

Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Janet Nußbicker-Lux
geboren in Friedrichroda

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen

Mitberichter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. W. Streicher

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2009

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2010

Kurzfassung

Anlagen mit Erdwärmesonden erfahren zurzeit eine zunehmende Bedeutung. Für eine detaillierte Anlagenplanung, insbesondere von Erdsonden-Wärmespeichern (ESWSp), sind validierte Berechnungsmodelle des thermischen Verhaltens solcher Wärmespeicher unabdingbar. Daraus leitet sich das Ziel dieser Arbeit, die Validierung des Berechnungsmodells „Superposition Borehole Model“ (SBM), ab. Erstmals wurde in dieser Arbeit das Berechnungsmodell zur Untersuchung des thermischen Verhaltens eines zweifach erweiterten Erdsonden-Wärmespeichers genutzt. Ein weiteres Ziel war die Erstellung eines Simulationsmodells für die solar unterstützte Nahwärmeversorgung Neckarsulm und die Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen für deren Betrieb. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um Dimensionierungsrichtlinien für solar unterstützte Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeichern zu erstellen.

Das SBM-Berechnungsmodell wurde anhand der Messdaten des in Neckarsulm realisierten Wärmespeichers eingehend überprüft und angepasst. Es wurde eine Referenzvariante unter Berücksichtigung der geometrischen und hydraulischen Speicherparameter definiert und die gemessenen Speichereintrittstemperaturen und Durchflüsse sowie Wetterdaten als Eingabewerte verwendet. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,3 bis 2,4 W/(m·K) und einer volumetrischen Wärmekapazität von 2,85 MJ/(m³·K) konnte die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erreicht werden (maximale Differenz der Wärmemengen ca. 3%, Temperaturen ca. 3 K).

Zur Berechnung des thermischen Verhaltens der solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit ESWSp in Neckarsulm wurde ein TRNSYS-Simulationsmodell erstellt. Die Validierung erfolgte anhand der Messdaten des Jahres 2004; die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Wärmemengen ist kleiner als 5%, mit Ausnahme der Entladewärmemenge des Speichers. Als wichtigste Optimierungsmöglichkeit hat sich die Senkung der Netzurücklauftemperatur herausgestellt: mit einer gegenüber der Messung um 5 K niedrigeren Netzurücklauftemperatur könnte der solare Deckungsanteil um 10 Prozentpunkte gesteigert werden.

Zur Ermittlung der Dimensionierungsrichtlinien wurde ein allgemeines Simulationsmodell für Nahwärmesysteme mit zylinderförmigen Erdsonden-Wärmespeichern erstellt. Es wurden zwei Wärmelasten mit Netztemperaturen von 68/41°C bzw. 60/30°C sowie drei Wetterdatensätze (Frankfurt/Main, Würzburg, Hamburg) verwendet [101]. Bei einer Wärmelast von 5000 MWh/a, einer Kollektorfläche von 20000 m² und einem Speichervolumen von 200000 m³ wird in Hamburg bei Netztemperaturen von 68/41°C ein solarer Deckungsanteil von 51,4% und in Würzburg bei Netztemperaturen von 60/30°C ein solarer Deckungsanteil von 70,8% erreicht.

Abstract

Installations encompassing Borehole Heat Exchangers have recently gained in interest. During detailed planning validated calculation models play a crucial part in determining the thermal behaviour of installations especially those equipped with Borehole Thermal Energy Stores. With this in mind the validation of the “Superposition Borehole Model” (SBM) was undertaken. This paper describes how this model has, for the first time, been used to investigate a twice extended Borehole Thermal Energy Store. In addition work was aimed at developing a simulation model for the solar coupled district heating system in Neckarsulm and at conceiving strategies to optimise the operation of the system. Based on these results guidelines were developed for determining the dimensions of solar coupled district heating systems with Borehole Thermal Energy Stores.

Using measurements acquired from the Neckarsulm heat store the SBM-model was closely checked and appropriately adjusted. Given the existing geometry and hydraulic storage parameters a reference model was defined into which storage input temperatures, flow rates and weather data were entered. For a thermal conductivity of 2.3 to 2.4 W/(m·K) and a volumetric heat capacity of 2.85 MJ/(m³·K) the correlation between measured and calculated data was best, i. e. the maximum difference between measured and predicted heat amounts was about 3%, while the maximum difference between measured and predicted temperatures was about 3 K.

To calculate the thermal behaviour of the solar coupled district heating system in Neckarsulm a TRNSYS simulation model was developed. The validation was performed using data measured in 2004. The correlation between measured and calculated heat amounts was good, the difference being less than 5% except for storage heat discharge (21,7%). For example, regarding the total heat demand, a 10% higher solar fraction can be achieved for a 5 K lower network return temperature.

Dimensioning guidelines were derived with a universally applicable TRNSYS simulation model for solar coupled district heating systems with Borehole Thermal Energy Stores. They take the location (weather data for Frankfurt/Main, Würzburg and Hamburg) as well as the heat load of the district heating network with temperatures of 68/41°C and 60/30°C into consideration. For example with a heat load of 5,000 MWh/a, a collector area of 20,000 m² and a storage volume of 200,000 m³ the lowest solar fraction (51.4%) will be achieved in Hamburg at a district heating network temperature of 68/41°C, while the highest solar fraction (70.8%) will be achieved in Würzburg at a temperature level of 60/30°C.

Vorwort	5
Kurzfassung	6
Abstract	7
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangssituation	14
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	15
2 Grundlagen	19
2.1 Stand der Technik	19
2.1.1 Solarthermische Großanlagen	19
2.1.2 Überblick Wärmespeicherung	23
2.1.3 Erdsonden-Wärmespeicher	25
2.2 Simulationsprogramme	27
2.2.1 TRNSYS - A Transient System Simulation Program	27
2.2.2 Simulationsmodelle für Erdwärmesonden	29
2.2.3 Superposition Borehole Model	33
3 Nahwärmeversorgung Neckarsulm	43
3.1 Beschreibung der Nahwärmeversorgung	43
3.2 Auswertung der Messdaten	45
3.2.1 Datenbasis	45
3.2.2 Fehlerbetrachtung	46
3.2.3 Ausgewählte Messergebnisse	49
4 Validierung Erdsonden-Wärmespeicher-Simulationsmodell	55
4.1 Vorgehensweise	55
4.2 Untersuchungen zu ausgewählten Parametern	59
4.2.1 Simulationsumgebung	59
4.2.2 Radiales und vertikales Rechengitter	60
4.2.3 Wärmeträgermedium	61
4.2.4 Erdwärmesonde und Bohrlochwiderstand	61
4.2.5 Boden	63
4.3 Auswertung	67
4.3.1 Vergleich gemessener und berechneter Werte im Referenzfall	67
4.3.2 Parameterauswertung	69

5	Validierung Nahwärme-Simulationsmodell.....	75
5.1	Erstellung und Validierung des Simulationsmodells	75
5.1.1	Modellbeschreibung	75
5.1.2	Auswertung	80
5.2	Sensitivitätsanalyse	84
5.2.1	Simulationsumgebung.....	84
5.2.2	Kollektoren und Kollektorkreis, Wetter	85
5.2.3	Netzparameter, Wärmelast	87
5.2.4	Pufferspeicher und Speicherkreis	88
5.3	Verbesserungspotenzial	89
5.3.1	Bestehendes Nahwärmenetz	89
5.3.2	Nahwärmenetz mit zylindrischem Erdsonden-Wärmespeicher.....	91
6	Dimensionierungsrichtlinien	95
6.1	Vorgehen und Beschreibung des Simulationsmodells	95
6.2	Berechnungsergebnisse	96
6.3	Dimensionierung bei Abweichung von den Referenzbedingungen	98
6.4	Solare Wärmekosten	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	111
8	Nomenklatur	115
9	Abkürzungsverzeichnis	118
10	Literaturverzeichnis.....	119
11	Anhang	128
11.1	Daten zu nationalen und internationalen Erdsonden-Wärmespeichern	128
11.2	Hydraulikschema Neckarsulm	131
11.3	Regelungskonzept Neckarsulm.....	132
11.4	Daten zu den Kollektorfeldern in Neckarsulm	135
11.5	Daten zum Erdsonden-Wärmespeicher in Neckarsulm.....	137
11.6	Simulationseingabewerte für den Erdsonden-Wärmespeicher	139
11.7	Berechnete Temperaturen im Erdsonden-Wärmespeicher	141