



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 11. Dezember 2009

Dynamischer Wärmepumpentest

Phase 3 und 4

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm «Wärmepumpen, WKK, Kälte»
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, CH-9471 Buchs

Auftragnehmer:

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB
Werdenbergstrasse 4
CH-9471 Buchs
www.ntb.ch

Autoren:

Dipl. Ing. (FH) Michael Uhlmann, NTB
Prof. Ph.D. Stefan Bertsch, NTB, stefan.bertsch@ntb.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153578 / 102073

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

Abstract

Das zyklische Ein- und Ausschalten von Wärmepumpen zur Anpassung der Heizleistung an den Wärmebedarf führt zu einer jährlichen Minderleistung von 5-30%. Um die Effizienz von Wärmepumpen zu optimieren ist es wichtig, die Einflussfaktoren zu erkennen und deren Auswirkungen zu verstehen. Aus diesem Grund wird ein physikalisches, dynamisches Wärmepumpenmodell erstellt und mit entsprechenden Messungen validiert.

Im Projektjahr 2009 wurde ein neues physikalisches Modell erstellt, das aus vier Teilmodellen besteht und auf leicht messbaren physikalischen Eingabeparametern aufbaut. Diese Parameter für Verdichter, Verdampfer, Kondensator und Expansionsventil sind meist sogar in Produktdatenblättern zu finden. In einem ersten Schritt wurde eine "Forward-time-step" Methode zur Lösung versucht. Diese führte jedoch zu sehr kurzen Zeitschritten und dadurch langen Berechnungszeiten. Aus diesem Grund wurde der Lösungsalgorithmus für eine "central time step" Methode eingesetzt, die stabile Resultate liefert und schneller als Echtzeit abläuft. Verdampfer und Kondensator wurden als Zwei-Zonen Modelle und der Verdichter als Objekt mit zwei Massen für Saugseite und Hochdruckseite implementiert.

Labormessungen an zwei verschiedenen Luft/Wasser Wärmepumpen wurden zusätzlich zu den extensiven Messungen während der zweiten Projektphase durchgeführt. Auch im Feld wurde eine Sole/Wasser Wärmepumpe mit Sensoren ausgestattet, um in der Wintersaison 2009/2010 Messungen durchzuführen. Obwohl die Messeinrichtung problemlos funktioniert, konnten bisher nur wenige Daten gesammelt werden, da die Heizung auf Grund der hohen Umgebungstemperaturen nur kurzfristig im Betrieb war.

Mit dem validierten Modell soll eine parametrische Studie durchgeführt werden, um Optimierungsvorschläge für die Reduktion dynamischer Verluste bei Wärmepumpen zu erstellen. In einem zweiten Effort soll die Regelungsstrategie von Wärmepumpen untersucht und optimiert werden.

Summary

The reduction in heating capacity due to on/off cycling of a heat pump can lead to a performance reduction of 5-30%. It is important to understand the amount of influence of the most important parameters in order to improve the performance of heat pumps with respect to on/off cycling so that appropriate measures can be taken. Therefore a physics based model was developed in the first two phases of this project and validated with according measurements. While this model covers the fundamentals of the process, it was found, that not all parameters were difficult to extract and in addition numerical problems were encountered when calculating the results.

During the year 2009 a physics based model was developed. The four part models for compressor, evaporator, condenser and expansion device use first parameters, which can be easily measured or extracted from datasheets. As a first try a forward time step method was used but found to be very sensitive to the time step length. Therefore it was substituted by a central time step method that is leading to very stable solutions and calculation times shorter than the real time process. Evaporator and condenser were described as two zone models and the compressor consists of two mass fractions for suction and discharge side.

Laboratory measurements on two different air-source heat pumps were carried in addition to the extensive testing conducted in the second phase of the project. Test equipment was installed in the field in order to measure a geothermal heat pump during winter 2009/2010. The measurement is working well, but so far only few data could be collected due to the very high ambient temperatures in fall.

With the validated model parametric studies should be carried out to make suggestions of how to improve the construction of heat pumps with respect to cycling losses. A second effort is to improve the control strategy by suggesting an optimized timing interval for on/off cycling and finally there have been several requests for a simple loss-model that can be used in annual simulation programs.

Projektziele

Die überwiegende Mehrheit von heute eingesetzten Klein-Wärmepumpen regelt die Leistung durch zyklisches Ein- und Ausschalten. Dieses **Takten der Wärmepumpen führt zu Wärmeverlusten** und Ineffizienzen. Laut bisheriger Abschätzungen in den früheren Phasen dieses Projektes kann die Minderleistung im **Bereich von 5-30%** [1] liegen. Durch eine optimierte Steuerung der Wärmepumpen ergibt sich aus diesem Grund ein beträchtliches Energiesparpotential.

Ziel dieser Arbeit ist es die bedeutenden Einflussfaktoren auf die Minderleistung im Taktbetrieb zu erkennen und deren Auswirkungen zu verstehen. Aus diesem Grund wird ein dynamisches Wärmepumpenmodell erstellt, das die dynamischen Prozesse abbildet. Um das Modell zu validieren werden entsprechende Messungen im Labor und Feld durchgeführt. In den ersten beiden Phasen dieses Projektes [1-4] wurden die theoretischen Grundlagen untersucht, ein Modellansatz erstellt und Messungen zur Validierung der Ergebnisse durchgeführt. Bei der Auswertung stellte sich jedoch heraus, dass die gewählten mathematischen Modelle nicht alle physikalischen Randbedingungen erfassen und auch zu numerischen Problemen bei der Lösung des Gleichungssystems führen.

In der **Phase 3** des Projektes, die grösstenteils im Jahr 2009 durchgeführt wird, soll der bestehende **Simulationsansatz für Luft-Wasser Wärmepumpen** überprüft und weiterentwickelt werden. Es geht vor allem darum ein robustes und einfaches Modell zu erhalten, das mittels Angaben aus Komponenten-Datenblättern an eine konkrete Wärmepumpe angepasst werden kann. Messungen zur Validierung des Modells stammen einerseits aus der zweiten Phase des Projekts. Andererseits wurden in Phase 3 auch **Messungen an zwei Wärmepumpen** in der Klimakammer des Wärmepumpen Testzentrums (WPZ) durchgeführt. Eine Erweiterung des bestehenden Prüfumfangs der Wärmepumpenprüfungen wie in einer früheren Projektphase vorgeschlagen, wird nicht angestrebt, da dies zu erheblichen Mehrkosten führen würde.

Das angestrebte Modell verfolgt zwei Zielrichtungen: Einerseits soll ein physikalischer Ansatz gefunden werden, der das Anfahren der Wärmepumpe abbildet und eine Optimierung des Kältekreislaufs zulässt. Andererseits soll ein mathematischer Ansatz gefunden werden, der die Minderwärmeproduktion als Funktion der Taktrate und Taktlänge darstellt. Dieser Ansatz soll Grundlage optimierter Regelalgorithmen von Wärmepumpen werden.

In **Phase 4** wird der **Einfluss des Taktbetriebs auf Sole-Wasser Wärmepumpen** untersucht. Der Hauptunterschied zur Untersuchung von Luft-Wasser Wärmepumpen liegt in der Regenerationsfähigkeit der Wärmequelle, die sich positiv auf den Taktbetrieb auswirken kann. Neben der Modellbildung sind auch Feldmessungen vorgesehen die zur Validierung des Ansatzes benötigt werden.

Im Jahre 2009 wurde ein dynamisches Modell für Luft-Wasser Wärmepumpen erstellt. Dieses physikalische Modell hat eine zeitliche Auflösung im Bereich von Zehntel Sekunden und führt zu robusten und plausiblen Simulationsresultaten. Um eine Validierung dieses Modells, das nur auf Angaben aus Produktdatenblättern basiert, zu ermöglichen, wurden Messungen in der Klimakammer durchgeführt. Diese Messungen an zwei verschiedenen Wärmepumpen stimmen qualitativ und quantitativ mit dem Simulationsmodell gut überein. Des Weiteren wurde eine Sole-Wasser Wärmepumpe im Feld instrumentiert. Diese Messwerte sollen verwendet werden, um ein dynamisches Modell für Sole-Wasser Wärmepumpen zu validieren. Dieses Simulationsmodell wird im Jahr 2010 in Phase 4 entwickelt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Erstellung eines dynamischen Luft-Wasser Wärmepumpenmodells

Aufbauend auf der Analyse der bestehenden Simulationsmodelle wurden die Hauptkomponenten einer Luft-Wasser Wärmepumpe nachgebildet. Der Verdampfer wurde in zwei Bereiche unterteilt, einer in dem das Kältemittel verdampft und der zweite in dem das Kältemittel überhitzt wird. Der Kondensator wird in einen Kondensationsteil und einen Unterkühlungsteil unterteilt. Diese Unterteilung ist vor allem aus dem Grund wichtig, da der Kondensator auch als Kältemittel-Sammler dient. Der Verdichter wurde ebenfalls in zwei Teile unterteilt, den Sauggasbereich mit Motor und den Hochdruckbereich mit dem Verdichtungsmechanismus. Die Simulationssoftware wurde von einem expliziten Lösungsalgorithmus auf einen impliziten Algorithmus umgestellt, um die Stabilität des Codes zu erhöhen und die Berechnungszeit zu reduzieren. Abbildung 1 zeigt den Unterschied zwischen expliziter Methode (forward-time-step) und impliziter Methode (central-time-step).

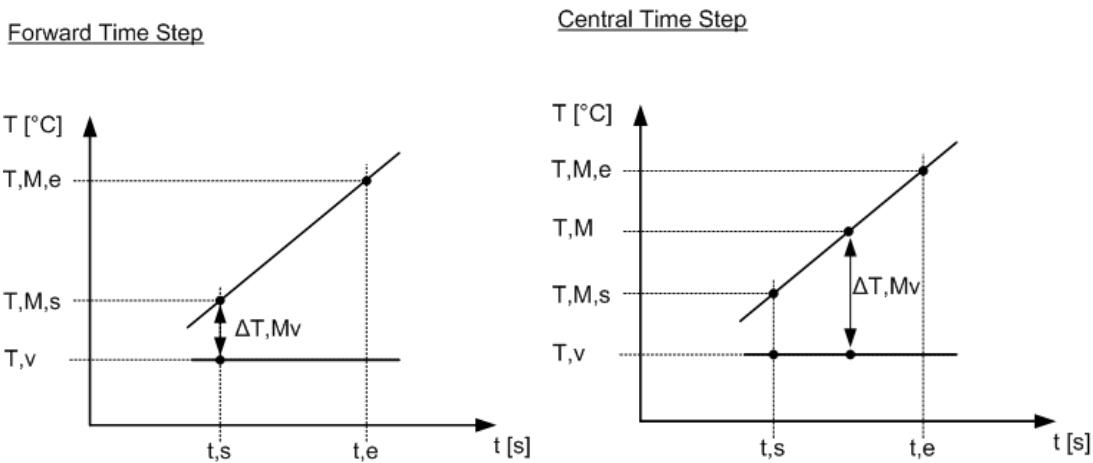


Abb.1: Explizite und implizite Lösungsmethode für dynamische Simulationen.

Die nachfolgende Liste gibt die wichtigsten Inputparameter für das Modell an. Diese Größen können direkt aus Datenblättern gewonnen werden. Wie geplant sind keine zusätzlichen Messungen an Wärmepumpen nötig, um die Parameter zu bestimmen.

- Kompressor
 - Leistungsdaten
 - Masse
 - Abmessungen
- Kondensator
 - Masse
 - Abmessungen
 - Anzahl der Platten
 - Plattenfläche
 - Plattenabstand
 - Inneres Volumen
- Expansionsventil
 - Ventilkonstante
- Verdampfer
 - Masse
 - Oberfläche

- Lamellenabstand
- Rohrdurchmesser und Länge

Validierung neues Modell (LW)

Um die Simulationssoftware zu validieren wurden bereits in der zweiten Projektphase Messungen an einer Wärmepumpe durchgeführt. Zusätzlich zu diesen Messungen wurden noch zwei weitere Wärmepumpen in Phase 3 des Projektes ausgemessen, um eine breitere Vergleichsbasis für die Validierung zu haben. Die ersten Vergleiche zwischen Messung und Simulation zeigen sowohl eine qualitative als auch quantitative Übereinstimmung der Resultate. Geringe Anpassungen im Modell sind jedoch noch nötig, um die Abweichungen zwischen Messung und Modell zu minimieren

Berichte, Tagungen und Veröffentlichungen

Das Projekt wurde an der Wärmepumpentagung in Burgdorf präsentiert und auch in mehreren Kurzpräsentationen (1. Vorarlberger Energieforum, Fachtag Energie des energy-cluster, Bluetech, IEA Task 44 Definition Meeting) erwähnt. Das Feedback zum Projekt war sehr positiv und mehrere Forschungsgruppen haben bereits grosses Interesse an den Resultaten bekundet.

Feldmessung

Die Planung und Installation der Feldmessung wurde im Herbst abgeschlossen. Die Datenakquisition funktioniert problemlos, allerdings konnten erst sehr wenige Messdaten gewonnen werden, da die Umgebungstemperaturen im Winter bisher sehr hoch lagen. Dies führte nur zu sehr kurzem Heizbetrieb. Abbildung 2 zeigt einen Messstellenplan der instrumentierten Sole-Wasser Wärmepumpe.

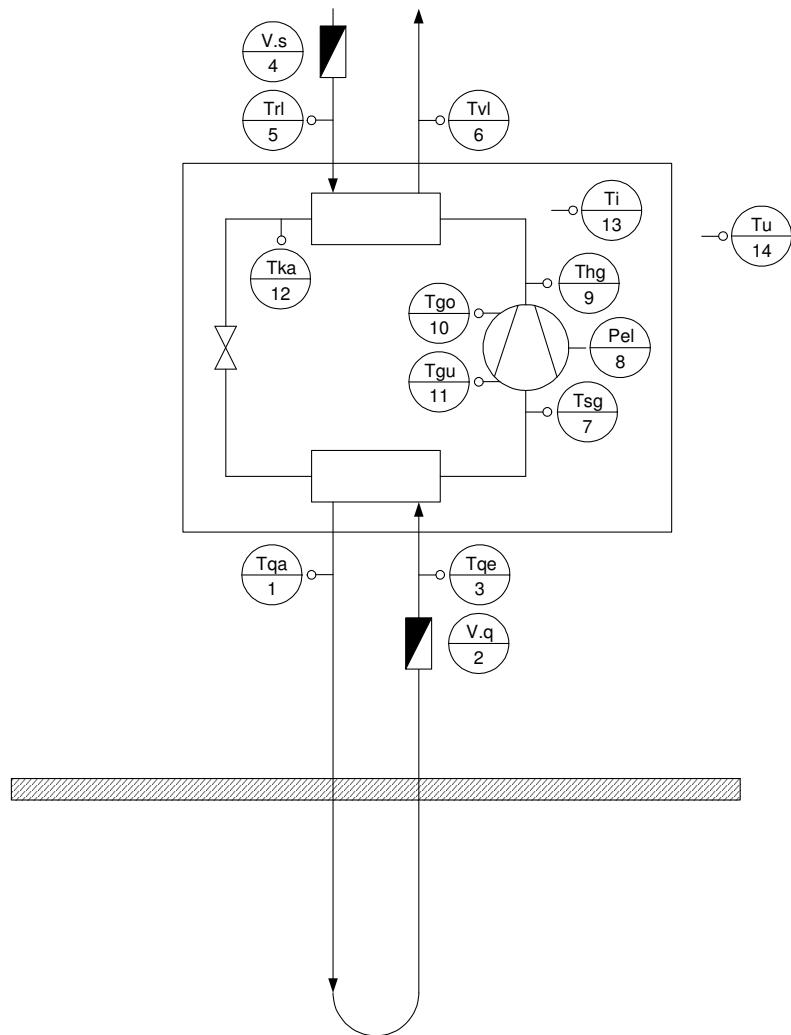


Abb.2: Messstellenplan für die Feldmessung an einer Sole-Wasser Wärmepumpe.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen dieses Projekts wurde keine Zusammenarbeit mit nationalen oder internationalen Forschungsinstitutionen getätigt. Bei Kurzpräsentationen auf verschiedenen einschlägigen Meetings stiess das Projekt jedoch auf grosses Interesse.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Entwicklung des **Simulationsmodells für Luft-Wasser Wärmepumpen hat mehr Zeit als erwartet benötigt**. In einem ersten Ansatz wurde ein Forward-time-step Modell verwendet. Dies hat zu extrem kurzen Zeitschritten geführt, um eine stabile Lösung zu erhalten. Damit einhergehend war die Simulationsgeschwindigkeit sehr langsam. Nach einer Umstellung auf ein implizites Central-time-step Modell erhöhte sich Stabilität und Rechengeschwindigkeit drastisch. Diese Umstellung ging jedoch mit einem erheblichen Zeitaufwand einher. Durch eine **speditive Abwicklung von Labormessung und Feldmessung**, konnte jedoch wieder einige Zeit eingespart werden, sodass dem **zeitgerechten Abschluss des Projektes Im Jahr 2010 im Moment nichts im Wege steht**. Für das folgende Jahr stehen die Modellierung und Validierung der Sole-Wasser Wärmepumpe an. Auch für die Luft-Wasser Wärmepumpe soll die Validierung noch abgeschlossen werden. Mit Hilfe der verifizierten Modelle sollen dann parametrische Studien durchgeführt werden, um Empfehlungen für Wärmepumpenhersteller daraus abzuleiten.

Referenzen

1. B. Gubser, M. Ehrbar, Dynamischer Wärmepumpentest, Phase1, Etappe 1: Ergebnisse der Literaturrecherche; Schlussbericht, Bundesamt für Energie; 1997.
2. B. Gubser, L. Wirth, M. Ehrbar, Dynamischer Wärmepumpentest, Phase1, Etappe 2: Modellbildung; Schlussbericht, Bundesamt für Energie; 1999.
3. E. Shafai, D. Zogg, M. Ehrbar, L. Wirth, Dynamischer Wärmepumpentest, Phase1, Etappe 3: Modellansatz für die prüftechnische Charakterisierung der Minderwärme-produktion; Schlussbericht, Bundesamt für Energie; 2000.
4. B. Hubacher, M. Ehrbar, Dynamischer Wärmepumpentest, Phase2: Validierung des Modellansatzes und Entwicklung einer Prüfprozedur; Schlussbericht, Bundesamt für Energie; 2001.