



EXERGIEANALYSE DER WÄRMEPUMPE IM SCHULHAUS LIMMAT

Jahresbericht 2008

Autor und Koautoren	Dr. Markus Friedl
beauftragte Institution	awtec AG für Technologie und Innovation
Adresse	Leutschenbachstr. 48, 8050 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 307 4066, Markus.Friedl@awtec.ch, www.awtec.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	102'624 / 153'407
BFE-Projektbegleiter	Th.Kopp, externer F&E-Programmleiter
	Ressortforschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
Dauer des Projekts (von – bis)	Juni 2008 bis April 2009
Datum	5. Dezember 2008

ZUSAMMENFASSUNG

Das Schulhaus Limmat in Zürich ist ein Altbau, in dem seit Januar 2006 mit einer Propanwärmepumpe 90 % der Energie für Heizung und Warmwasser bereitgestellt werden. Die Anlage hat Pilotcharakter, da sie einige spezielle Eigenschaften aufweist:

- Es wird das natürliche Arbeitsmedium Propan verwendet, das sich aufgrund Vorbehalte am Markt bezüglich Brennbarkeit noch nicht durchsetzen konnte.
- Als Wärmequelle dient der nahe Hauptkanal der städtischen Kanalisation, der eine typische Temperatur von 14 °C liefert. Das ist für eine Wärmepumpe eine optimale Bedingung auf der Seite der Wärmequelle.
- Die Vorlauftemperatur ist mit 65 °C typisch für einen Altbau, jedoch für eine Wärmepumpe ungünstig.

Dieses Projekt hat zum Ziel, mit einer Exergieanalyse die Wärmepumpe und die Hydraulik zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten für die bestehende Anlage und für zukünftige Projekte aufzuzeigen.

Im Jahr 2008 wurden die Messwerte plausibilisiert und ein Fehler in der Datenerfassung und –visualisierung behoben. Der Kältemittelkreislauf wird nun theoretisch abgebildet. Ob Realität, Messwerte und das auf den Messwerten beruhende theoretische Modell übereinstimmen, wird mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik verifiziert, der auch im Modell erfüllt sein muss.

Bei den Arbeiten im Jahr 2009 wird die Exergieanalyse auf die Hydraulik ausgedehnt und mit dem Modell Varianten der Anlage gerechnet. Das Resultat sind Empfehlungen für Verbesserungen in der bestehenden und in zukünftigen Anlagen.

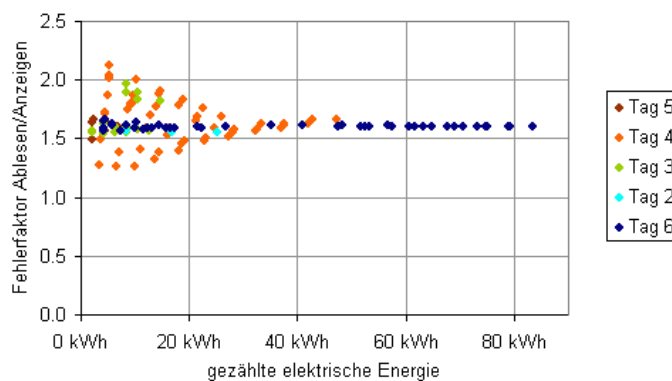
Projektziele

Die Wärmepumpe im Schulhaus Limmat wurde nachträglich eingebaut. Die Hydraulik auf Gebäude-seite war vor Einbau der Wärmepumpe durch einen Gasbrenner beheizt und wurde beim Einbau der Wärmepumpe nicht verändert. Die Anlage ist genauer beschrieben in [3] Renold (2005), [4] Renold (2008), [5] Stadt Zürich (2006), [1] Ochsner (2006a) und [2] Ochsner (2006b).

Es ist das Ziel dieses Projektes, die Messwerte im Schulhaus Limmat zu verifizieren, die Wärmepumpe und die Hydraulik mittels einer Exergieanalyse zu untersuchen, den Einfluss der verschiedenen Komponenten auf die Effizienz herauszuarbeiten und allfällige Verbesserungspotentiale aufzuzeigen. Das Ergebnis wird eine Aufschlüsselung der Exergieverluste auf die verschiedenen Komponenten der Anlage sein sowie allfällige Massnahmen für eine weitere Steigerung der Effizienz. Es werden Empfehlungen ausgearbeitet, wie in Zukunft bei ähnlichen Vorhaben vorgegangen werden kann.

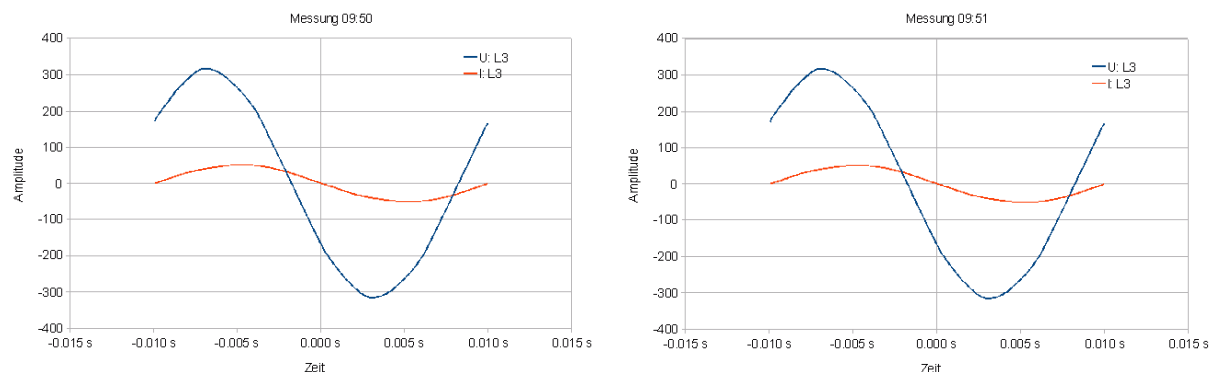
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Bereits vor dem Projektstart bestand die Vermutung, dass die auf www.schulhauslimmat.ch öffentlich zugänglichen COPs zu optimistisch waren. Deswegen wurde von Anfang an eine Plausibilisierung aller Messdaten vorgesehen. Durch Vergleich der Zählerstände mit den auf dem Internet visualisierten Werten wurde der in Gleichung (1) auf Seite 4 definierte Fehlerfaktor berechnet. Für die elektrische Gesamtleistung ist er Figur 1 dargestellt. Der Fehlerfaktor der thermischen Zähler war eins. Daraus ergab sich ein Indiz dafür, dass die elektrische Leistung um einen Faktor 1.6 zu klein erfasst wird und die thermische Leistung richtig erfasst wird. Als Konsequenz davon ist der angezeigte COP um einen Faktor 1.6 zu gross.



Figur 1: Berechneter Fehlerfaktor gemäss Gleichung (1) auf Seite 4 beim Ablesen der Gesamtleistung an 5 Tagen. Der Fehlerfaktor wird umso genauer, je länger das System im stationären Zustand beobachtet wird, also je mehr Leistung gezählt wird.

Um das Indiz zu erhärten und die elektrische Messung durch eine unabhängige Messmethode zu verifizieren, wurden Messungen mit einem KO und einer Abtastrate von 1 MHz durchgeführt. Es bestand der Verdacht, dass die Softstarter der Kompressoren und die Drehzahlregelung gewisser Pumpen hochfrequente Störungen verursachen und die Elektrozähler beeinträchtigen. Diese Befürchtung hat sich als unbegründet erwiesen. Zwei Verläufe von Strom und Spannung sind in Figur 2 gezeigt.



Figur 2: Strom- und Spannungsverlauf bei zwei Kompressoren jeweils bei der Phase 3. Die Amplitude zeigt Volt bzw. Ampère.

Am 4. Dezember 2008 wurde ein Fehler in der Visualisierungssoftware gefunden und behoben. Seit diesem Datum wird der COP auf www.schulhauslimmat.ch korrekt dargestellt. Leider beträgt er nur etwa 2.7 bei den Anfang Dezember herrschenden Wetterbedingungen. Vergleicht man diesen COP mit dem für die vorliegenden Quellen- und Senkentemperaturen erreichbarem theoretischen COP_{Carnot} von 7.2 (Gleichung (2) Seite 4 mit $T_{Quelle} = 14\text{ °C}$, $T_{VL} = 64\text{ °C}$ und $T_{RL} = 56\text{ °C}$), so erhält man einen Gütegrad von 37 %. Das ist ein für Wärmepumpen typischer Wert, was aber nichts daran ändert, dass ein COP von 2.7 zu tief für einen wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpe ist. Das weitere Projekt wird Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen, wie der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Dabei konzentrieren wir uns darauf, die Vorlauftemperatur nach unten zu bringen und den Kältemittelkreislauf optimal zu fahren.

Nationale Zusammenarbeit

Das Projektteam, die Begleitgruppe und die Unterlieferanten stellen ein Netzwerk dar, das im Bereich der Wärmepumpen weit in die Branche hinein reicht.

- Awtec AG für Technologie und Innovation, Zürich
- Hochschule Rapperswil
- Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
- EWZ, Energiecontracting Zürich
- EWZ, Stromsparfond Zürich
- Amstein + Walthert, Zürich, Gebäudetechnikplaner
- MST Systemtechnik, Bern, Spezialist für Leitsysteme von erneuerbaren Energiesystemen
- Torse, Bern, Elektronikarbeiten

Internationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt hat keine internationale Zusammenarbeit.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die Arbeiten im Jahr 2008 waren durch das Hinterfragen der vorliegenden Messungen dominiert. Aufgrund von Bauarbeiten am Objekt, musste das Projekt im Sommer ruhen. Es konnte bei den Elektromessungen ein Fehler in der Messdatenerfassung gefunden und korrigiert werden und der Einfluss von hochfrequenten Störungen konnte ausgeschlossen werden.

Zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Berichts, sind die Projektarbeiten bei der Abbildung des Kältemittelprozesses in einem theoretischen Modell angelangt. Dabei müssen Messungenauigkeiten berücksichtigt werden. Als Kontrolle für die Korrektheit aller vorliegenden Messdaten und der korrekten Abbildung des Kreislaufs im Modell dient der erste Hauptsatz der Thermodynamik, der auch im theoretischen Modell erfüllt sein muss.

Im Jahr 2009 wird sich das Projekt auf die Vervollständigung der Exergieanalyse und das Erarbeiten von Verbesserungsmöglichkeiten konzentrieren. Das Absenken der Vorlauftemperatur ist dabei eine Strategie, die im Vordergrund steht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ausreichend Brauch-Warmwasser zur Verfügung stehen muss und der Legionellenproblematik mit der erforderlichen Wassertemperatur von 60 °C (Merkblatt SVGW) Rechnung getragen werden muss. Es wurde festgestellt, dass das Kältemittel im Kondensor nicht vollständig kondensiert, sondern erst nach dem internen Wärmetauscher. Es muss untersucht werden, ob eine Erhöhung der Füllmenge zu einer vollständigen Kondensation im Kondensor führen kann und so der Wirkungsgrad verbessert werden kann.

Referenzen

Die Angaben in eckigen Klammern [] geben die Nummer an, unter welcher das Dokument in der internen Bibliothek von awtec abgelegt ist.

- | | |
|--|----------|
| [1] Ochsner, E. (2006a) Abwasserwärmepumpe mit Propan , Die Kälte und Klimatechnik 6, 2006 | [AWT350] |
| [2] Ochsner, E. (2006b) Abwasserwärmepumpe mit Propan , planer+installateur, Nummer 6/7, 2006 | [AWT709] |
| [3] Renold, P. (2005) Installation einer Wärmepumpe im Schulhaus Limmat, Pflichtenheft , Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Mai 2005 | [AWT219] |
| [4] Renold, P. (2008) Sewage as an energy source , International Energy Agency (IEA) 9th Heat Pump Conference 2008, Paper 8.6, Zürich, May 20-22 2008 | [AWT641] |

Anhang

Es wurde für viele Zeitabschnitte t_{ab} der Fehlerfaktor berechnet zwischen der mit den Elektrozählern ermittelten Leistung $P_{abgelesen}$ und der von der Visualisierung angezeigten Leistung $P_{angezeigt}$ gemäss

$$Fehlerfaktor = \frac{P_{abgelesen}}{P_{angezeigt}} = \frac{(Q_a - Q_b)/t_{ab}}{(P_1 + P_2 + \dots + P_N)/N} \quad (1)$$

wobei Q_a und Q_b die im Abstand t_{ab} abgelesenen Energiezähler zu den Zeitpunkten a und b sind und $P_1, P_2, \dots, P_N$ die auf der Visualisierung während des Zeitraums t_{ab} abgelesenen Leistungen sind.

Der theoretisch maximal erreichbare COP_{Carnot} berechnet sich aus der Temperatur T_{Quelle} der Quelle und aus der Temperatur T_{Senke} der Senke. Die Quelltemperatur T_{Quelle} ist im Falle des Schulhauses Limmat die Temperatur des Abwassers. Die Temperatur T_{Senke} der Senke ist der logarithmische Mittelwert von T_{VL} Vorlauf- und T_{RL} Rücklauftemperatur, wobei das arithmetische Mittel eine gute Näherung ist. Somit ergibt sich die Formel

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Senke}}{T_{Senke} - T_{Quelle}} = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{T_{VL} + T_{RL} - 2 \cdot T_{Quelle}} \quad (2)$$

Der Gütegrad ist definiert als das Verhältnis von wirklich erreichtem COP und theoretisch erreichbarem COP_{Carnot} gemäss

$$Gütegrad = \frac{COP}{COP_{Carnot}} \quad (3)$$