



HEIZEN UND KÜHLEN MIT ERDGEKOPELTEN WÄRMEPUMPEN

Jahresbericht 2006

Autor und Koautoren	Afjei, Th.; Dott, R.; Wemhöner C. (IEBau - FHNW); Huber, A., Altorfer, A. (Huber Energietechnik AG)
beauftragte Institution	Institut Energie am Bau - Fachhochschule Nordwestschweiz (IEBau - FHNW), Huber Energietechnik AG
Adresse	IEBau - FHNW, Sankt-Jakobs Strasse 84, 4132 Muttenz Huber Energietechnik AG, Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich
Telefon, E-Mail, Internetadresse	+41 61 467 43 49 thomas.afjei@fhnw.ch , www.fhnw.ch/habg/iebau / www.igjzh.com
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101367 / 151627
BFE-Programmleiter	Thomas Afjei
Dauer des Projekts (von – bis)	1. September 2005 – 28. Februar 2007
Datum	14. November 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden können traditionell für Heizung und Warmwasserproduktion eingesetzt werden oder darüber hinaus zur Wärmeabfuhr aus dem Gebäude mit Hilfe der Fußbodenheizung. Dies kann entweder passiv über eine Erdsonde geschehen oder aktiv bei simultanem Heiz-/Kühlbetrieb. Mit diesem Projekt sollen Fragestellungen zu sinnvollen Hydraulikschaltungen, zur Dimensionierung und zum optimalen Regelkonzept beantwortet werden.

Die Evaluation aktuell verfügbarer Schaltungen zeigt meist funktionierende, jedoch nicht immer ausreichend einfache Schaltungen. Zum angewandten Regelkonzept gibt es nur sehr wenige Angaben. Basierend auf Lastverläufen für ein Referenzgebäude Einfamilienhaus weist die Sondensimulation die Kühlung mit Erdsonden in den meisten Fällen als ausreichend aus. Wichtig für eine weitestgehende Nutzung der passiven Kühlung aus der Erdsonde ist die maximale Ausnutzung der vorhandenen Temperaturdifferenz zwischen Raum und Erdreich, ohne dass diese beispielsweise durch einen schlechten Wärmetauscher unnötig verringert wird. Fußbodenheizungen mit Niedertemperaturauslegung und Selbstregeleffekt haben hierbei einen Vorteil gegenüber den heute noch weiter verbreiteten Systemen mit Thermostatventilen. Für beide Systeme ist auch für den Kühlbetrieb eine Leistungsanpassung (Kühlkurve) empfehlenswert. Die Umschaltung zwischen Heiz- & Kühlbetrieb kann neben der heute üblichen Handumschaltung auch automatisch mit einer zwischen Heiz- & Kühlbetrieb liegenden Totzeit ohne energetischen Mehraufwand realisiert werden.

Der Schlussbericht wird eine Zusammenfassung der wichtigsten Empfehlungen und Kennwerte enthalten.

Projektziele

Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden werden heute in der Regel monovalent für Heizung und Warmwasserproduktion eingesetzt. Dabei wird auch im Sommer die Erdwärmesonde als Wärmequelle für die Warmwasserproduktion verwendet und dabei das Erdreich heruntergekühlt. Alternativ dazu wäre es bei Kühlbedarf des Gebäudes auch möglich, die Wärme mit Hilfe der Fußbodenheizung aus dem Gebäude abzuführen und für die Warmwasserproduktion zu verwenden. Diese sanfte Kühlung des Gebäudes ist sowohl aus energetischer, wie auch im Hinblick auf die Investitionskosten sehr interessant, da die Kälteerzeugung mit dem Verdampfer einer serienmässigen Heizungswärmepumpe erzeugt wird und diese nur bei Warmwasserbedarf zugeschaltet wird. Weil die Abwärme des Kühlprozesses vollständig zur Wassererwärmung genutzt wird, entsteht kein namhafter Mehrverbrauch an elektrischer Energie. Der energetische Wirkungsgrad der Wärmepumpe für die Warmwasserproduktion kann bei richtiger Auslegung sogar grösser sein als bei einem Betrieb mit der Erdwärmesonde, da im Sommer die Fußbodentemperaturen höher sind als die Erdreichtemperaturen. Die Erdwärmesonden andererseits haben so eine grössere Regenerationszeit, da sie im Sommer weniger lang als Wärmequelle für die Warmwasserproduktion dienen müssen. Zudem können sie im Kühlbetrieb auch aufgeladen werden.

In den Bereichen Hydraulikschaltungen, Dimensionierung und Regelkonzept sind noch Wissenslücken, die mit diesem Projekt gefüllt werden sollen.

1. Evaluation der heute erhältlichen erdgekoppelten Wärmepumpen mit Kühlfunktion und deren hydraulischen Schaltungen. Entwickeln weiterer Lösungsansätze mit freier Kühlung und aktiver Kühlung bei Warmwasserproduktion.
2. Erstellen des Heiz- und Kühllastverlaufs eines Referenzgebäudes.
3. Sondensimulationen unter Zugrundelegung der Lastverläufe.
4. Aufstellen von Regelkonzepten für die Simulation.
5. Systemsimulation von Varianten mit passiver Kühlung mit Erdsonde, aktiver Kühlung mit Wärmepumpe bei gleichzeitiger Warmwasser-Erzeugung, aktive Kühlung mit Wärmepumpe bei Warmwasser-Erzeugung und passive Kühlung mit Sonde in der übrigen Zeit (Kombination Variante 1 und 2) sowie zusätzliche Variante mit aktiver Kühlung durch Wärmepumpe auch ausserhalb der Warmwasser-Produktionszeit.
6. Kosten-Nutzen-Betrachtung
7. Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsempfehlungen und Kennwerte.

Im Berichtsjahr 2006 sollen die wesentlichen Ergebnisse erarbeitet und ein Entwurf für den Schlussbericht fertig gestellt werden.

Ausgangslage

Für die im Projekt durchgeföhrten Betrachtungen zu Energiebedarf und Regelkonzepten beschreiben die folgenden Punkte die Ausgangslage der heute üblichen Praxis bzw. die Abgrenzung des Projektes:

- Die Auslegung der Anlage basiert auf dem Heizfall (auch für den Kühlfall).
- Das Regelkonzept der Fußbodenheizung basiert auf dem Heizfall (Entscheidung Thermostatventil (THV) oder Selbstregeleffekt).
- Im Heizfall ist mit Selbstregeleffekt & entsprechend geringen Übertemperaturen eine bessere Effizienz erreichbar (höherer COP der WP, i.d.R. korrekt eingestellte Heizkurve).
- Im Kühlfall ist dank der geringen „Auslegungsübertemperatur“ bei Systemen mit Selbstregeleffekt eine weiter reichende Ausnutzung der Erdkälte erreichbar.
- Die Mehrheit der Fußbodenheizungssysteme wird heute mit THV realisiert.
- Innen liegende Badezimmer mit Fußbodenheizung haben häufig kein THV.
- Bei mehreren zentral versorgten Häusern sind Unterstationen üblich, die die Regeltechnik für das jeweilige Haus beinhaltet

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Hydraulische Schaltungen

Die hydraulischen Schaltungen von Wärmepumpe und Erdsonde sollen einzelne oder alle der folgenden vier grundlegenden Betriebsarten erfüllen können: Heizbetrieb; Passiver Kühlbetrieb; Aktiver Kühlbetrieb; Kühlbetrieb mit paralleler Warmwasserbereitung

Die einfachste und aktuell am häufigsten angebotene Schaltung stellt neben dem einfachen Heizbetrieb eine passive Kühlfunktion bereit. Hierbei gibt es verschiedene Varianten der Einbindung: Die Erdsonde kann vor oder nach der Wärmepumpe (Beispiel siehe Fig. 1) an das Heizsystem angekoppelt werden. Die Leistungsregelung mittels Mischer kann nach der Erdsonde (siehe Fig. 1) oder im Wärmeabgabe/-aufnahmesystem nach dem Wärmetauscher erfolgen

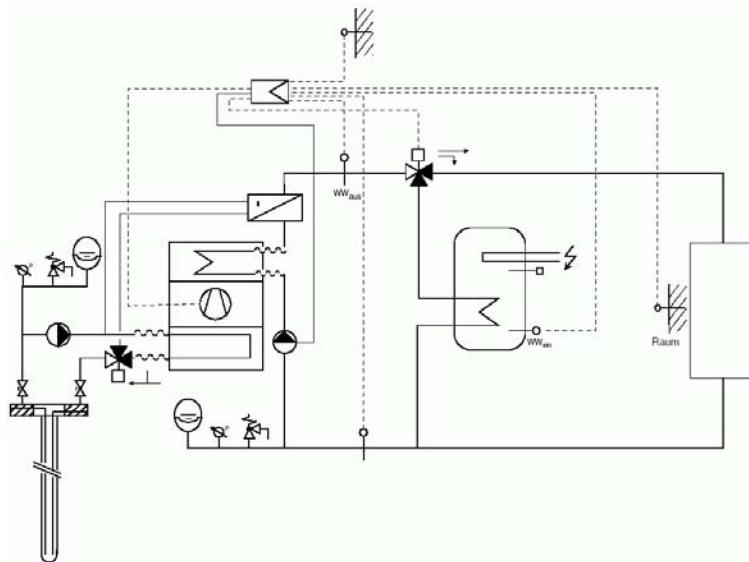


Fig. 1: Schaltschema für Heizbetrieb und alternativ passive Kühlung

Die Frage der Leistungsregelung spielt bei Systemen mit passiver Kühlfunktion und Raumthermostaten eine wichtige Rolle. Würde die Kühlfunktion nur in einem Raum freigegeben, könnte ohne Leistungsregelung der Raum zu kalt werden.

Fig. 2 zeigt eine Schaltung bei der die Leistungsregelung über ein Mischventil im Sondenkreislauf sichergestellt ist und durch die mögliche Abkopplung des Raumheizkreises ein zeitlich paralleler Betrieb von aktiver Kühlung und Warmwasserbereitung realisiert werden kann. Im parallelen Betrieb Kühlung und Warmwasserbereitung ist wiederum durch das Mischventil im Sondenkreislauf sichergestellt, dass bei zu geringem Wärmebezug aus dem Raum in der Wärmepumpe keine Tiefdruckstörung auftritt, da auch Wärme aus der Sonde bezogen werden kann.

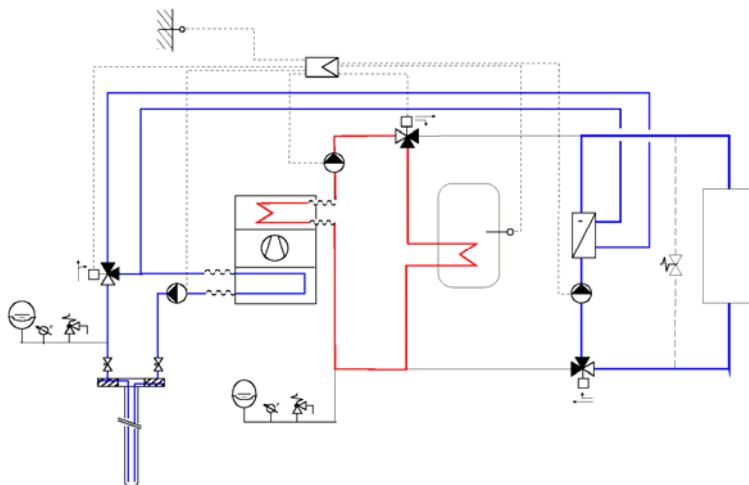


Fig. 2: Schaltschema für Heizbetrieb, passive Kühlfunktion (blau, dünne Linie) kombiniert mit aktiver Kühlung (blau, dicke Linie) und simultaner Warmwassererzeugung (rot)

Soll der gleichzeitige Betrieb von Warmwasserbereitung und Kälteerzeugung genutzt werden so sollten nach der Wärmepumpe erst die Erdsonde und dann der Fußbodenkreis geschaltet sein. Damit ist der Fußbodenkreis frostgeschützt und die Wärmepumpe arbeitet mit geringfügig besserem COP.

Aus der Evaluation der heute erhältlichen hydraulischen Schaltungen erdgekoppelter Wärmepumpen mit Kühlfunktion zeigt sich, dass alle Schaltungen die notwendige Funktionalität zum Heizen und Kühlen aufweisen. Die Darstellungen orientieren sich jedoch meist an einer maximalen Funktionalität der Schaltung, so dass die Einfachheit und Verständlichkeit der Schaltungen leidet. Ebenso ist das Kosten / Nutzen – Verhältnis der dargestellten Schaltungen dementsprechend nicht immer optimal.

Lastverläufe

Der zu deckende Heiz- und Kühllastverlauf wird für ein MINERGIE® zertifiziertes Einfamilienhaus mit Fußbodenheizung in Simulationsrechnungen mit dem Simulationsprogramm MATLAB/SIMULINK und der Gebäudetechnikbibliothek CARNOT [1] bestimmt.

Das Gebäude (siehe Fig. 3) kann folgendermassen charakterisiert werden:

- Zweistöckiges MINERGIE® zertifiziertes in Massivbauweise erstelltes Einfamilienhaus mit Flachdach in Südhängelage mit Abstellräumen seitlich ausserhalb der Dämmebene (im Bild hinten)
- Energiebezugsfläche 153 m² / beheiztes Nettogebäudevolumen 348 m³
- Fensterfläche 52 m² davon 36 m² Süd/West
- Dreifach-Verglasung der Fenster mit U_F-Wert 1.2 W/m²K, g-Wert 0.5
- Heizenergiebedarf nach SIA 380/1 [2] = 157 MJ/m²a = 44 kWh/m²a
- Aussenluftvolumenstrom 100 m³/h = Luftwechsel 0.29 /h
- Luftdichtigkeit n₅₀ = 0.61 /h gemäss BlowerDoor-Messung
- Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 [3] = 4.1 kW (20°C/-8°C)
- Niedertemperatur-Fußbodenheizung ohne Einzelraumregelung
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Bewohner sind 2 berufstätige Erwachsene und 1 Schulkind



Fig. 3: Zoneneinteilung des Referenzgebäudes, Erdgeschoss

Das Gebäude ist für die Simulation in 5 thermische Zonen eingeteilt, bestehend aus je einer Nord- und Südzone pro Stockwerk sowie einer unbeheizten Zone (siehe Fig. 4). Davon werden die vier beheizten Zonen ausgewertet. Die Zone Süd im Erdgeschoss umfasst den Wohn-/Essbereich, die Zone Nord Küche, WC und Bürraum. Das Obergeschoss ist ähnlich aufgeteilt mit den beiden südorientierten Zimmern in der Zone Süd sowie Treppenhaus, Bad und ein Zimmer in der Zone Nord. Die ausserhalb der Dämmebene liegenden Abstellräume und die Garage sind als eine unbeheizte Zone mit freischwingender Temperatur abgebildet, die jedoch nicht ausgewertet wird.

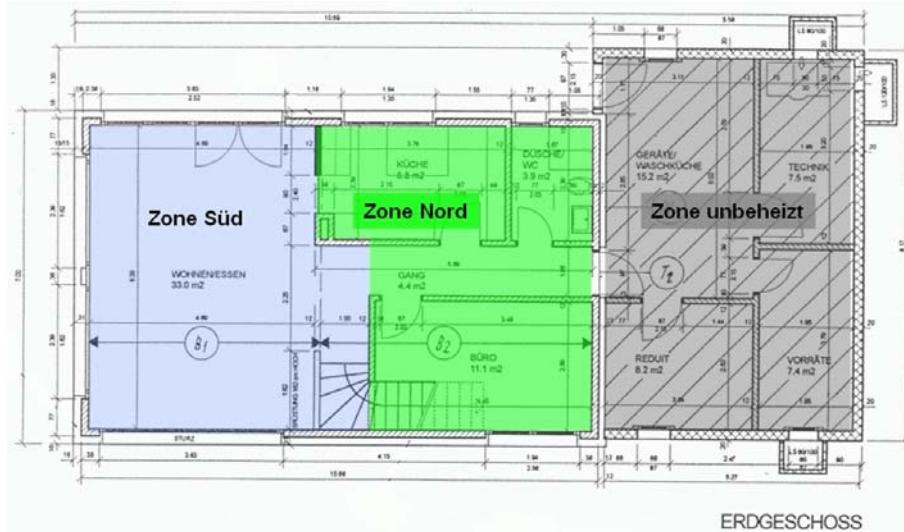


Fig. 4: Zoneneinteilung des Referenzgebäudes, Erdgeschoss

Besonderes Augenmerk liegt in dieser Untersuchung auf der Abbildung der sog. aktiven Schicht für die Bodenheizung mit den zugehörigen Vor- & Rücklauftemperaturen der Heizkreise, die für die 4 Zonen separat ausgewertet werden.

Für die Erstellung der Lastverläufe wird ein automatisierter Ansatz gewählt mit dem Ziel, mit einem einfachen Regelkonzept im Sommer die Komfortanforderungen möglichst gut einzuhalten und in der Übergangszeit, d.h. im Frühjahr und im Herbst, keinen unnötigen Mehraufwand zu erzeugen. Das Ziel ist, einen Beitrag zur Komfortverbesserung zu leisten, jedoch nicht eine volle Deckung der Kühllast.

In der Praxis üblich sind eine manuelle, saisonale Freigabe des Heizwärme- & Raumkälteerzeugung und eine manuelle Aktivierung der Kühlfunktion je Raum. Dadurch ist ein Wechselbetrieb von Heizen und Kühlen relativ sicher ausgeschlossen. Der praktisch erreichte Komfort hängt jedoch vom Verständnis des Benutzers für das System Fussbodenheizung (Trägheit, Leistungsfähigkeit) ab. Weiterhin ist die erreichbare energetische Effizienz bei Systemen mit THV durch die in der Praxis höheren Auslegungsvorlauftemperaturen schlechter als bei einem Niedertemperatursystem mit Selbstregelgeleffekt.

Mit einem Wärmeabgabesystem mit minimalen Übertemperaturen, wie zum Beispiel eine Fussbodenheizung mit Selbstregelgeleffekt, ist eine bessere Effizienz der Wärmepumpe im Heizbetrieb und eine weiter reichende Ausnutzung der Erdkälte im Kühlbetrieb erreichbar. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob mit einer einfachen Erweiterung der Regelung eine automatisierte Umschaltung von Heiz- auf Kühlbetrieb möglich ist.

Für die erste Abschätzung des Jahresgangs für den Wärme- / Kältebedarf wird die Soll-Temperatur der aktiven Schicht aus einem gewichteten Mittel von 70% Rücklauftemperatur und 30% Vorlauftemperatur bestimmt. Diese Mitteltemperatur folgt einer witterungsgeführten Kühlkurve. Es werden drei Fälle ähnlich verlaufender Kühlkurven unterschieden, wobei die Soll-Temperatur bei 30°C Außenlufttemperatur zwischen 19°C und 23°C in 2K Schritten variiert wird. Die Kühlkurven werden nach der Soll-Temperatur bei 30°C Außenlufttemperatur bezeichnet. Über 30°C steigt die Solltemperatur an, um die Grenzen nach SIA V382/2 [4] soweit als möglich einzuhalten.

Die aus der Simulation gewonnenen Größen Vorlauf- & Rücklauftemperatur der Bodenheizung sowie die benötigte Heiz-/Kühlleistung als Stundenmittelwerte dienen als Eingangsgrößen für die separate Sondensimulation mit dem Programm EWS [5], womit untersucht wird, ob die Erdsonde die Anforderungen für die passive Kühlung decken kann. Zur Vermeidung kurzfristiger Lastspitzen, welche die zulässige Entzugsleistung der Sonde überschreiten würden, ist in der Gebäudesimulation die Heizleistung auf 4.8 kW und die Kühlleistung auf 5 kW begrenzt.

Die Varianten mit Kühlung zeigen vor allem in der Hitzeperiode einen deutlichen Komfortgewinn, der sich mit weniger Überhitzungsstunden bei einer deutlich gesenkten maximalen Raumtemperatur ausdrückt. Wie bereits erwähnt, weist dieses einfache Regelkonzept keine saisonale Sperre für Heizen oder Kühlen auf, weshalb kurzzeitig alternierender Heiz- & Kühlbetrieb häufig auftreten. Dadurch wiederum erhöht sich der Heizwärmebedarf. Automatisiert könnte dieser Wechselbetrieb durch eine Totzeit zwischen Heiz- & Kühlbetrieb vermieden werden, in der nach Ende des Heizbetriebs der Kühlbetrieb für diese Totzeit gesperrt ist und umgekehrt. Der Nutzen zeigt sich schon bei einer Totzeit von 12 Stunden. Die Komfortbedingungen verbessern sich deutlich gegenüber dem manuellen Konzept und

verschlechtern sich nur geringfügig gegenüber dem maximal erreichbaren Komfort ohne Totzeit. Der Heizwärmebedarf erhöht sich nicht, weil durch die Totzeit kurze Heiz-/Kühlzyklen vermieden werden.

Die Simulationen einer für den Heizbetrieb ausgelegten Erdsonde zeigen eine weitgehende Deckung des Kältebedarfs über die passive Kühlung mit der Erdsonde. Wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Erdsonde als Kältequelle hat der Wärmetauscher mit dem die Erdsonde an den Heizkreis angekoppelt wird. Bei einer Grädigkeit (mittlere Temperaturdifferenz zwischen den Medien) von 1K liegt die Leistungsfähigkeit der Sonden bei 26-40 W/m. In unserem Beispiel haben wir 0.77 m Erdwärmesondenlänge pro 1 m² belegbarer Fussbodenheizung. Damit liegt die Kühlleistungsgrenze für das Gebäude bei 20-30 W/m² Bodenfläche. Bei diesem Verhältnis liegt für einen Parkettboden bei 26°C Raumtemperatur die minimale Fussboden-Oberflächentemperatur bei 21.4°C. Eine Verschlechterung der Grädigkeit im Auslegungsfall von 1K auf 3K senkt die Leistungsfähigkeit der Sonde auf 12-25 W/m, die Kühlleistungsgrenze auf 10-20 W/m² und den Deckungsbeitrag von 94% auf 64%.

Der Vergleich von gleichzeitiger Warmwasserbereitung und Raumkühlung über den Verdampfer gegenüber sequentieller Warmwasserbereitung und Raumkühlung nur aus der Erdsonde weist für den gleichzeitigen Betrieb zwar einen geringen Zusatznutzen aus, dieser rechtfertigt den Mehraufwand jedoch nicht. Beim sequentiellen Betrieb kann während der Warmwasserbereitung über einen Zeitraum von wenigen Stunden Kälte im Erdreich gespeichert werden, die dann beim passiven Kühlbetrieb aus der Erdsonde genutzt werden kann. Für einige Stunden ist in der Erdsonde eine Kurzzeit-Speicherung möglich, während bei Einzelsonden eine saisonale Speicherung i.d.R. keinen Vorteil bietet.

Der Effekt, dass die Kühlleistung der Erdsonde in den ersten Betriebsstunden wesentlich höher ist als im Dauerbetrieb, kann in der getrennten Simulation von Gebäude und Erdsonde noch nicht abgebildet werden. Der Einfluss auf die dadurch entstehenden Vorlauftemperaturen in den Heizkreisen, wichtig für die Frage nach Kondensatbildung, kann erst mit der gekoppelten Simulation analysiert werden. Ebenso kann die Fragestellung, ob ein System mit THV auch eine Leistungsregelung bzw. Temperatursteuerung entsprechend einer Vorlauf- oder Rücklaufkühlkurve braucht, oder ob die Reaktionszeit der THV ausreicht, nur mit einer gekoppelten Simulation untersucht werden.

Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt erfolgt im Rahmen einer Arbeitsgemeinschaft des Instituts Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz und der Huber Energietechnik AG in Zusammenarbeit mit der Viessmann (Schweiz) AG bzw. der Viessmann Werke GmbH & Co KG, eingebunden in das Kompetenznetzwerk brenet. Die Zusammenarbeit wird als gut und konstruktiv erachtet.

Internationale Zusammenarbeit

Das Projekt erfolgt unter Berücksichtigung der Ergebnisse der International Energy Agency (IEA) in den Programmen „Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS)“ [6] und „Heat Pump Programme (HPP)“ [7].

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Die Arbeiten im Berichtsjahr werden analog der Ziele wie folgt bewertet:

1. Hydraulische Schaltungen: Die Evaluation der hydraulischen Schaltungen ist abgeschlossen.
2. Heiz- und Kühllastverlauf: Die Erstellung der Lastverläufe ist abgeschlossen. Die Betrachtung eines Szenarios mit Klimaerwärmung wird geprüft.
3. Sondensimulation: Die Sondensimulation ist abgeschlossen.
4. Regelkonzepte: Die Analyse und Betrachtung von möglichen Regelkonzepten ist nahezu abgeschlossen.
5. Systemsimulationen für spezielle Fragestellungen stehen noch aus.
6. Die Kosten-Nutzen-Betrachtung ist vorbereitet und wird im Schlussbericht formuliert.
7. Die Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsempfehlungen und Kennwerte wird im Schlussbericht formuliert.

Die geplanten Ergebnisse werden bis Ende des Jahres erreicht.

Referenzen

- [1] CARNOT Blockset, Version 1.64, 2002, Bezugsquelle: Solar-Institut Jülich
- [2] SIA 380/1:2001, Thermische Energie im Hochbau, 02-2001, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [3] SIA 384/2:1995, Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden, 07-1995, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [4] SIA V382/2:1992, Kühlleistungsbedarf von Gebäuden, 05-1995, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [5] Huber, A.; Schuler, O.: Berechnungsmodul für Erdwärmesonden, 1997, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern
- [6] Internetsite des Programm ECBCS der IEA www.ecbcs.org
- [7] Internetsite des Heat Pump Programme der IEA www.heatpumpcentre.org