

Solar unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden

Von der Fakultät Energietechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Martin Hornberger
aus Neuhengstett

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Voß

Tag der Einreichung: 24.11. 1993
Tag der mündlichen Prüfung: 27. 09. 1994

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

KURZFASSUNG

Hornberger, Martin:

Solar unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden

Es wurden solargestützte Heizungssysteme, bestehend aus Kollektoren, Langzeit-Wärmespeicher und Wärmepumpe oder Zusatzkessel, sowie kombinierte Heiz-/Kühlsysteme, bestehend aus Kollektoren, kombiniertem Wärme-/Kältespeicher und Wärmepumpe, theoretisch und experimentell untersucht.

Im theoretischen Teil wurden Berechnungsverfahren und Simulationsprogramme für unverglaste Kollektoren, einen Wasser- bzw. Kies/Wasser-Speicher, eine Elektro- und eine Gasmotorwärmepumpe erstellt. Daraus wurde je ein Simulationsprogramm für solargestützte Heizungssysteme und eines für kombinierte Heiz-/Kühlsysteme zusammengestellt.

Im experimentellen Teil wurde eine Pilotanlage mit unverglasten Kollektoren ($A_K = 211 \text{ m}^2$), Kies/Wasser-Speicher ($V_{Sp} = 1050 \text{ m}^3$), Elektrowärmepumpe (Heizleistung: 66 kW) und Büro-/Laborgebäude (Nutzfläche: 1375 m^2) jeweils zwei Jahre lang als solargestütztes Heizungssystem bzw. als kombiniertes Heiz-/Kühlsystem betrieben.

Der Betrieb als kombiniertes Heiz-/Kühlsystem wurde mit dem Simulationsprogramm nachgerechnet und dadurch die Berechnungsverfahren überprüft. Die berechneten Jahreswärmemengen wichen um weniger als 4 %, die Speicher- und Erdreichtemperaturen um weniger als 1,5 bzw. 2 K von den Meßwerten ab.

Mit Systemsimulationen wurde gezeigt, daß solargestützte Heizungssysteme zur Deckung eines jährlichen Heizwärmebedarfs $Q_{GH,a}$ von 20 bis 2000 MWh/a in der Basisauslegung (Speichervolumen: $V_{Sp} = Q_{GH,a} \cdot 5 \text{ m}^3/\text{MWh}$; Kollektorfläche: $A_K = Q_{GH,a} \cdot 2 \text{ m}^2/\text{MWh}$) solare Deckungsanteile f zwischen 50 und 61,2 % erreichen. Eine 150 mm starke Wärmedämmung an der Speicherdecke und -seitenwand verbessert f gegenüber ungedämmten Flächen um bis zu 14,4 bzw. 20,5 %, eine Senkung der Rücklauf-temperatur im Wärmeverteilnetz um 15 K steigert f bis um 6,6 %.

Kombinierte Heiz-/Kühlsysteme mit Elektrowärmepumpe sparen gegenüber konventionellen Anlagen (Gaskessel und Kältemaschine) bis zu 42,9 % Primärenergie ein, solche mit Gasmotor-Wärmepumpe sogar bis zu 55,4 %. Eine Wärmedämmung ist nur an der Speicherdecke sinnvoll. Die Beladung des Speichers mit Kollektoren ist nur sinnvoll, wenn das Verhältnis Nutzkälte/Nutzwärme geringer als 0,4 ist.

ABSTRACT

Hornberger, Martin:

Solar Assisted Heating and Cooling of Buildings

Solar assisted heating systems, consisting of collectors, long term heat store and heat pump or additional boiler, as well as combined heating/cooling systems, consisting of collectors, combined heat/cold store and heat pump, were here investigated theoretically and experimentally.

In the theoretical part methods of calculation and simulation programs for unglazed collectors, a water or gravel/water store, an electric and a gas engine heat pump were developed. With these methods a simulation program for solar assisted heating systems as well as one for combined heating/cooling systems have been composed.

In the experimental part a pilot plant with unglazed collectors ($A_K = 211 \text{ m}^2$), gravel/water store ($V_{Sp} = 1050 \text{ m}^3$), electric heat pump (heating power: 66 kW) and office/laboratory building (useful area: 1375 m^2) was operated for two years as solar assisted heating system and for two years as combined heating/cooling system.

The operation as combined heating/cooling system was recomputed by the simulation program and the methods of calculation were checked in this way. The calculated yearly amount of heat differed by less than 4 %, the store and ground temperatures by less than 1,5 and 2 K from the measured values.

It was shown by system simulations that solar assisted heating systems for a yearly heat demand $Q_{GH,a}$ between 20 and 2000 MWh/a reach with the basic design (store volume: $V_{Sp} = Q_{GH,a} \cdot 5 \text{ m}^3/\text{MWh}$; collector area: $A_K = Q_{GH,a} \cdot 2 \text{ m}^2/\text{MWh}$) solar fractions f between 50 and 61,2 %. A 150 mm thick thermal insulation on top and at the side wall of the store improves f by up to 14,4 and 20,5 %, respectively, the lowering of the return temperature in the heat distribution network by 15 K rises f up to 6,6 %.

Combined heating/cooling systems with electric heat pump save, compared to conventional systems (gas boiler and refrigeration machine), up to 42,9 % primary energy, those with gas engine heat pump even up to 55,4 %.

A thermal insulation is most useful only on top of the store. Charging the store by collectors is only useful, if the ratio used cold/used heat is less than 0,4.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ABSTRACT	4
KURZFASSUNG	5
INHALTSVERZEICHNIS	6
FORMELZEICHEN	8
1 EINLEITUNG	12
2 BISHERIGE ARBEITEN	16
2.1 Experimentelle Untersuchungen der Wärme- und Kältespeicherung während Jahreszyklen	16
2.2 Berechnung von solargestützten Heizungssystemen und kombinierten Heiz-/Kühlssystemen mit Wärme-/Kältespeicher	20
3 BERECHNUNGSVERFAHREN	32
3.1 Berechnungsverfahren für einen vertikal geschichteten Erdbecken- Speicher zur Wärme- und Kältespeicherung	32
3.2 Berechnungsverfahren für Kollektoren	42
3.3 Berechnungsverfahren für Kompressionswärmepumpen	46
3.3.1 Elektrische Wärmepumpe	46
3.3.2 Gasmotor-Wärmepumpe	49
3.4 Berechnungsverfahren für Anlagen	50
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN EINER PILOTANLAGE	53
4.1 Beschreibung der Pilotanlage	53
4.1.1 Meßeinrichtungen	56

4.2 Meßergebnisse	63
4.2.1 Betrieb als solargestütztes Heizungssystem mit Wärmepumpe	63
4.2.2 Betrieb als kombiniertes Heiz-/Kühlssystem mit Wärme-/Kältespeicher	69
4.3 Auswertung der charakteristischen Größen für die Wärmeübertragung der Anlagenkomponenten	79
4.3.1 Kies/Wasser-Speicher	79
4.3.2 Unverglaste Kollektoren	84
4.3.3 Wärmepumpe	88
5 ERGEBNISSE DER SYSTEMSIMULATION UND VERGLEICH MIT MEßERGEBNISSEN	92
6 THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN FÜR SOLARGESTÜTZTE HEIZUNGSSYSTEME UND KOMBINIERTHE HEIZ-/KÜHLSYSTEME MIT WÄRME-/KÄLTESPEICHER	99
6.1 Randbedingungen	99
6.2 Solargestützte Heizungssysteme	101
6.2.1 Einfluß des Speichervolumens und der Kollektorfläche	104
6.2.2 Einfluß der Speicher-Wärmedämmung	108
6.2.3 Einfluß der Speicherform	112
6.2.4 Einfluß der Temperaturen im Wärmeverteilstrom für die Raumheizung	116
6.2.5 Einfluß der Regelstrategie	119
6.2.6 Einfluß der Stoffwerte des Speichers und des Erdreichs	122
6.3 Kombinierte Heiz-/Kühlssysteme mit Wärme-/Kältespeicher	126
6.3.1 Einfluß des Speichervolumens und der Kollektorfläche	130
6.3.2 Gasmotor-Wärmepumpe	134
6.3.3 Einfluß der Speicher-Wärmedämmung	135
6.3.4 Einfluß der Temperaturen im Wärme- und Kälteverteilstrom	138
6.3.5 Einfluß der Länge der Wärmeaustauscherrohre	141
7 ZUSAMMENFASSUNG	143
8 LITERATURVERZEICHNIS	147