahezu kontinuierlich.

1. Die Verdichtung entsteht durch das Zusammenwirken einer umlaufenden Spirale und einer stationären Spirale. Während die eine Spirale umläuft, tritt in die Öffnung am Außenrand Gas ein.
2. Die Einströmöffnungen schließen sich, während das Gas in die Spirale hineingezogen wird.
3. Während die Spirale weiter umläuft, wird das Gas in zwei immer kleiner werdenden Taschen verdichtet.
4. Wenn das Gas schließlich zu der in der Mitte gelegenen Öffnung gelangt, hat es den Förderdruck erreicht.
5. Tatsächlich befinden sich im Betrieb alle sechs Gastaschen in verschiedenen Verdichtungsstadien, daher sind der Ansaug- und Auslaßvorgang nahezu kontinuierlich.

Die günstigen Standzeiten der Scroll-Verdichter basieren auf deren Fähigkeit, flüssiges Kältemittel beim Anlauf zu beherrschen; ein Flüssigkeitsabscheider ist unter normalen Betriebszuständen nicht erforderlich.

Scroll-Verdichter besitzen einen sehr hohen Liefergrad, ihr Volumenstrom ist gegenüber vergleichbaren Kolbenverdichtern niedriger. Durch den kontinuierlichen Gasfluß ergeben sich relativ geringe Pulsationen, was den Einsatz von Pulsationsdämpfern überflüssig macht.

Neben Copeland wird die Entwicklung von GEA Ecoflex, Cetetherm und SOLVAY unterstützt.



Abbildung 9 Prototyp R410A térmica

9 Plattenverdampfer, Kältemittelverteiler und Expansionsventil im Einsatz bei R410A Wärmepumpen

Der Plattenverdampfer besteht aus einer Mehrzahl paralleler Kanäle, auf die das zweiphasige Kältemittel, das dem Verdampfer vom Expansionsventil zugeführt wird, gleichmäßig verteilt werden muß. Untersuchungen führten zu einer Systemlösung, die den gesamten Regelkreis Expansionsventil / Kältemittelverteiler / Plattenverdampfer beinhaltet.

Plattenwärmeaustauscher als Verdampfer in einer Kälteanlage

Bei der Auswahl von Verdampfern zur Kühlung der o. g. Medien gewinnt der Plattenwärmeaustauscher zunehmend an Bedeutung. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- hermetische Bauweise zur Vermeidung von Kältemittelverlusten,
- kompakte Bauweise zur Minimierung des Platzbedarfes,
- hohe Wärmeübertragungsleistung,
- geringes kältemittelseitiges Volumen zur Reduzierung der Kältemittelfüllmenge,
- geringe Druckdifferenzen auf der Wärmeträgerseite (wasserseitig) des Verdampfers zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Betriebsweise,
- günstiges Preis-/Leistungsverhältnis.

Sehr häufig ist der Verdampfer einer Kälteanlage das Bauteil, welches die Effizienz der gesamten Anlage bestimmt. Aus diesem Grund kann eine zufriedenstellende Betriebsweise nur durch richtige Auswahl der passenden Verdampferbauart und -größe erreicht werden. Wird in einer Kälteanlage die Verdampfungstemperatur z. B. nur um 1 bzw. 2 K angehoben, so verbessert sich die Leistungszahl (COP) je nach Betriebsbedingungen zwischen 2 und 7%. Dieses Beispiel zeigt deutlich den Einfluß der Verdampfungstemperatur auf die Effizienz der gesamten Kälteanlage.

Aufgrund eines Temperaturgefälles vom Wärmeträger zur Temperatur des verdampfenden Kältemittels wird das Kältemittel vollständig verdampft und zusätzlich geringfügig überhitzt, d. h. am Austritt des Verdampfers befinden sich keine Flüssigkeitstropfen mehr im Kältemittel.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kältemittelüberhitzung arbeitet der Verdampfer nach dem Gegenstromprinzip.

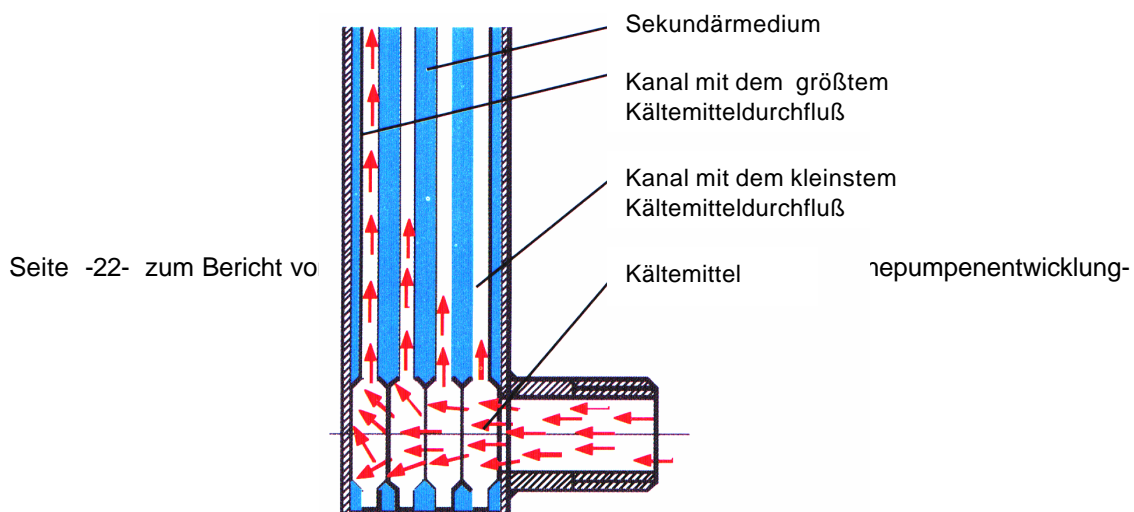


Abbildung 10 Darstellung der Kältemittelverteilung auf die einzelnen Kanäle bei Plattenverdampfern mit kleiner Plattenanzahl ohne Kältemittelverteiler

Funktionsprinzip eines thermostatischen Expansionsventils

Thermostatische Expansionsventile haben zur Aufgabe, die Überhitzung des Kältemittels am Verdampferaustritt zu regeln. Dazu wird vom Expansionsventil die Temperatur und der Druck des Kältemittels am Verdampferausgang (Expansionsventil mit äußerem Druckausgleich) ermittelt. Aus diesen Meßgrößen resultiert eine Stellgröße für den freien Öffnungsquerschnitt des Expansionsventils.

Eine ansteigende Kältemittelüberhitzung am Verdampferausgang hat einen zunehmenden Kältemitteldurchfluß zur Folge, eine kleinere Überhitzung verursacht einen reduzierten Kältemitteldurchfluß. Somit wird dem Verdampfer immer nur so viel Kältemittel zugeführt, wie auch verdampft werden kann. Um seiner Aufgabe gerecht zu werden, benötigt das Expansionsventil ein stabiles Temperatursignal (siehe MSS) am Kältemittelaustritt des Verdampfers.

In Verbindung mit Plattenverdampfern und Kältemittelverteilern ist zu beachten, daß nur thermostatische Expansionsventile mit äußerem Druckausgleich eingesetzt werden dürfen. Äußerer Druckausgleich bedeutet, daß der Druck des Kältemittels nach dem Verdampfer gemessen wird. Expansionsventile mit innerem Druckausgleich arbeiten mit dem Kältemitteldruck am Verdampfereintritt.

Kältemittelverteilung in einem Plattenverdampfer

Zur optimalen Verdampferleistung ist eine gleichmäßige Kältemittelverteilung auf die vorhandenen Kanäle notwendig. Abb. 10 und 11 zeigen die Problematik der Kältemittelverteilung bei unterschiedlichen Bautiefen der Plattenverdampfer. Dem Plattenverdampfer wird das Kältemittel vom Expansionsventil kommend als Gemisch aus Flüssigkeits- und Dampfanteilen mit relativ hoher Geschwindigkeit zugeführt. Bei Plattenverdampfern mit kleiner Plattenanzahl (Abb. 10) erfolgt,

bedingt durch die hohe kinetische Energie der Flüssigkeitsanteile, eine Überversorgung des letzten Kanals mit flüssigem Kältemittel. Bei Plattenverdampfern mit großer Plattenanzahl (Abb. 11) wird der als Freistrahle eintretende Kältemittelmassenstrom an den scharfkantigen Stegen der einzelnen Platten abgeschält. Eine Überversorgung mit Kältemittel tritt nach ca. 20 bis 30 Platten auf. Insbesondere ist ein Transport des flüssigen Kältemittels zu den hinteren Kanälen nicht gewährleistet. Der Kanal mit dem größten Kältemitteldurchfluß bestimmt das Regelverhalten des Expansionsventils, d. h. nur dieser Kanal wird thermostatisch geregelt. Die restlichen Kanäle sind aufgrund einer zu geringen Kältemittelmenge leistungsmäßig nicht voll ausgenutzt.

Nur durch Einsatz eines speziellen Kältemittelverteilers kann eine gleichmäßige Beaufschlagung der vorhandenen Kanäle erreicht werden, so daß die maximal mögliche Kälteleistung zur Verfügung steht.

Der zweistufige Kältemittelverteiler ist so konstruiert, daß das Kältemittel durch ein Sintermetall in den Verdampfer gelangt. Die Porengröße des Sintermetalls ist größer als die Filtereinheit herkömmlicher Filtertrockner gewählt. Ein Verstopfen ist somit ausgeschlossen. Die Aufgabe des Sintermetalls besteht darin, die hohe kinetische Energie in Einstromrichtung zu vermindern. Im Verteilerrohr selbst (Abb. 12) erfolgt eine weitgehende Trennung in Dampf- und Flüssigkeitsphase. Je eine Bohrungsreihe für die Gas- und die Flüssigphase verteilt das Kältemittel auf die einzelnen parallelen Kanäle. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß die besten Ergebnisse bei separaten Drosselbohrungen für den Flüssig- und Dampfanteil erzielt werden. Es ergeben sich je nach Applikation in der Regel kleine Bohrungen. Da der Kältemittelverteiler erst im Anschluß an den Lötvorgang eingesetzt wird, besteht nicht die Gefahr, daß sich die Bohrungen durch Kapillarkwirkung mit Lot zusetzen. Durch die Wahl eines glatten Verteilerrohres ist es problemlos möglich, auch Plattenverdampfer mit großer Plattenanzahl gleichmäßig mit Kältemittel zu versorgen.

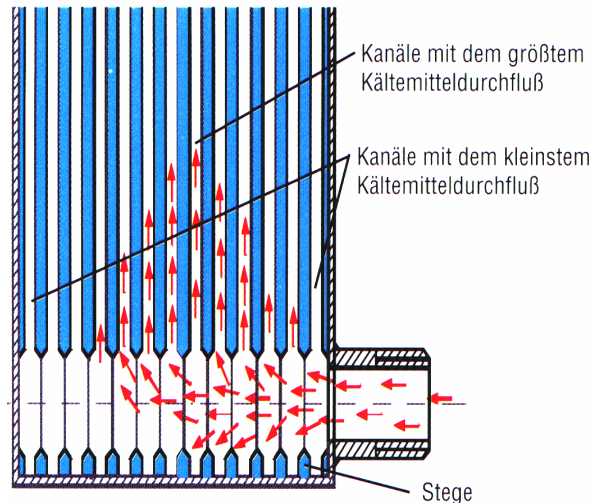


Abbildung 11 Darstellung der Kältemittelverteilung auf die einzelnen Kanäle bei Plattenverdampfern mit großer Plattenanzahl ohne Kältemittelverteiler

Ein Abschälen des Freistrahls oder eine Überversorgung des letzten Kältemittelkanals werden durch diese zweistufige Verteilung ausgeschlossen.

Dadurch kann der Verdampfer mit einer geringeren Überhitzung stabil betrieben werden (siehe MSS). Die Folgen sind eine höhere Kälteleistung und ein stabileres Regelverhalten des gesamten Verdampfersystems.

Einfluß des Kältemittelverteilers auf die MSS - Kennlinie des Plattenverdampfers

Werden Verdampfer mit geringen Überhitzungen betrieben, besteht die Gefahr eines instabilen Überhitzungssignales. Sobald die Kältemittelüberhitzung vergrößert wird, stellt sich wieder eine stabile Überhitzung ein. Der Punkt, wo sich die Überhitzung vom stabilen zum instabilen Zustand ändert wird allgemein als Minimal Stabiles Signal (MSS) bezeichnet.

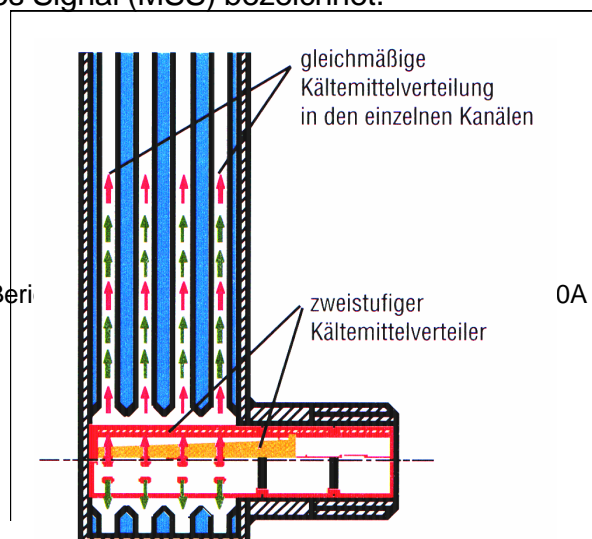


Abbildung 12 Zweistufiger Kältemittelverteiler für Plattenverdampfer

Mit einer Änderung der Anlagenbedingungen, z. B. der Kälteleistung, ändert sich auch der MSS-Punkt. Die MSS-Linie von Plattenverdampfern befindet sich auf einem relativ hohen Überhitzungsniveau, falls keine besonderen Maßnahmen zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Kältemittelverteilung getroffen werden.

Ein von Cetetherm entwickeltes Kältemittelverteilsystem ermöglicht den Betrieb des Verdampfers mit geringer Überhitzung bei stabilem Betrieb. Die Absenkung der minimal erforderlichen Überhitzung ist auf eine gleichmäßige Überhitzung in den einzelnen Kältemittelkanälen zurückzuführen.

In Abb. 13 sind in beispielhafter Form die MSS-Kennlinien eines Verdampfers mit und ohne Kältemittelverteiler dargestellt.

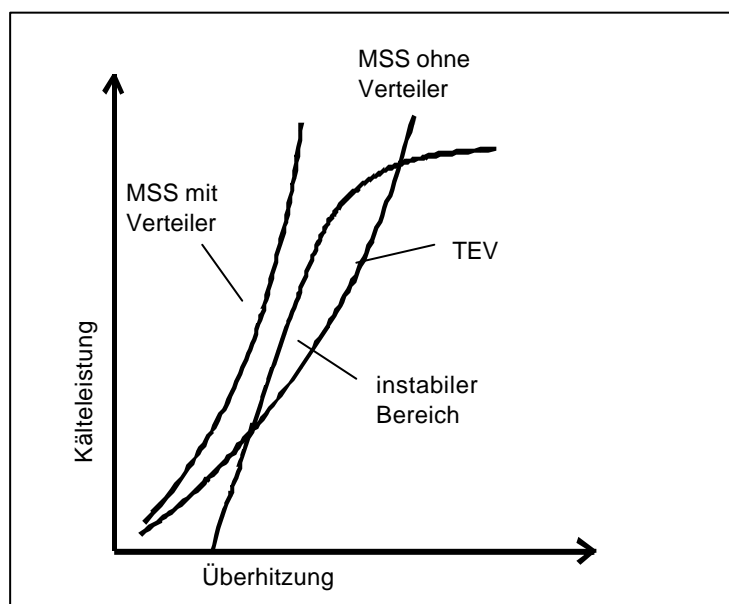


Abbildung 13 MSS-Kennlinie eines Plattenverdampfers mit und ohne Kältemittelverteiler

Überhitzungsregelung eines Plattenverdampfers mit einem thermostatischen Expansionsventil

Umfangreiche Untersuchungen am Regelkreis „Expansionsventil/Kältemittelverteiler/Plattenverdampfer“ haben gezeigt, daß das Zeitverhalten der gewählten Thermofüllung des Expansionsventils einen entscheidenden Einfluß auf die Regelgüte hat.

In Verdampfern kleinerer Leistung werden aus diesem Grund Expansionsventile mit den Kombi-Adsorberfüllungen eingesetzt, die in ihrem Zeitverhalten angepaßt sind. Im Bereich großer Leistung werden Ventile mit gedämpften Gasfüllungen eingesetzt. Bei der Auslegung der Expansionsventile muß der Strömungsdruckverlust des Kältemittelverteilers berücksichtigt werden. Die Betriebsbedingung des Verdampfers, das Kältemittel und der Druckverlust des Verteilers bestimmen die Auswahl der Expansionsventile. Bei Einsatz eines Kältemittelverteilers müssen grundsätzlich Expansionsventile mit äußerem Druckausgleich (Abb. 14) eingesetzt werden.

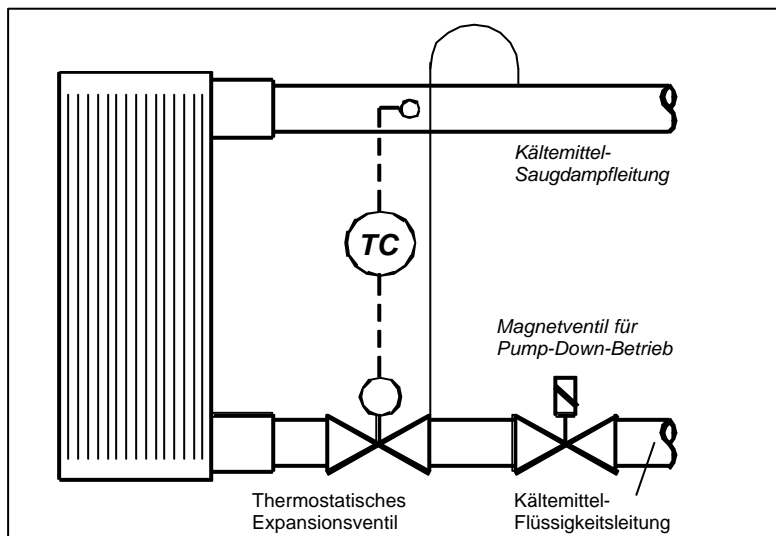


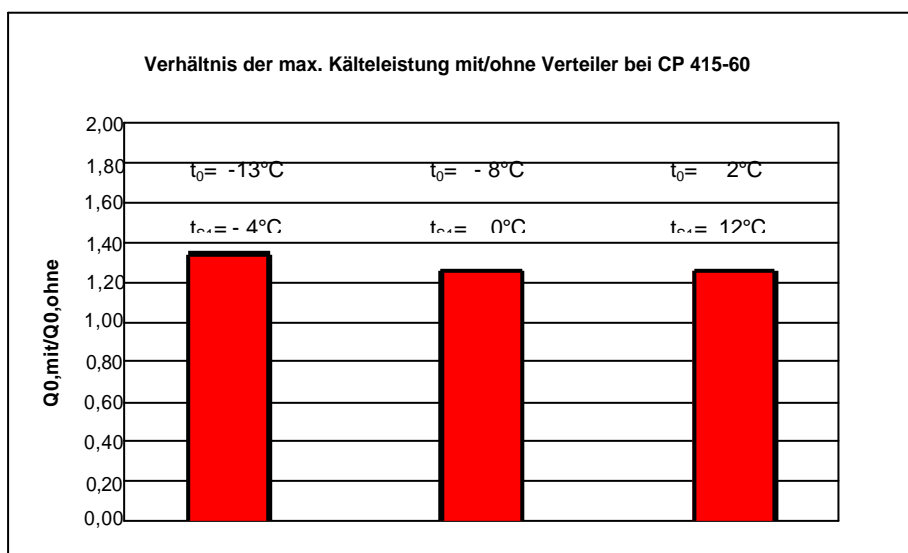
Abbildung 14 Schematische Anordnung des thermostatischen Expansionsventils mit äußerem Druckausgleich

Die Überhitzungseinstellung der eingesetzten Expansionsventile ist so gewählt, daß die Plattenverdampfer in Verbindung mit dem Kältemittelverteiler mit stabiler Überhitzung betrieben werden. Abb. 13 zeigt schematisch, daß bei dieser Überhitzungseinstellung ein Plattenverdampfer ohne Kältemittelverteiler nicht in allen Betriebspunkten stabil betrieben werden könnte.

Einfluß der Kältemittelverteilung auf das Leistungsverhalten eines Plattenverdampfers

Abb. 15 zeigt exemplarisch die Steigerung der relativen Kälteleistungen eines Cetepac 415-60 (Höhe 526 mm, Breite 111 mm, 60 Platten) mit Kältemittelverteiler gegenüber dem Betrieb ohne Kältemittelverteiler. Die dargestellten Messungen wurden mit R 22 und Wasser/Antifrogen N-Mischung durchgeführt. Bei dem Vergleich wurden die Verdampfungstemperatur und die Soleein- und -austrittstemperaturen auf konstante Werte eingestellt.

Durchgeführt wurden die Messungen in dem neutralen Prüfinstitut Steinbeis-Transferzentrum „Kälte- Klimatechnik“ in Karlsruhe. Die Ergebnisse wurden direkt übernommen.



Zusammenfassung

Durch Einbau von geeigneten Kältemittelverteilern und den Einsatz geeigneter Expansionsventile können Plattenverdampfer mit geringerer Kältemittelüberhitzung stabil betrieben werden. Dieser Effekt führt grundsätzlich in Verbindung mit einer guten Auslastung des Plattenverdampfers zu einer Steigerung der Verdampferleistung, bzw. für den praktischen Einsatz bedeutet dieses Verhalten eine Anhebung der Verdampfungstemperatur und damit eine Erhöhung der Anlageneffizienz. In welchem Maße sich der Kältemittelverteiler auf das Verhalten der Kälteanlage auswirkt, muß unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen und der Plattenverdampferbaugröße beurteilt werden.

Durch die dargestellte Systemlösung Plattenverdampfer/Kältemittelverteiler/Expansionsventil stehen dem Anwender aufeinander abgestimmte Komponenten zur Verfügung.

10 Ergebnisse mit Pilotanlagen

Die ersten Ergebnisse von Pilotanlagen liegen bereits vor. Die Darstellung der Ergebnisse werden in einem weiteren Bericht erfolgen. Mit Outdoor-Tests wurde bereits 1998 begonnen.

Neben den Prüfstandsuntersuchungen auf dem Mitte 1998 fertiggestellten eigenen Wärmepumpentest- und -prüfstand wurde zeitgleich ein Outdoor-Test mit einer 6,5 kW Sole-Wasser-Wärmepumpe durchgeführt.



Abbildung 16 Niedrigenergiehaus mit 6,5 kW – R410A – Wärmepumpe

Für diesen Test stand ein Niedrigenergiehaus in Gleichen (Nähe Göttingen) zur Verfügung. Eingesetzt wurde eine Wärmepumpe mit einer Nennleistung B0/W35 von 6,42 kW_{th}. Als Wärmequelle wurde eine Erdsondenanlage mit einer Gesamtlänge von 100 m erstellt. Insgesamt wurden zwei Sonden á 30 m und zwei Sonden á 20 m gebohrt. Aufgrund der geologischen Bedingungen wurde diese Ausführung gewählt.

Die ermittelte Leistungszahl COP ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

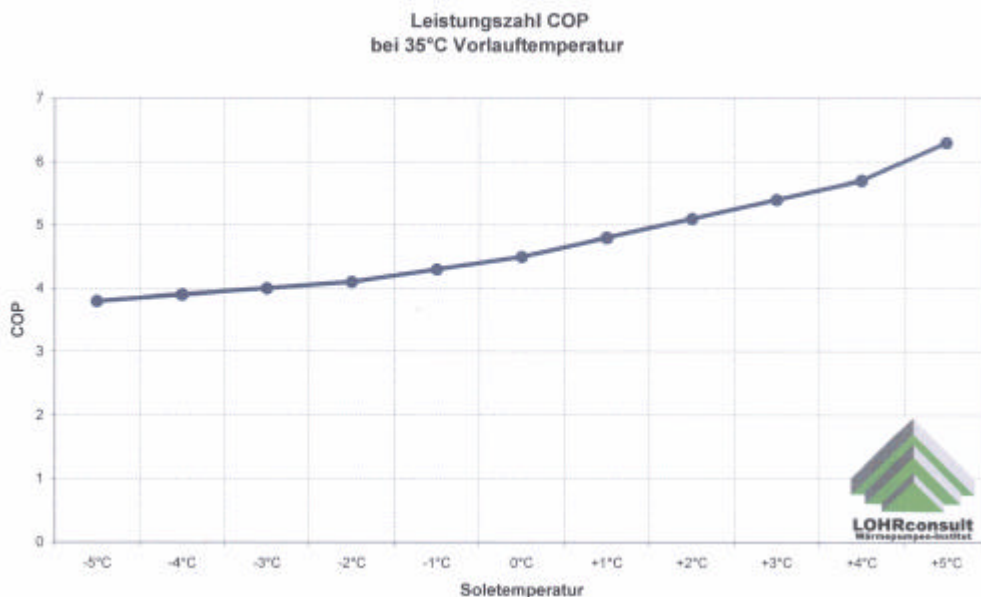


Abbildung 17 Leistungszahl COP bei einer Vorlauftemperatur von +35 °C im Heizsystem

Die Ergebnisse sind in dem Bericht „Testergebnisse mit R410A“ veröffentlicht, der bei dem Autor angefordert werden kann.

Die serienmäßige Fertigung und der Vertrieb wurden von der térmica Wärmepumpen-Systemtechnik GmbH im Jahre 1999 übernommen.



Abbildung 18 Serienwärmepumpe térmica R410A

11 Literaturverzeichnis

- [1] Anwendungshinweise compliant scroll, Copeland GmbH, Berlin
- [2] SOLKANE ® 410 –Thermodynamik- SOLVAY FLUOR + DERIVATE GmbH, Hannover
- [3] Vergleich der Kältemittel R22, R410A und R407C in einer Kälteanlage
Joachim Hellmann / Reinhold Döring
- [4] SOLKANE ®-Informationsdienst: SOLKANE ® 410 als Ersatzstoff für R13B1
- [5] Fachberichte SOLVAY FLUOR + DERIVATE GmbH Hellmann / König
- [6] Fachbericht Cetetherm Kay Krusche / Josef Osthues
- [7] Handbuch Kälteanlagen System Cetevap
- [8] Diverse Prüfberichte des Steinbeis-Transferzentrums „Kälte- Klimatechnik“, Karlsruhe, Bearbeiter: Bernd Zeitvogel
- [9] Untersuchung an Plattenverdampfern, Prof. Dr.-Ing. I. Reichelt, Steinbeis-Transferzentrum „Kälte- Klimatechnik“