

Martin Zogg, Dr.sc.techn.
Forschungsprogrammleiter UAW
Kirchstutz 3
CH-3414 Oberburg
martin.zogg@bluewin.ch
www.waerpumpe.ch/fe

Wärmepumpen für die Heizungssanierung Probleme und Lösungen

Während im Neubaubereich schon jedes dritte Einfamilienhaus mit einer Wärmepumpe ausgerüstet wird, hält die Wärmepumpe in den wesentlich grösseren Sanierungsmarkt auch im europäischen Ausland erst sporadisch Einzug. Das ist kein Zufall. Für die Heizungssanierung sind konventionelle Wärmepumpen leider oft nur beschränkt oder gar nicht geeignet. Für die höheren Vorlauftemperaturen im Sanierungsbereich ist eine neue Wärmepumpengeneration zu entwickeln. In diesem Beitrag werden dazu die im Rahmen der BFE-Forschung erarbeiteten Lösungen für Kleinwärmepumpen bis 25 kW Heizleistung vorgestellt: zweistufiger Prozess, Zwischendruckansaugung mit Economizerschaltung, Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung und Kleinwärmepumpe mit Ammoniak als Arbeitsmittel.

Through coordination with manufacturers, installers and customers, joint efforts have brought the heat pumps' share in the heating systems installed in new single-family houses up to 35%. In the much larger retrofit market the heat pumps' share is much lower and does not even reach 5%. This indicates a considerable backlog of demand in the retrofit market. The higher feed temperatures in retrofit heat distribution systems is asking for a new generation of retrofit heat pumps with a lower drop of heating power and a higher performance factor at higher temperature lifts. The development of a retrofit heat pump that meets these requirements at a competitive price is actually the main priority of the Swiss Federal Office of Energy's research program on the utilization of ambient heat. This article presents the results for small heat pumps with a heating capacity up to 25 kW: two stage cycle, economizer cycle with vapor injection, condensate cooling with a separate auxiliary heat pump cycle and a retrofit heat pump with ammonia as working fluid.

Sind Wärmepumpen für Heizungssanierungen überhaupt sinnvoll?

Bei Altbauten mit konventioneller Wärmeerzeugung in Heizkesseln verlangen die üblichen Zentralheizungen mit Radiatoren nach hohen Vorlauftemperaturen. Sie erreichen an den kältesten Tagen auch bei akzeptabler thermischer Isolation bis 60°C. Die Kondensationstemperatur der Wärmepumpe muss dann wenigstens 65°C erreichen. Konventionelle Wärmepumpen erreichen diese Hürde im Allgemeinen nicht. Deshalb die Forderung nach einer Wärmepumpe für höheren Temperaturhub¹ – eben einer Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt oder in Halben-englisch kürzer einer „Retrofit-Wärmepumpe“.

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe nimmt bekanntlich nach dem Gesetz von *Carnot* mit zunehmendem Temperaturhub ab. Bevor wir der Frage nach den technischen Lösungen für einen höheren Temperaturhub nachgehen, wollen wir uns deshalb kurz überlegen, ob der Ersatz

¹ Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle (Aussenluft, Erdwärmesonde, Grundwasser) und Heizungsvorlauftemperatur.

einer Kesselheizung durch eine Wärmepumpe thermodynamisch überhaupt sinnvoll ist. Wenn man wie beim zu ersetzenden Kessel von Erdgas oder Heizöl als Brennstoff ausgeht, kann damit der für den Betrieb einer Kompressionswärmepumpe benötigte elektrische Strom in einem Blockheizkraftwerk erzeugt werden. In dem im Bild 1 gezeigten Beispiel einer Kombination BHKW-Wärmepumpe werden aus 100% Brennstoffenergie dank einer Wärmeentnahme aus der Umgebung durch die Wärmepumpe von 85% total 174% Nutzwärme erzeugt (Gesamtnutzungsgrad 174%). Wie in [1] gezeigt wird, erhält man im Falle eines Antriebs derselben Wärmepumpe mit Strom aus einem modernen Kombikraftwerk (elektrischer Wirkungsgrad 58%, keine Abwärmenutzung, Stromleitungsverluste 7.5%) aus 100% Brennstoffenergie sogar 188% Nutzwärme (Gesamtnutzungsgrad 188%). Eine Kesselheizung schafft aber weniger als 100% Nutzwärme!

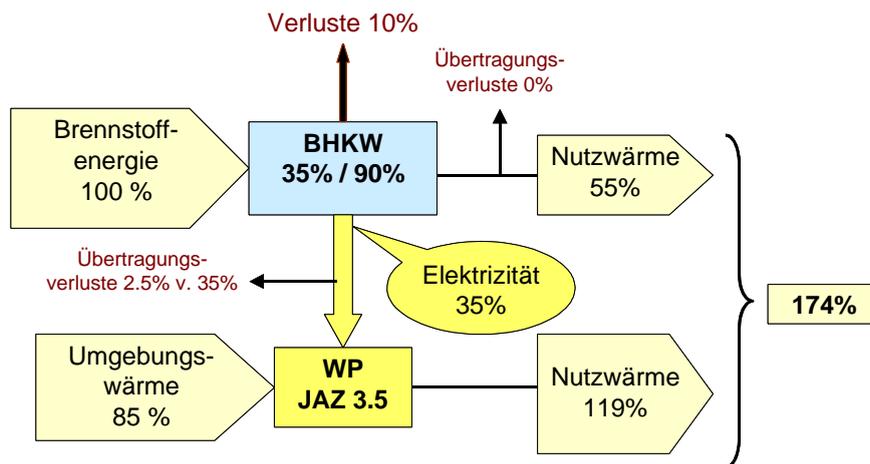


Bild 1: Kombination eines Blockheizkraftwerks (BHKW) mit einer Kompressionswärmepumpe (WP). Gesamtwirkungsgrad des BHKWs 90%, elektrischer Wirkungsgrad 35%, Stromübertragungsverluste vom BHKW zur Wärmepumpe 2.5%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

Zugegeben, die Jahresarbeitszahl von 3.5 ist für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe bei den in der Heizungssanierung erforderlichen hohen Vorlauftemperaturen beim heutigen Stand der Technik zu hoch gegriffen. Moderne Kleinwärmepumpen erreichen Gütegrade² um 40%. Dies lässt auch im Sanierungstemperaturbereich Jahresarbeitszahlen um 2.5 bis 2.75 erwarten. Wie das Bild 2 verdeutlicht, sind mit Strom aus Blockheizkraftwerken immer noch Gesamtnutzungsgrade um 140% bis 150% realisierbar. Bei Strom aus Kombikraftwerken sind es etwa 135% bis 150%. Dies bedeutet bereits bei heutiger Technik im Sanierungsbereich **Einsparungen an Brennstoffen und Reduktion an CO₂-Emissionen um 25% bis 35%**. Sanierungswärmepumpen sind also eine ökologisch durchaus sinnvolle Lösung!

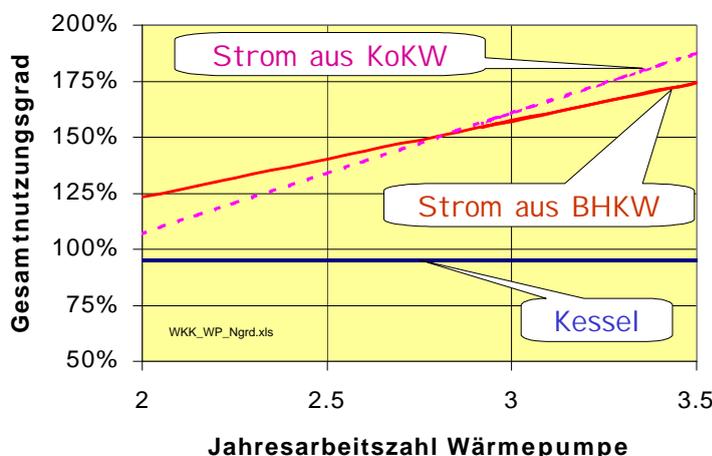


Bild 2: Gesamtnutzungsgrad für die Wärmeerzeugung in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl mit Strom für die Wärmepumpen aus Blockheizkraftwerken (Gesamtwirkungsgrad 90%, elektrischer Wirkungsgrad 35%, Stromübertragungsverluste 2.5%) und aus Kombikraftwerken (elektrischer Wirkungsgrad 58%, Stromübertragungsverluste 7.5%).

² Verhältnis der effektiven Leistungszahl zur Leistungszahl einer idealen „Carnot-Wärmepumpe“.

Warum eine neue Retrofit-Wärmepumpe?

Für die Heizungssanierung möchte man möglichst Aussenluft als Wärmequelle verwenden können (jahrelang gepflegter Garten!). Heizung und Warmwasserbereitung müssen ohne Hilfsheizungen erfolgen und die Vorlauftemperaturen sind im Allgemeinen hoch. Hier haben konventionelle Wärmepumpen mit den folgenden Schwierigkeiten zu kämpfen:

1. Wie das Bild 3 illustriert, benötigt eine Raumheizung eine mit sinkender Aussentemperatur zunehmende Heizleistung. Die Abhängigkeit der von der Wärmepumpe (mit wie üblich konstanter Kompressordrehzahl) abgegebenen Wärmeleistung ist dem Bedarf leider genau entgegengesetzt. Mit sinkender Aussentemperatur nimmt die Wärmeleistung einer Wärmepumpe stark ab. Wenn man eine konventionelle Wärmepumpe gemäss dem Bild 3 auf die erforderliche Heizleistung bei -12 °C auslegt, ist sie für den häufigsten Betrieb um -3 °C bis $+7\text{ °C}$ stark überdimensioniert. Sie muss in der Folge mit entsprechend kurzen Takten betrieben werden. Dies ergibt zu teure Wärmepumpen mit reduzierter Lebensdauer und einen Effizienzverlust.

→ Daraus ergibt sich die wichtigste Forderung an die Sanierungswärmepumpe: Sie muss einen geringeren Abfall der Heizleistung bei tiefen Aussentemperaturen als konventionelle Wärmepumpen aufweisen.

2. Bei tiefen Aussentemperaturen ergeben sich hohe Temperaturhübe. Diese sind mit den einfachen konventionellen Wärmepumpenprozessen bei den meisten Kältemitteln infolge unzulässig hoher Temperaturen am Kompressorausstritt nicht zu bewältigen.

→ Die neue Retrofit-Wärmepumpe muss auch bei tiefsten Aussentemperaturen noch zulässige Kompressor-Austrittstemperaturen gewährleisten.

3. Höhere Temperaturhübe ergeben geringere Jahresarbeitszahlen.

→ Die neue Retrofit-Wärmepumpe muss auch bei hohen Temperaturhüben eine hohe energetische Effizienz aufweisen, um trotzdem interessante Jahresarbeitszahlen zu erreichen.

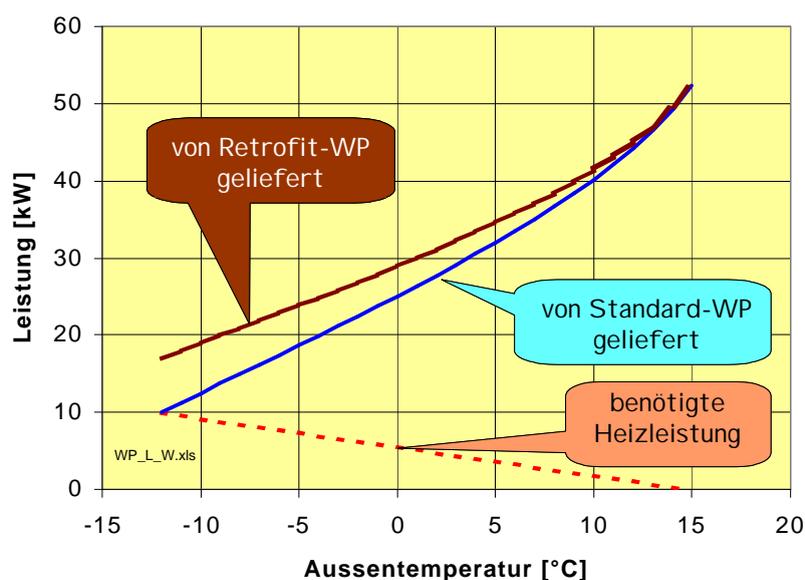


Bild 3: Wichtigste Forderung an Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt: Reduktion der Divergenz von Wärmeleistungsnachfrage der Heizung zum Wärmeleistungsangebot der Wärmepumpe.

Das Vorhaben *Swiss Retrofit Heat Pump* (SRHP)

Das Bundesamt für Energie hat in seiner Ausschreibung für die *Swiss Retrofit Heat Pump* (SRHP) folgende Hauptanforderungen an eine Wärmepumpe für den Sanierungsbereich gestellt:

1. Als Wärmequelle ist Aussenluft zu verwenden.
2. Betrieb mit Vorlauftemperaturen bis 60°C bei einer Auslegungstemperatur von –12°C. Vollständige Deckung des Wärmeleistungsbedarfs ohne separate Zusatzaggregate (monovalenter Betrieb ohne elektrische Widerstandsheizung).
3. Warmwasserbereitung auf wählbare Temperaturen von 45°C bis 55°C ohne Zusatzaggregate.
4. Übergeordnete Regelung für alle Einheiten (Wärmepumpe, technischer Speicher, integrierte Warmwasserbereitung mit Vorrangschaltung und optionaler Kollektorkreislauf zur Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie).
5. Minimaler Gütegrad von 37.5% bei Aussenlufttemperaturen von –10°C bis 15°C und Heizungsvorlauftemperaturen von 35°C bis 60°C. Gütegrad von 42.5% bei einer Aussenlufttemperatur von 2°C und einer Heizungsvorlauftemperatur von 50°C. (Messbedingungen nach EN255).
6. Die neue Wärmepumpe muss den Bedingungen für das FWS-Gütesiegel entsprechen und wartungsfrei sein.
7. Die neue Wärmepumpe muss die neuesten Richtlinien, Normen und gesetzlichen Vorschriften für die Schweiz, Deutschland, Österreich und Frankreich erfüllen.

Forschungsprojekte zur Entwicklung der SRHP

Zum Erfüllen der oben aufgeführten Anforderungen an eine Wärmepumpe für den Sanierungsbereich hat das Bundesamt für Energie an Hochschulen, Fachhochschulen und bei Herstellern mehrere Forschungsprojekte gestartet und zum Teil bereits abgeschlossen. Über die Arbeiten zu neuen Regelungs- und Betriebsüberwachungskonzepten wurde in [2] und [3] bereits ausführlich berichtet. Der Hauptteil der Forschungsarbeiten zielt aber auf eine Verbesserung der Prozessführung zur Erhöhung der abgegebenen Wärmeleistung und zur Reduktion der Verdichtungsendtemperatur bei grossen Temperaturdifferenzen sowie zur Verbesserung der energetischen Effizienz. Das Bild 4 vermittelt dazu eine Übersicht.



Bild 4: Im Rahmen des Vorhabens „Swiss Retrofit Heat Pump“ für die Anwendung in Kleinwärmepumpen untersuchte Prozesse.

Eine thermodynamisch interessante Lösung für Retrofit-Wärmepumpen sind **zweistufige Wärmepumpen mit zwei Kompressoren**. Diese wurden zwar in [4] untersucht und ergaben Steigerungen der Wärmeleistung gegenüber konventionellen einstufigen Prozessen um bis 50% und eine Erhöhung der Leistungszahl um bis zu 14%. Es traten aber auch Probleme mit der Schmierölverteilung auf, und die Wärmepumpenanlage wird zu komplex. Da die Gesamtkosten einer Wärmepumpenheizung mit jenen von Kesselheizungen konkurrieren müssen, mussten echt zweistufige Lösungen mit zwei Kompressoren vorerst weggelassen werden.

Eine wesentlich einfachere und preiswertere Lösung erhält man durch **Zwischenansaugen eines Teilstroms mit Economizer** nach dem Bild 5. Dabei wird ein Teilstrom des Kondensats auf einen Zwischendruck entspannt. Durch Kondensatunterkühlung wird diesem im Economizer Wärme bis zum vollständigen Wiederverdampfen (Nassdampf → Sattdampf) zugeführt. Diese Schaltung bringt folgende Vorteile:

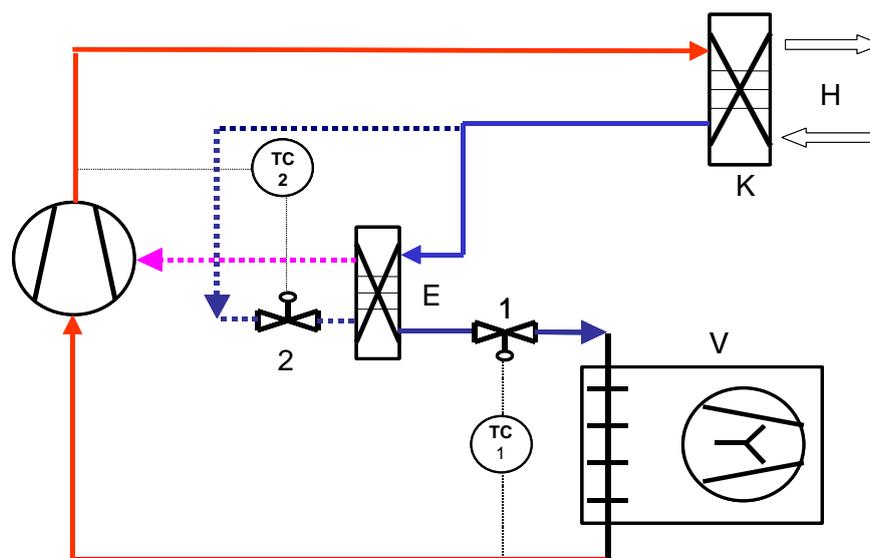


Bild 5: Wärmepumpenkreisprozess mit Zwischenansaugung und Economizer (E).
H Heizungskreislauf,
K Kondensator,
V Verdampfer.

1. Höherer Massenstrom am Kompressorausritt → höhere Wärmeleistung.
2. Reduktion der Kompressoraustrittstemperatur → problemloser Betrieb bei hohen Temperaturhuben.

Der Einfluss auf die Leistungszahl (COP) ist je nach Kältemittel und Kompressor unterschiedlich. Bei Scrollverdichtern und R407C als Arbeitsmittel ergeben sich nur bei richtiger Zwischenansaugdimensionierung deutlich höhere Leistungszahlen als bei Prozessen ohne Zwischenansaugung. Im Rahmen des Forschungsprojekts [5] wurde ein Funktionsmuster einer Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung und Economizer mit R407C als Kältemittel ausgelegt, gebaut und experimentell untersucht. Als Verdichter wurde ein kommerzieller Scrollverdichter mit für diesen Einsatz nicht richtig dimensionierten Zwischenansaugbohrungen eingesetzt. Im ganzen gemessenen Bereich ($-5/35^{\circ}\text{C}$, $0/35^{\circ}\text{C}$ und $5/35^{\circ}\text{C}$ sowie $-5/50^{\circ}\text{C}$, $0/50^{\circ}\text{C}$, $5/50^{\circ}\text{C}$ und $-10/60^{\circ}\text{C}$) wurde gegenüber konventionellen einstufigen Wärmepumpenprozessen eine Erhöhung der Heizleistung um 5% bis 15% gemessen. Die 15 Prozent ergeben sich beim höchsten Temperaturhub. Wesentlich für den problemlosen Wärmepumpeneinsatz im Sanierungsbereich ist auch die Reduktion der Verdichtungsendtemperatur um über 20°C bei den für den Kompressorbetrieb kritischen hohen Temperaturhuben. Die Leistungszahl konnte dagegen nur geringfügig erhöht werden. Die Untersuchungen haben die für den Wärmepumpenbetrieb noch zu hohen Druckverluste bei der Zwischenansaugung heute kommerziell erhältlicher Scrollverdichter bestätigt. Gefragt für den Wärmepumpenbetrieb im Sanierungsbereich ist ein Scrollverdichter, welcher bei thermodynamisch optimalem Zwischendruck höhere Zwischeneinspritzmengen ermöglicht.

In einem weiteren Forschungsvorhaben [6] wurde deshalb ein **Prototyp eines Scrollverdichters mit** einer dem grossen Volumenstrom der Zwischenansaugung beim Wärmepumpenbetrieb **angepassten Ansaugöffnung** eingesetzt. Zusätzlich wurde der Kreisprozess nach Bild 5 durch einen Sauggasüberhitzer ergänzt: Bild 6.

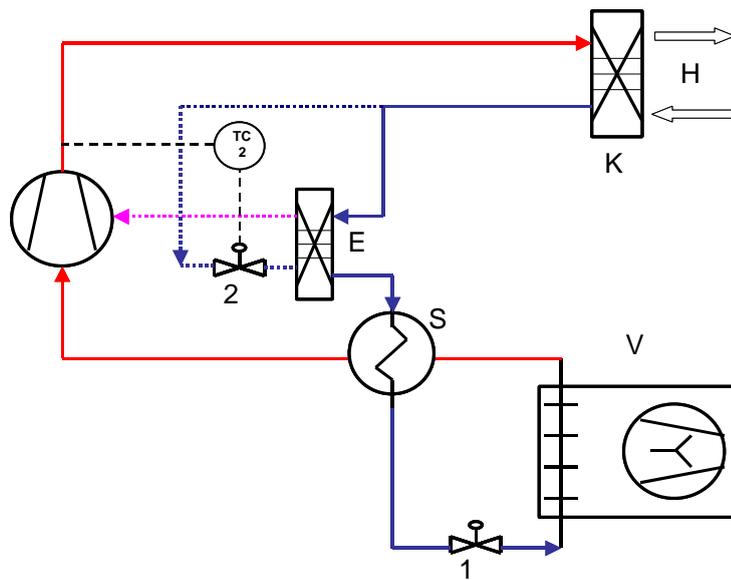


Bild 6: Untersuchte Prozessvariante für Wärmepumpen mit grossem Temperaturhub mit Sauggasüberhitzer S und Zwischendruckansaugung mit Economizer E.
H Wärmeabgabe an Heizung, K Kondensator, V Verdampfer mit Umgebungsluft als Wärmequelle, 1 thermostatisches Expansionsventil für Hauptstrom, 2 Expansionsventil für Nebenstrom.

Mit der Versuchsanlage wurde gegenüber konventionellen Wärmepumpenprozessen eine Verbesserung der Wärmeleistung bei hohen Temperaturhuben um bis zu 30% erreicht. Auch die Leistungszahl konnte nun bei hohen Temperaturhuben noch um bis zu 15% (Luft -7°C , Wasser 60°C) verbessert werden. Der untersuchte Prototyp eines neuen Scrollverdichters mit (im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen Typen) für die Zwischenansaugung richtig dimensionierter Zwischenansaugöffnung ist für den Wärmepumpen-Sanierungsmarkt vielversprechend. Für den effizienteren Einsatz von Wärmepumpen im Sanierungsmarkt ist zu hoffen, dass dieser Verdichterprototyp bald Eingang in die Serieproduktion finden wird.

In einigen Wärmepumpenfabrikaten wird die Kondensatunterkühlung vor dem Drosselventil bereits zur Warmwasserbereitung und in einem Fall auch zur Temperierung von Trocknungsräumen genutzt. Dies funktioniert aber nur, wenn das Warmwasser nicht bereits auf Kondensationstemperatur aufgewärmt ist. Um den Gewinn durch die Kondensatunterkühlung immer zu erhalten, wurde in einem weiteren Forschungsvorhaben [7] die **Kondensatunterkühlung als Wärmequelle für einen zweiten Wärmepumpenprozess** analysiert und praktisch erprobt: Bild 7. Die Versuchswärmepumpe mit einem Scrollverdichter (isentropischer Wirkungsgrad 62%) im Hauptkreislauf und einem kleineren Hubkolbenverdichter (isentropischer Wirkungsgrad nur 47%) wurde mit R407C und mit Isceon 59 betrieben. Die Verbesserung der Leistungszahl gegenüber konventionellen einstufigen Wärmepumpenprozessen beträgt im untersuchten Bereich (Quellentemperatur -8°C bis 8°C , Senkentemperatur $40^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$) im Mittel etwa 5%. Die Wärmeleistung konnte um etwa 20% gesteigert werden.

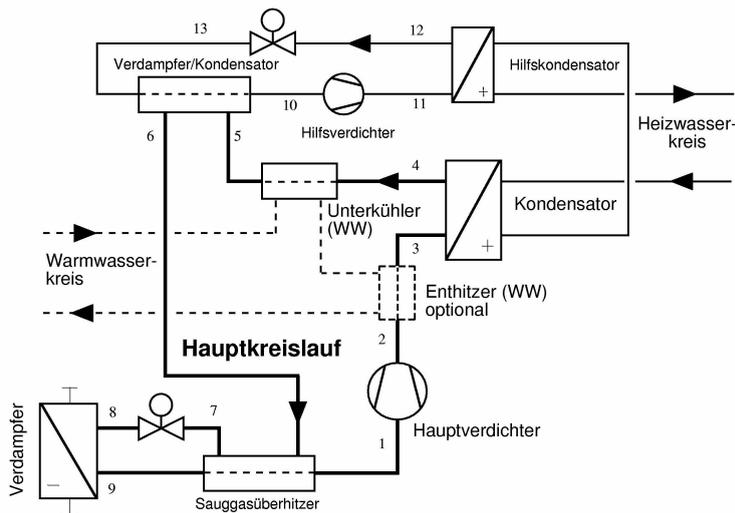


Bild 7: Kreisprozess für Wärmepumpen mit separatem Wärmepumpenkreislauf für die Kondensatunterkühlung (aus [7]).

Die Forderung von Vorlauftemperaturen bis 60°C für den Sanierungsmarkt mit Umgebungsluft als Wärmequelle kann mit R407C nicht erfüllt werden. Es ergeben sich damit zu hohe Druckverhältnisse und zu hohe Verdichtungsendtemperaturen im Hauptkreislauf. Mit dem neuen Kältemittelgemisch Isceon 59 sind die Anforderungen des Sanierungsmarkts aber bei etwa gleichen Leistungszahlen und um rund 15% geringerer Heizleistung problemlos zu erreichen. Die Wärmepumpe mit separatem Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung ist für Kleinwärmepumpen wohl etwas zu aufwendig. Bei grösseren Wärmepumpen ist diese interessante Prozessvariante aber durchaus interessant.

Tabelle 1: Vergleich der untersuchten Wärmepumpenprozesse für Retrofit-Wärmepumpen. Heizleistung und Leistungszahl: gegenüber konventionellen Wärmepumpenprozessen erreichte Verbesserungen.

	Economizer	Economizer + Sauggasüberhitzer	Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung	Economizer
Kältemittel	R407C	R407C	R407C, Isceon 59	Ammoniak
Verdichter	kommerzieller Scroll mit Zwischenansaugung	Protoyp Scroll mit Zwischenansaugung	Scroll (Hauptkreislauf) Kolben (Hilfskreislauf)	Flügelzellen n-variabel
Heizleistung	bis + 15%	bis + 30 %	bis + 20%	vergleichbar
Leistungszahl	wenig höher	bis + 15 %	bis + 5%	vergleichbar
Kompressoraustrittstemp.	problemlos	problemlos	mit R407C zu hoch	problemlos

Schliesslich wurde als weitere Variante einer Retrofit-Wärmepumpe erstmals eine **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** als natürlichem Kältemittel in Betrieb genommen und bei -15°C/65°C erfolgreich betrieben [8]. Auf dem Weg dazu waren erhebliche Hürden zu überwinden. Insgesamt wurden drei Funktionsmuster gebaut. Dieses Pionierprojekt konnte an der SRHP-Ausscheidung deshalb leider nicht mehr berücksichtigt werden. Es wird aber trotzdem weiterverfolgt. Die Ergebnisse der vorgestellten Forschungsprojekte werden in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Stand der Ausscheidung zur *Swiss Retrofit Heat Pump*

Die für die Ausscheidung zur *Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)* eingereichten vier Funktionsmuster wurden im Sommer 2000 durch Messungen im Wärmepumpentestzentrum Töss geprüft und einer detaillierten Kostenanalyse unterzogen. Von den eingereichten Funktionsmustern kam dasjenige der Firma KWT, Kälte-Wärme-Technik in Belp den Anforderungen des Bundesamts für Energie an eine Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt am nächsten. Da die KWT-Lösung einen deutlichen Entwicklungsschritt für Heizungssanierungen mit Wärmepumpen darstellt, wurde das Funktionsmuster der Firma KWT von der durch das BFE eingesetzten Jury einstimmig für die Felderprobung in der Heizsaison 00/01 ausgewählt. Falls diese erfolgreich ausfällt, wird der Gewinner der SRHP offiziell bekannt gegeben. Das Bundesamt für Energie wird dann die Bemühungen um eine gemeinsame Produktion in der Schweiz im Rahmen seiner Möglichkeiten unterstützen.

Quellen

- [1] M. Zogg: Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen, Bundesamt für Energie 1998; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [2] M. Zogg (Hrsg.): Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems, Tagungsband zur 7.UAW-Tagung vom 9.Mai 2000, Bundesamt für Energie 2000; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [3] M. Zogg: Effizientere Wärmepumpenheizungen, Heizung Klima 27(2000)3, 152/154,157/158; Bulletin SEV/VSE 91(2000)24, 15/19; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [4] M. Zehnder, D. Favrat: Pompe à chaleur biétagée à haute performance, Schlussbericht Phase 2, Bundesamt für Energie 1999; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [5] M. Zehnder, D. Favrat, E. Zahnd, J. Cizmar, D.Trüssel: Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren, Schlussbericht, Bundesamt für Energie 2000; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [6] F. Brand, M. Zehnder, D. Favrat: Pompe à chaleur à haute température, Phase 1: Solution avec compresseur à injection vapeur, rapport final, Office fédéral de l'énergie 2000; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [7] M. Zehnder, D. Favrat, E. Zahnd, J.Cizmar, G.Reiner, C.Brugnoli, P.Reis: Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 2: Experimentelle Untersuchung, Schlussbericht, Bundesamt für Energie; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [8] Th. Kopp, A. Flück, Th.Schmid, H. Albrecht, S. Kollbrunner: Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2, Etappe 1: Funktionsmuster, Zwischenbericht, Bundesamt für Energie 2000, ENET 9719746.