



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Jahresbericht 5. Dezember 2009**

---

## **Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm «Wärmepumpen, WKK, Kälte»  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Emerson Climate Technologies GmbH, D-13509 Berlin  
Ziehl-Abegg Schweiz AG, CH-8957 Spreitenbach

**Auftragnehmer:**

Hochschule Luzern  
Technik & Architektur  
(HSLU T&A)  
CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch/tevt](http://www.hslu.ch/tevt)

**Autoren:**

L. Gasser, Hochschule Luzern  
M. Albert, Hochschule Luzern  
I. Wyssen, Hochschule Luzern  
M. Häusermann, Hochschule Luzern  
Prof. Dr. B. Wellig, Hochschule Luzern, [Beat.Wellig@hslu.ch](mailto:Beat.Wellig@hslu.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Thomas Kopp

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 153503 / 102713

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

## **Abstract**

In den BFE-Forschungsprojekten LOREF und WEXA wurden wertvolle Erkenntnisse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) gewonnen, welche in diesem Projekt praxisgerecht umgesetzt werden sollen. Das Hauptziel ist, allgemeingültige Auslegungs- und Planungsgrundlagen für die Realisierung effizienter, betriebssicherer und wirtschaftlicher L/W-WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung zu erarbeiten. Mittels Simulationen und Experimenten soll eine Regelung konzipiert und entwickelt werden, welche in Abhängigkeit des Umgebungszustandes und des Heizbedarfs des Gebäudes den Kältemitteldurchsatz und die Ventilatordrehzahl regelt, das jeweils optimale Abtauverfahren auswählt und die Abtauung zum optimalen Zeitpunkt einleitet bzw. abbricht. Zur Untersuchung der entwickelten Regelstrategien wird ein Prototyp einer leistungsgeregelten L/W-WP realisiert. Mit dem Projekt sollen Komponenten- und Anlagenherstellern, Installateuren und Planern neue Impulse für die Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung von L/W-WP gegeben werden.

Das im Rahmen von LOREF erstellte Simulationsprogramm wurde durch die Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr sowie durch die Regelung der Ventilatordrehzahl und des Kältemitteldurchsatzes erweitert. Mit Hilfe des modifizierten Simulationsprogramms wurden die Anforderungen an die Komponenten des Wärmepumpen-Prototyps spezifiziert und diese ausgelegt. Der Wärmepumpen-Prototyp wurde im Labor der HSLU – T&A aufgebaut, mit der erforderlichen Mess- und Regeltechnik ausgestattet und erfolgreich in Betrieb genommen. Parallel zum Aufbau des Prototypen wurde der Prüfstand zur Konditionierung verschiedener Luftzustände modifiziert und das im Vorjahr erstellte Wärmemodul in den Prüfstand eingebunden. Geeignete Ansätze für die Entwicklung einer praxisreifen Abtauregelung konnten gefunden werden, welche in einem nächsten Schritt umgesetzt und in die Regelung des Wärmepumpen-Prototypen implementiert werden sollen. Im kommenden Jahr werden geeignete Regelalgorithmen entwickelt und diese in umfangreichen Messreihen getestet. Mit dem Aufzeigen des wirtschaftlichen Potentials und dem Erstellen des Schlussberichtes sowie einer Veröffentlichung für ein breites Publikum wird das Forschungsprojekt abgeschlossen.

## **Summary**

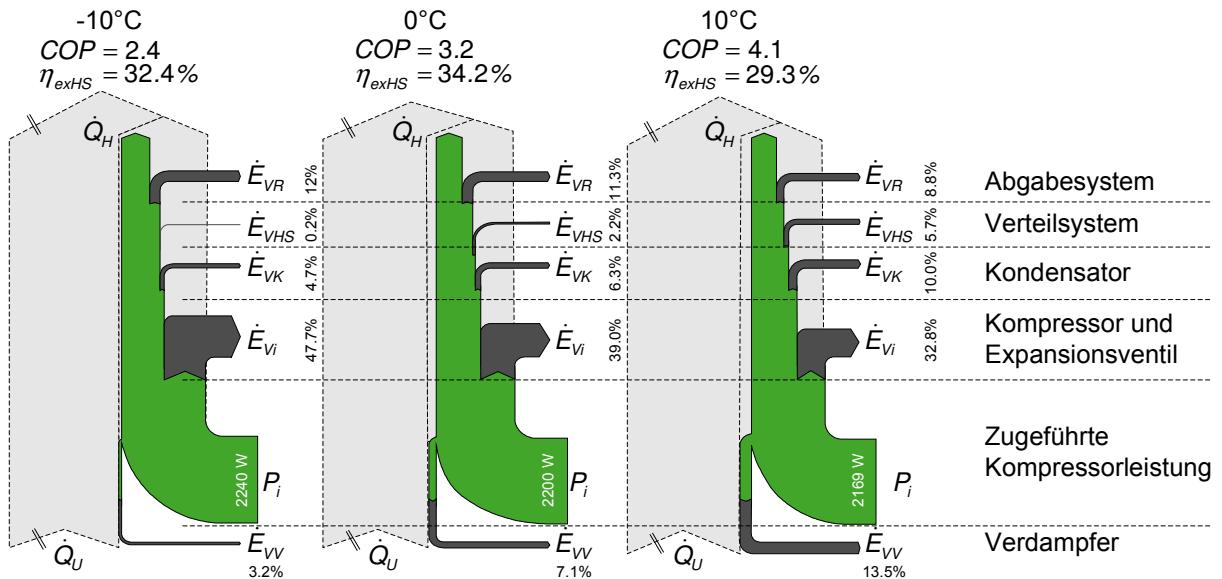
During preceding Swiss Federal Office of Energy research projects “optimisation of fin tube evaporators by reduction of ice and frost formation” and “exergy analysis for increasing the efficiency of air/water heat pumps” valuable findings concerning the increase in efficiency of air/water heat pumps were gained. These findings are now to be implemented in a practical and realistic manner. The aim is to develop universally valid design and planning criteria (“guidance”) for the realisation of efficient, reliable and economic air/water heat pumps with continuous capacity control. The main measure to improve the efficiency of air/water heat pumps is to continuously adapt the generated heating capacity to the heat demand of the building. An optimised process control strategy depending on the applied control principle of the heat pump shall be developed using simulations as well as experiments. A further goal is to develop an optimised defrosting control with application of the ambient air defrosting technique. This study shall provide an incentive for the further development as well as the increase of efficiency of air/water heat pumps, both by heat pump and component manufacturers as well as by designers of building services engineering. To verify the theoretical findings as well as to investigate different control strategies a heat pump prototype with continuous capacity control has been realised. The theoretical as well as the experimental investigations show that the optimal control strategy depends strongly upon the partial load efficiencies of the compressor and the fan.

# Projektziel

Das Hauptziel des Projekts ist, die in den BFE-Forschungsprojekten LOREF 1, 2 und WEXA 3 gewonnenen Erkenntnisse praxisgerecht umzusetzen und Auslegungs- und Planungsgrundlagen („Wegleitung“) für die Realisierung effizienter und betriebssicherer Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) mit kontinuierlicher Leistungsregelung zu erarbeiten.

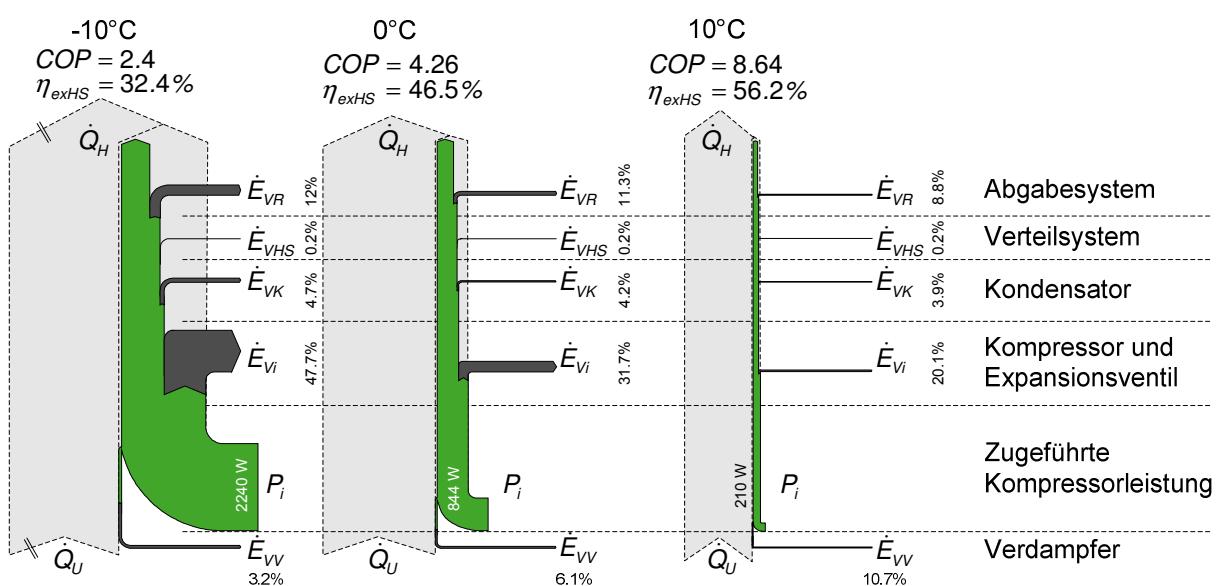
In WEXA 3.4 wurde gezeigt, dass sich durch kontinuierliche Anpassung der erzeugten an die erforderliche Heizleistung mittels einer ausgeklügelten Leistungsregelung die Energieeffizienz von L/W-WP markant steigern lässt (Figur 1 und 2). Zusätzliches Potenzial für Effizienzsteigerungen bietet die Abtauung mit Ventilatornachlauf 5, wenn bei geeignetem Zustand der Umgebungsluft (d.h. unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit) mit dieser Methode abgetaut wird.

## Ein/Aus-Regelung:



Figur 1: Energie/Exergie-Flussbilder einer L/W-WP mit **Ein/Aus-Regelung 4** (Energie-Flussbilder nicht massstäblich dargestellt).

## Kontinuierliche Leistungsregelung:



Figur 2: Energie/Exergie-Flussbilder einer L/W-WP mit **kontinuierlicher Leistungsregelung 4** (Energie-Flussbild für -10°C nicht massstäblich dargestellt)

In Anbetracht der immer grösseren Verbreitung von L/W-WP lassen sich durch eine markante Effizienzsteigerung grosse Mengen elektrischer Energie einsparen. Das Forschungsprojekt soll zu neuen Impulsen in der Wärmepumpen-Branche führen und effizienten, leistungsgeregelten L/W-WP zum Durchbruch verhelfen.

### Ziele Gesamtprojekt

- Entwicklung einer praxisreifen Abtauregelung, unter Einbezug der Abtauung mit Ventilatornachlauf sowie der Prozessumkehr, welche den optimalen Zeitpunkt zur Abtauung erkennt, das in Abhängigkeit des Umgebungszustandes optimale Abtauverfahren einleitet und dieses zum richtigen Zeitpunkt wieder abbricht.
- Erarbeitung einer Regelung für eine optimale Prozessführung in Abhängigkeit der gewählten Regelstrategie (z.B. alleinige Regelung des Kältemitteldurchsatzes, simultane Regelung des Kältemitteldurchsatzes und der Ventilatordrehzahl).
- Experimenteller Nachweis der Effizienzsteigerung durch die kontinuierliche Leistungsregelung und die optimierte Abtauregelung gegenüber herkömmlichen L/W-WP mit Ein/Aus-Regelung.
- Erstellung von detaillierten Auslegungs- und Planungsgrundlagen („Wegleitung“) für die Dimensionierung und Auswahl sämtlicher Komponenten sowie für die Regelungstechnik effizienter L/W-WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung.

### Ziele 2009

Für das Jahr 2009 war die **Modifikation des Simulationsprogramms** aus LOREF 2 durch die Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr als auch durch die Regelung der Ventilatordrehzahl und des Kältemitteldurchsatzes geplant. Mit Hilfe des modifizierten Simulationsprogramms erfolgte die **Spezifikation der Komponenten und Auslegung des Wärmepumpen-Prototyps**. Dieses Arbeitspaket erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern. Parallel dazu war der **Umbau des Wärmepumpen-Prüfstandes** für die Konditionierung verschiedener Luftzustände bei der experimentellen Untersuchung des Wärmepumpen-Prototyps geplant. Der Prüfstand wurde so modifiziert, dass die Dynamik deutlich erhöht werden kann, was insbesondere für die experimentelle Untersuchung der Abtauprozesse mit Ventilatornachlauf erforderlich ist. Nach der Auslegung und Planung erfolgte die **Realisierung und Inbetriebnahme des Wärmepumpen-Prototyps**. Parallel dazu war die **Entwicklung einer praxisreifen Abtauregelung für L/W-WP** geplant. Dabei soll das Simulationsprogramm intensiv genutzt und weiter modifiziert werden. Die Abtauregelung soll in der Lage sein, den optimalen Zeitpunkt für die Abtauung sowie das jeweils optimale Abtauverfahren auszuwählen und die Abtauung im richtigen Moment zu beenden.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

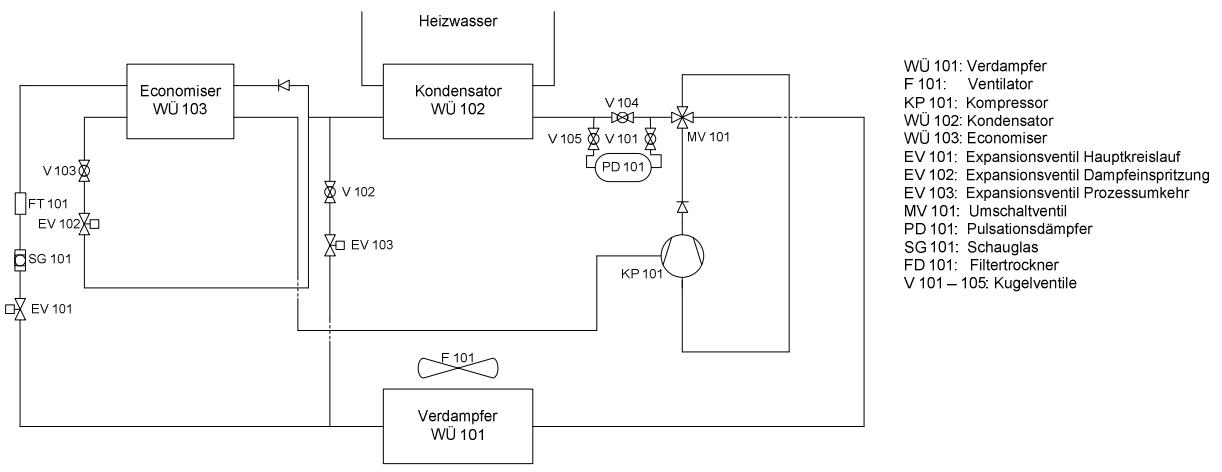
### Modifikation des Simulationsprogramms

Das Simulationsprogramm aus LOREF 2 wurde durch die Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr sowie durch die Regelung der Ventilatordrehzahl und des Kältemitteldurchsatzes erweitert. Bei der Modellierung der Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr konnte auf die in LOREF 2 aufgenommenen Messreihen zurückgegriffen werden. Für die Modellierung der Regelung des Kältemitteldurchsatzes, welche über die Einstellung des Kompressors erfolgt, wurden von Emerson Climate Technologies GmbH umfangreiche Messreihen des verwendeten Kompressors zur Verfügung gestellt. Das modifizierte Simulationsprogramm diente als Grundlage bei der

Spezifikation der Komponenten und Auslegung des Wärmepumpen-Prototyps und ist zudem bei der Entwicklung einer praxisreifen Abtauregelung von grossem Nutzen.

## Spezifikation der Komponenten und Auslegung des Wärmepumpen-Prototyps

Mit Hilfe des modifizierten Simulationsprogramms wurden die Anforderungen an die Komponenten des Wärmepumpen-Prototyps spezifiziert. Anschliessend wurden die Komponenten ausgelegt, ausgewählt und bestellt bzw. hergestellt. Der Kompressor des Wärmepumpen-Prototyps wurde von Emerson Climate Technologies GmbH und der Ventilator von Ziehl-Abegg Schweiz AG zur Verfügung gestellt. Es zeigte sich, dass die Spezifikation der Anforderungen an die Komponenten und derer Auswahl bei Luft/Wasser-Wärmepumpen mit kontinuierlicher Leistungsregelung komplexer ist als bei Ein/Aus-geregelten Wärmepumpen. Ursache dafür sind die über den Bereich möglicher Luftzustände stark variierenden Betriebszustände der Wärmepumpe. Die Eignung der ausgelegten Komponenten muss aus diesem Grund jeweils für sämtliche Betriebszustände überprüft werden. In einem weiteren Schritt wurden das Mess-, Regel- und Elektroschema erstellt. Das gesamte Arbeitspaket erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern, so dass intensiv von deren Know-how profitiert werden konnte. Figur 3 zeigt das Schema des Wärmepumpen-Prototyps.

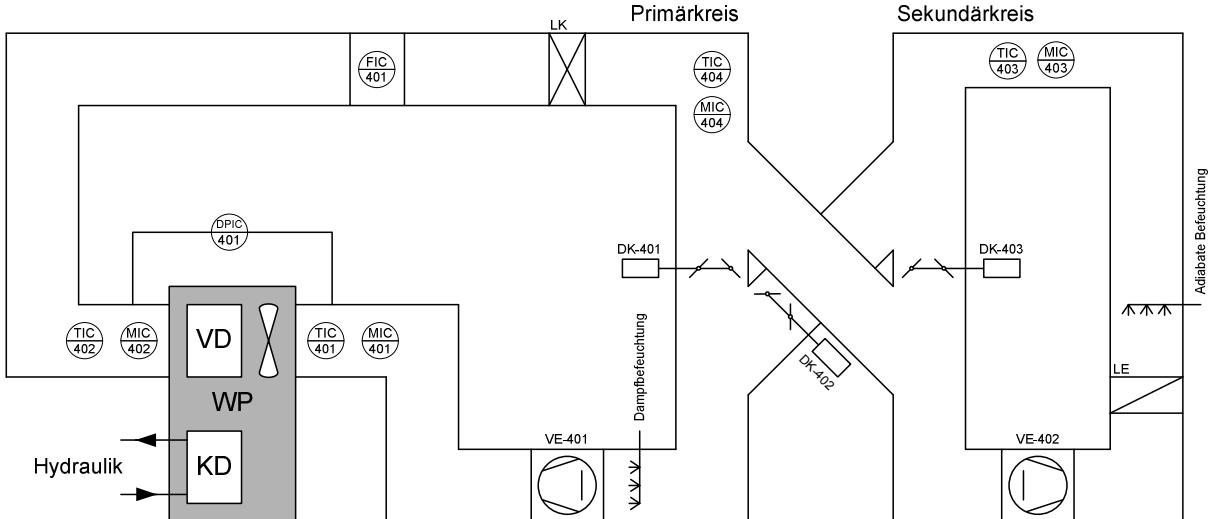


Figur 3: Schema des Wärmepumpen-Prototyps

## Realisierung und Inbetriebnahme des Wärmepumpen-Prototyps und Umbau des Prüfstandes

Der Wärmepumpen-Prototyp wurde im Labor der HSLU T&A aufgebaut, mit der erforderlichen Mess- und Regeltechnik ausgestattet und erfolgreich in Betrieb genommen. Parallel zum Aufbau des Prototyps wurde der Prüfstand zur Konditionierung verschiedener Luftzustände modifiziert und das im Vorjahr erstellte Wärmemodul in den Prüfstand eingebunden. Erste Testmessungen zeigen, dass die Dynamik der Luftkonditionierung deutlich erhöht werden konnte. In der Luftaufbereitungsanlage werden Verdampfer und Ventilator der Wärmepumpe in einem geschlossenen Kreislauf (Primärkreis) betrieben. Die Luft im Primärkreis wird dabei durch den Verdampfer der Wärmepumpe abgekühlt und entfeuchtet. Durch Beimischen wärmerer und feuchterer Luft aus einem zweiten Kreislauf (Sekundärkreis) wird der Zustand (Temperatur, Feuchte) des in die Wärmepumpe eintretenden Luftstroms eingestellt. Im Sekundärkreislauf wird die Luft über einen Lamellenwärmetauscher mit warmer Sole (Ethylenglykol-Wasser) aus dem Wärmemodul aufgeheizt. Die Befeuchtung erfolgt durch die Zerstäubung von Wasser direkt in den Luftstrom. Das gewählte Verfahren bietet den Vorteil, dass unabhängig vom Volumenstrom durch die WP im Sekundärkreis eine hohe Strömungsgeschwindigkeit und somit eine hohe

Dynamik aufrechterhalten werden kann. Zudem lässt die wesentlich höhere Temperatur im Sekundärkreislauf auch bei Wärmepumpen-Eintrittstemperaturen unter 0°C eine Befeuchtung mit Tropfen zu. Der überarbeitete Prüfstand bietet die Möglichkeit Luft mit Temperaturen von bis zu -11°C und 80% relativer Feuchtigkeit zu konditionieren. In Fig. 4 ist der Prüfstand schematisch dargestellt. Figur 5 zeigt den Aufbau des Prüfstandes zusammen mit dem Wärmepumpen-Prototypen im Labor der HSLU T&A.



Figur 4: Schematische Darstellung des Wärmepumpen-Prüfstandes



Figur 5: Prüfstand und Wärmepumpen-Prototyp im Labor der HSLU T&A

## Entwicklung einer praxisreifen Abtauregelung für L/W-WP

Mit der Entwicklung der praxisreifen Abtauregelung für L/W-WP wurde begonnen. Dabei wurde das Simulationsprogramm intensiv genutzt und weiter modifiziert. Mit dem Simulationsprogramm kann der Heizbetrieb mit anschliessender Abtauung zeitlich simuliert und die Effizienz des Gesamtzyklus (voraus)berechnet werden. Auf diese Weise kann sowohl der optimale Zeitpunkt zur Einleitung der Abtauung, als auch das optimale Abtauverfahren (Prozessumkehr oder Ventilatornachlauf) für einen gegebenen Luftzustand und Betriebszustand der Wärmepumpe ermittelt werden. Geeignete Ansätze für die Entwicklung wurden evaluiert, welche in einem nächsten Schritt umgesetzt und in die Regelung des Wärmepumpen-Prototypen implementiert werden sollen.

# **Internationale Zusammenarbeit**

In diesem Projekt arbeitet die HSLU T&A mit folgenden Partnern zusammen:

- Emerson Climate Technologies GmbH, Holzhauser Strasse 180, D-13509 Berlin
- Ziehl-Abegg Schweiz AG, Limatstrasse 12, 8957 Spreitenbach

-

Das Projektteam wird von beiden Industriepartnern mit modernster Technologie und Know-how unterstützt. Die Emerson Climate Technologies GmbH unterstützte das Projektteam bei der Entwicklung des Wärmepumpen-Prototypen intensiv und stellte einen modernen Kompressor inkl. Steuergerät, elektronische Expansionsventile und vieles Mehr zur Verfügung. Die Ziehl-Abegg Schweiz AG lieferte die Ventilatoren der Luftaufbereitungs-Anlage sowie zwei verschiedene Ventilatoren für den Wärmepumpen-Prototypen.

## **Bewertung 2009 und Ausblick 2010**

Sämtliche für dieses Jahr vorgesehenen Arbeitspakete konnten erfolgreich bearbeitet werden. Das Simulationsprogramm wurde nebst der Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr durch die Regelung der Ventilatordrehzahl sowie durch die Regelung des Kältemitteldurchsatzes modifiziert. Diese Modifikationen erlaubten eine zielgerichtete und zuverlässige Entwicklung des Wärmepumpen-Prototyps. Besonders erwähnenswert ist die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit mit den Industriepartnern. Der Prüfstand wurde so modifiziert, dass der Bereich möglicher Luftzustände für Messungen erweitert und die Dynamik verbessert werden konnte. Dies wird sich insbesondere bei der experimentellen Untersuchung der Abtauprozesse mit Ventilatornachlauf positiv auswirken. Einzig die Entwicklung der praxisreifen Abtauregelung konnte nicht soweit vorangetrieben werden, dass diese bereits im Wärmepumpen-Prototyp implementiert werden kann. Es wurden jedoch wertvolle Ansätze und weitere Erkenntnisse zur Erreichung effizienterer Abtauprozesse erarbeitet.

## **Ausblick 2010**

Für das Jahr 2010 sind folgende Arbeitsschritte vorgesehen.

### **1. Durchführung detaillierter Messreihen am Wärmepumpen-Prototyp**

Umfangreiche Messreihen werden bei unterschiedlichen Luftzuständen (Temperatur und Feuchtigkeit) und Betriebsbedingungen der Wärmepumpe für die im Arbeitspaket „Definition der Wärmequelle und -senke“ ermittelten Heizkurven durchgeführt. In einer ersten Messreihe wird mit ungeregelten Kompressor und konstanter Ventilatordrehzahl im Ein/Aus-Betrieb gefahren. In einem weiteren Schritt wird lediglich der Kältemitteldurchsatz geregelt, während die Ventilatordrehzahl konstant bleibt. Schlussendlich wird die simultane Regelung von Kältemittelmassenstrom und Ventilatordrehzahl in Abhängigkeit der geforderten Heizleistung untersucht. Ein detailliertes Messprogramm wird zurzeit erstellt.

### **2. Validierung und Optimierung des Simulationsprogramms**

Das in LOREF 2 erarbeitete und durch die Abtauung mit Ventilatornachlauf und Prozessumkehr sowie durch die Regelung der Ventilatordrehzahl und des Kältemitteldurchsatzes erweiterte Simulationsprogramm wird validiert. Dabei wird auf die durchgeführten Messreihen zurückgegriffen und notwendige Anpassungen im

Simulationsprogramm vorgenommen. Dieser Schritt ist notwendig, damit die Anzahl der Messreihen bei der Entwicklung des Regelalgorithmus auf ein Minimum reduziert werden kann.

### **3. Entwicklung der Regelalgorithmen für verschiedene Regelstrategien**

Mit Hilfe des Simulationsprogramms sowie der aufgenommenen Messreihen werden geeignete Regelalgorithmen für die verschiedenen Regelstrategien (alleinige Regelung des Kältemitteldurchsatzes, simultane Regelung des Kältemitteldurchsatzes und der Ventilatordrehzahl) entwickelt. Die Regelung soll zu jedem Zeitpunkt eine optimale Effizienz der Wärmepumpe gewährleisten. Außerdem soll die Abtauregelung, welche zurzeit entwickelt wird, implementiert werden, so dass die Regelung zusätzlich in der Lage ist den optimalen Abtauprozess zum richtigen Zeitpunkt einzuleiten und die Abtauung zum optimalen Zeitpunkt zu beenden.

### **4. Durchführung der Messreihen mit integrierter Regelung von Kältemitteldurchsatz und Ventilatornachlauf**

Die entwickelten und in LabView programmierten Regelalgorithmen werden am Wärmepumpen-Prototyp getestet. Das Ziel ist, dass die Regelung autonom den optimalen Betriebszustand regelt sowie den richtigen Abtauprozess zum optimalen Zeitpunkt einleitet und wieder abbricht. Im Heizbetrieb werden dabei entweder nur der Kältemitteldurchsatz oder aber der Kältemitteldurchsatz und die Ventilatordrehzahl simultan geregelt. Mit weiteren Messreihen wird die Funktionalität der Regelung nachgewiesen und diese ggf. weiter optimiert.

### **5. Abschätzung des wirtschaftlichen Potentials**

Das wirtschaftliche Potenzial der L/W-WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung wird abgeschätzt und für den Hersteller sowie den Nutzer transparent dargestellt. Es wird aufgezeigt wie hoch die Mehrinvestitionen der leistungsgeregelten L/W-WP im Vergleich zu herkömmlichen L/W-WP sind. Ebenfalls ausgewiesen werden die Amortisationszeit und das resultierende Einsparpotenzial, welche wichtige Verkaufsargumente darstellen.

### **6. Erstellung detaillierter Auslegungs- und Planungsgrundlagen und Schlussbericht**

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit werden im Schlussbericht dokumentiert. Dabei wird besonders auf die Planungsrichtlinien zur Realisierung einer leistungsgeregelten L/W-WP in der Praxis eingegangen. Eine Wegleitung für die Dimensionierung und Auswahl sämtlicher Komponenten, sowie für die Regelung effizienter Luft/Wasser-Wärmepumpen mit kontinuierlicher Leistungsregelung wird erstellt. Ein Beitrag für eine wissenschaftliche Konferenz im Bereich Wärmepumpen-Technologie sowie ein Fachartikel für ein breites Publikum werden verfasst.

## **Referenzen**

1. L. Berlinger, M. Imholz, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker: LOREF – Lamellenluftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen, Bundesamt für Energie, 2008.
2. R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker: LOREF – Lamellenluftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 2: Mathematisch-physikalische Simulation des Lamellenluftkühlers mit Kondensat- und Frostbildung, Bundesamt für Energie, 2008.
3. L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker: WEXA – Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen, Bundesamt für Energie, 2008.
4. L. Gasser, B. Wellig: Exergie-Analyse: Wegweiser zu effizienten Heizsystemen mit Wärmepumpen, 15. Status-Seminar „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen“, Zürich, 2008.
5. B. Wellig, M. Imholz, M. Albert, K. Hilfiker: Defrosting of FinTube Evaporators for Air/Water Heat Pumps by Ambient Air, 9th IEA Heat Pump Conference, Zurich, 2008.

## **Anhang**

-