

Integration von Wärmepumpen in solare Nahwärmeanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung

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

Vorgelegt von

Roman Marx

aus Bern

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen
Mitberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Spindler
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. André Thess

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2014

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

2015

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis	V
Nomenklatur.....	IX
Kurzfassung.....	XIII
Abstract.....	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Stand des Wissens.....	2
1.1.1 Solare Nahwärmanlagen	2
1.1.2 Saisonale Wärmespeicherung	3
1.1.3 Wärmepumpen in solaren Nahwärmanlagen	6
1.2 Motivation.....	7
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	8
2 Integration von Wärmepumpen in realisierten solaren Nahwärmanlagen..	11
2.1 Beschreibung der solaren Nahwärmanlage in Rostock	12
2.2 Beschreibung der solaren Nahwärmanlage in Neckarsulm	13
2.3 Beschreibung der solaren Nahwärmanlage in Crailsheim.....	14
2.4 Beschreibung der solaren Nahwärmanlage in Eggenstein-Leopoldshafen....	16
2.5 Beschreibung der solaren Nahwärmanlage in Marstal (Dänemark).....	17
2.6 Analyse realisierter solarer Nahwärmanlagen	18
2.6.1 Definition charakteristischer Kennzahlen zur Komponenten- und Anlagenbewertung	19
2.6.2 Auswertung der Anlage in Rostock	21
2.6.3 Auswertung der Anlage in Neckarsulm.....	23
2.7 Vergleich und Fazit.....	27
3 Modellierung von Wärmepumpen für solare Nahwärmanlagen.....	31
3.1 Einleitung.....	31

3.2 Allgemeiner Überblick der Modellansätze	31
3.3 Transiente Modellansätze	33
3.3.1 Auswerteverfahren 1 der NTB	33
3.3.2 Auswerteverfahren 2 der NTB	34
3.3.3 Auswerteverfahren 3 der NTB	34
3.4 Ziele bei der Modellierung von Wärmepumpen für solare Nahwärmanlagen	35
3.5 Modellanpassung	35
3.5.1 Modifikationen des stationären Modells	36
3.5.2 Erweiterung zum dynamischen Modell	36
3.6 Validierung des Wärmepumpenmodells	40
3.6.1 Messdaten für die Validierung	40
3.6.2 Messstellen und Messdatenerfassung	41
3.6.3 Simulationsparameter und Simulationsmodelle für die Validierung	43
3.6.4 Quantitative Auswertung der Validierung	43
3.6.5 Qualitative Auswertung der Validierung	45
3.7 Sensitivitätsanalyse	49
3.7.1 Parametervariation	50
3.7.2 Zeitliche Diskretisierung	51
3.7.3 Ergebnisse und Auswertung der Sensitivitätsanalyse	52
4 Entwicklung eines neuen Anlagenkonzepts für die Integration von Wärmepumpen in solare Nahwärmanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung	59
4.1 Voruntersuchungen	59
4.2 Beschreibung des Anlagenkonzepts	60
4.2.1 Anlagenkonfiguration der Referenzanlage	62
4.2.2 Verwendete Modelle im Simulationsprogramm TRNSYS	63
4.2.3 Verwendetes Lastprofil	63
4.2.4 Simulationsergebnisse der Referenzanlage	64
4.3 Sensitivitätsanalyse	67

4.4	Detaillierte Parametervariation verschiedener Einflussgrößen zur Bestimmung der energetischen Optima der Anlagenkonfiguration.....	70
4.4.1	Parametervariation des Volumens des Langzeit-Wärmespeichers und der Schichtdicke der Wärmedämmung.....	71
4.4.2	Parametervariation der Kollektorfläche und des Kollektoranstellwinkels.....	73
4.4.3	Parametervariation der Wärmepumpenleistung und Untersuchung der Wärmeverluste durch Takten der Wärmepumpe.....	76
4.5	Variation einzelner Komponenten der Gesamtanlage.....	80
4.5.1	Leistungsfähigkeit der Kollektoren.....	80
4.5.2	Anlagenkonzept mit Substitution des Warmwasserspeichers durch einen Kies/Wasser-Wärmespeicher.....	84
4.5.3	Lastverhalten des Nahwärmenetzes.....	87
4.6	Vergleich des neuen Anlagenkonzepts mit anderen Anlagenkonzepten.....	90
4.6.1	Beschreibung der Konzeptvarianten.....	91
4.6.2	Simulationsergebnisse der Konzeptvarianten und Vergleich zur Referenzanlage.....	94
4.6.3	Potentialabschätzung Kombination BHKW und thermisch angetriebene Wärmepumpe.....	101
4.6.4	Bewertung der Konzeptvarianten.....	102
4.7	Primärenergetischer Vergleich zukunftsfähiger Wärmebereitstellung.....	103
4.8	Fazit.....	105
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
	Literatur.....	111
	Anhang 1: Kreisprozess der Wärmepumpe.....	121
	Anhang 2: Fehlerbetrachtung.....	122
	Anhang 3: Lastenheft.....	125
	Anhang 4: Regelstrategie der Referenzanlage.....	131
	Anhang 5: Erweiterte Ergebnisse der detaillierte Parametervariation.....	134
	Anhang 6: Variation der Leistungsfähigkeit der Kollektoren.....	141
	Anhang 7: Vergleich der Lastprofile.....	144
	Anhang 8: Vergleich der Netzvorlauftemperaturen.....	145

Kurzfassung

Solare Nahwärmanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung sind Technologien, um im Niedertemperaturbereich eine Wärmeversorgung mit hohem Anteil regenerativer Energie bereitzustellen.

Wie Erfahrungen aus dem Betrieb solcher Anlagen zeigen, besteht bei den einzelnen Anlagenkomponenten sowie bei der Anlagenkonfiguration Verbesserungspotenzial. Die Integration von Wärmepumpen kann eine effizienzsteigernde Maßnahme sein.

In dieser Arbeit wurde die Wärmepumpenintegration bei realisierten Anlagen untersucht und es wurde festgestellt, dass diese aus energetischer Sicht nicht immer sinnvoll ist. Um solare Nahwärmanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung und Wärmepumpen detaillierter abbilden zu können, wurde ein bestehendes Wärmepumpenmodell weiterentwickelt. Durch die Validierung des verbesserten Wärmepumpenmodells konnte eine Genauigkeitsverbesserung gegenüber dem bislang verwendeten Modell nachgewiesen werden. Mit Hilfe einer Voruntersuchung konnte ein neues Anlagenkonzept für solare Nahwärmanlagen erstellt werden. Dieses wurde durch Simulationen abgebildet und energetisch weiter optimiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei Anlagenkonzepten mit sehr hohen Anteilen regenerativer Energie die höchsten Einsparungen an Primärenergie nur mit der Integration von Wärmepumpen erzielt werden können. Die energetisch positiven Effekte der Wärmepumpe wie z. B. gesteigerte Speicher- oder Kollektornutzungsgrade können bei solchen Anlagenkonzepten so ausgeprägt sein, dass die Gesamteffizienz der Anlage deutlich gesteigert wird. Dadurch konnte der energetische Nutzen der Wärmepumpenintegration in solare Nahwärmanlagen nachgewiesen und bestätigt werden.

Abstract

Solar district heating in combination with seasonal thermal energy storage is a technology which has the potential to provide low-temperature heat with a high proportion of renewable energy.

Studies of the operation of such systems determined that potential for improvement exists at both component and system level. The integration of heat pumps offers the potential to achieve greater efficiencies and was investigated in this thesis through the study of installed systems. It was discovered, that the integration does not always provide improvements from an overall energy perspective. An existing heat pump computer model used to simulate solar district heating with seasonal thermal energy

storage and heat pumps was improved to make it more reliable. The improved model has been validated and demonstrates a higher accuracy compared with the older model. Using a preliminary assessment a new system configuration was developed. This concept was represented in a simulation and further optimised through consideration of the energy contribution made by each individual component to the performance of the system. It confirmed that for system configurations with very high fractions of renewable energy, the highest saving of primary energy could only be achieved with the use of heat pumps. In particular, for such system configurations the positive impact of the heat pump on the energy efficiency of the other components of the system has been clearly demonstrated.