

Moderne Regelungsansätze für Solarsysteme mit integrierter Wärmepumpe zur Gebäudeheizung

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

Vorgelegt von
Tillman Johannes Faßnacht
aus Nagold

Hauptberichter: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. Hans Müller-Steinhagen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 2014/12/18

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
der Universität Stuttgart

2015

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Regelung der Nutzenübergabe in Einfamilienhäusern, der Arbeitspunktoptimierung der Drehzahlregelungen von Verdampferkreispumpe und Kollektorlüfter eines Solar-Wärmepumpen-Systems, sowie mit der Modellierung dieses Systems.

Feldtestuntersuchungen zeigen, dass die Heizkurven und damit auch die Vorlauftemperaturen bei Wärmepumpensystemen oftmals deutlich höher gefahren werden als benötigt. Als Stellgröße zur Regelung der Nutzenübergabe wird deshalb die Vorlauftemperatur des Heizsystems gewählt. Es werden die Heizkurve, ein PI-Regler, ein linear quadratischer und ein modellbasierter prädiktiver Regler (ohne Stellgrößenbeschränkungen) untersucht und miteinander verglichen. Dabei wird speziell auch der Einfluss der Wahl des Führungsraumes für die Regler untersucht. Bewertet werden die resultierenden Energieeffizienzen, wenn vergleichbare Raumtemperaturen realisiert werden. Die Stromeinsparungen durch die Regler werden durch ein detailliertes Simulationsmodell eines Solar-Wärmepumpen-Systems quantifiziert. Die Komfortauswirkungen werden anhand eines 13-Zonen-Gebäudemodells untersucht. Bei geeigneter Wahl des Führungsraumes erweisen sich alle vorgestellten Regler als effizient. Sie unterscheiden sich jedoch signifikant in der Abhängigkeit der Ergebnisse vom Führungsraum.

Der linear quadratische und der modellbasierte prädiktive Regler benötigen zur Auslegung ein Gebäudemodell. Es wird im Wesentlichen ein Modell mit zwei thermischen Speichern und den Eingängen Außentemperatur, Solareinstrahlung und Vorlauftemperatur des Heizsystems näher betrachtet.

Die Verdampferkreispumpe und die Kollektorlüfter sind neben der Wärmepumpe zwei Hauptstromverbraucher des betrachteten Solar-Wärmepumpen-Systems. Gleichzeitig beeinflussen ihre Zustände den Arbeitspunkt und damit die Effizienz der Wärmepumpe. Es wird eine Methode für die Arbeitspunktoptimierung der Verdampferkreispumpe und der Kollektorlüfter vorgestellt. Hierfür werden thermodynamische Modelle für die verschiedenen stationären hydraulischen Ladezustände abgeleitet und validiert. Unter Nutzung dieser Gleichungen werden Optimierungsprobleme definiert, die numerisch in Matlab gelöst werden. Durch Systemsimulationen werden wiederum Einspareffekte quantifiziert.

Abstract

This project deals with the closed loop control of the thermal energy transfer to single-family homes, as well as the optimization of the operating point of the speed control of the evaporator circuit pump and the collector fan of a solar heat pump system and with the modelling of this system. Field test investigations show that the heating curves and as a result also the inlet temperatures of the heating system are often adjusted much higher than required. Therefore, the inlet temperature of the heating system is selected as the control variable for controlling the energy transfer. The heating curve, a PI controller, a linear-quadratic regulator (LQR) and a model predictive controller (MPC, without control variable constraints) are examined and compared with each other. Also the influence, of the particular reference room (in which the temperature signal is measured), is examined. The resulting energy efficiencies are examined under the boundary condition that always comparable room temperatures are achieved. The electrical energy savings by the different regulators are quantified by a detailed simulation model of a solar heat pump system. The consequences on comfort are examined with the help of a 13-zone building model. With a appropriate selection of the reference room, all proposed regulators proof to be efficient. They distinguish however significantly in the dependency of the results of the reference room.

The LQR and the MPC rely on a model for the building. Basically a model with two thermal states and the input signals ambient temperature, solar radiation and inlet fluid temperature of the heating system is evaluated more in detail.

In addition to the heat pump, the evaporator circuit pump and the collector fan are the major consumers of electricity in the solar heat pump system that is under observation. The states of these two components also affect the state of the operating point and thus the efficiency of the heat pump. A method for finding the optimal operating point of the evaporator circuit pump and the collector fan is presented. For this purpose, thermodynamic models for the various steady-state hydraulic loading conditions are derived and validated. Optimization problems are defined with the help of these equations. MATLAB is then used to solve these non-linear optimization problems numerically. Furthermore, the exact energy savings are quantified through system simulations.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
Nomenklatur	ix
Kurzfassung	xviii
Abstract	xix
1 Einleitung	1
1.1 Überblick über verschiedene Solar-Wärmepumpen-Systeme	7
1.2 Vorstellung eines Solar-Wärmepumpen-Systems mit Eisspeicher und Hybridkollektoren	10
1.2.1 Kombispeicher	15
1.2.2 Hybridkollektor	15
1.2.3 Wärmepumpe	16
1.2.4 Eisspeicher	17
1.3 Feldtest	18
2 Simulationsmodell eines Solar-Wärmepumpen-Systems mit Hybridkollektoren und Latentwärmespeicher	23
2.1 Modell der Hybridkollektoren	25
2.1.1 Hybridkollektor als Flachkollektor	26
2.1.2 Hybridkollektor als Sole-Luft-Wärmeübertrager	27
2.1.3 Untersuchung des Kollektormodells	36
2.2 Modell des Kombispeichers	41
2.3 Eisspeichermodell	42
2.4 Modell der Heizkreispumpe und Fußbodenheizungshydraulik	43

2.5	Modell der Verdampferkreispumpe	7
2.6	Modellierung des Systemreglers	8
2.7	Wärmepumpenmodell	9
2.8	Vergleich der Simulation mit Messdaten	10
2.9	Gebäudemodell	11
2.9.1	Modelliertes Gebäude	11
3	Gebäudemodell für modellbasierte Regler	11
3.1	Herleitung des Gebäudemodells für modellbasierte Regler	12
3.2	Parameteridentifikation	12
3.3	Einstellung der Parameter	13
4	Regelung der Nutzenübergabe von Heizungssystemen	99
4.1	Heizkurve	101
4.2	Proportional-Integral-Regler der Nutzenübergabe	103
4.3	Linear quadratischer Regler der Nutzenübergabe	105
4.4	Modellbasierter prädiktiver Regler der Nutzenübergabe	107
5	Vergleich verschiedener Regler der Nutzenübergabe an dem Beispiel eines Solar-Wärmepumpen-Systems	115
5.1	Referenzsimulation	120
5.2	Heizkurve	122
5.2.1	Nutzung der Gebäudemasse als Wärmespeicher	124
5.3	Proportional-Integral-Regler	125
5.4	Linear quadratischer Regler	128
5.4.1	Führungsraum Wohnzimmer	128
5.4.2	Führungsraum Küche	130
5.4.3	Führungsraum Kinderzimmer Nord-Ost	131
5.5	Modellbasierter prädiktiver Regler	133
5.5.1	Führungsraum Wohnzimmer	133
5.5.2	Führungsraum Küche	134
5.5.3	Führungsraum Kinderzimmer Nord-Ost	136
5.6	Zusammenfassung	137

6 Optimierung der Drehzahlregelung der Kollektorlüfter und der Verdampferkreispumpe	143
6.1 Regelungstechnische Modelle der Ladezustände	144
6.1.1 Validierung der Gleichungen	148
6.2 Optimierung des Kreislaufes Eisspeicher, Verdampfer, Kollektor und Pumpe	151
6.2.1 Simulation	153
6.3 Zusammenfassung	157
7 Zusammenfassung und Ausblick	159
A Schemen und Diagramme	167
A.1 Hydraulikschema und Gebäudepläne	167
A.2 Diagramme	172
B Kennwerte	175
B.1 Gebäudekennwerte	175
C Berechnungen	179
C.1 Modellierung des Eisspeichers	179
C.1.1 Wärmestrom am Wärmeübertrager und Wärmeverluste des Speichers	182
C.1.2 Berechnung der Wärmeübertragungsvermögen von den Zonenmitten bis an die Zonenränder	184
C.1.3 Einfügen und Eliminieren von Zonen	189
C.1.4 Aktualisierung der Zonenzustände	190
C.2 Funktion Nutzung der Gebäudemasse als Wärmespeicher	193
Literaturverzeichnis	210
Abbildungsverzeichnis	214
Tabellenverzeichnis	216