

# Bewertung von Wärmepumpensystemen mit solarthermischer Quelle durch Feldtest- und Simulationsmethoden

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

vorgelegt von

**Jörn Ruschenburg**

aus Eutin

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:

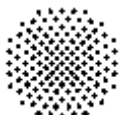
Prof. Dr. rer. nat. Hans-Martin Henning  
Karlsruher Institut für Technologie

Tag der Einreichung:

11.06.2016

Tag der mündlichen Prüfung:

11.04.2017



Universität Stuttgart

**IGE**  
2017

Institut für Gebäudeenergetik

# Kurzfassung

In Heizungsanlagen können solarthermische Kollektoren mit anderen Wärmeerzeugern kombiniert werden. Die Motivation umfasst u. a. die Verminderung von Treibhausgas- oder gesundheitsschädlichen Emissionen, die Schonung fossiler Ressourcen oder die Senkung verbrauchsgebundener Kosten. Unter den Wärmeerzeugern ist die Wärmepumpe ein Spezialfall, da sie Endenergie zur Erschließung von Umweltenergie nutzt. Auch Solarthermie kann diese Funktion übernehmen.

Hauptziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen der quell- und senkenseitigen Solarthermienutzung auf den Anlagenbetrieb zu untersuchen und die Vor- und Nachteile herauszustellen. Dazu werden drei methodische Ansätze verfolgt: eine marktbezogene Betrachtung, die Auswertung von Feldtestprojekten sowie computergestützte Systemsimulationen. Es werden ausschließlich elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern mit maximal 15 Wohneinheiten betrachtet.

Durch eine Auswertung von insgesamt 128 Wärmepumpensystemen mit Solarthermienutzung konnte gezeigt werden, dass diese in Europa bereits weithin marktverfügbar sind. In einem Drittel dieser Systeme wird Solarthermie (auch) quellseitig der Wärmepumpe eingebunden.

Des Weiteren wurden Feldtestprojekte zu insgesamt 32 Wärmepumpenanlagen mit Solarthermienutzung evaluiert. Deren systembezogene Arbeitszahlen sind teilweise kleiner als 2, teilweise größer als 5. Als methodischer Aspekt gelang die Konvertierung von Arbeitszahlen verschiedener Bilanzgrenzen mit hoher Bestimmtheit. Auch die Einflüsse der Dimensionierung verschiedener Komponenten auf die Arbeitszahl wurden untersucht.

Als Ergebnis der Simulationen zeigt sich, dass Solarthermienutzung zur direkten Wärmeerzeugung die Arbeitszahl einer Wärmepumpenanlage deutlich erhöhen kann. Werden photovoltaisch-thermische Kollektoren in dieser Funktion und zusätzlich als

Wärmepumpenquelle genutzt, bewirkt der thermische Aspekt nur marginale Steigerungen der Arbeitszahl. Die photovoltaische Elektrizitätserzeugung kann jedoch im untersuchten Beispiel bis zu 58 % des Endenergie-Aufwands der Anlage decken, wenn man die Bilanz über ein Jahr zieht. Unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit von Aufwand und Produktion ergibt sich eine Eigendeckung von lediglich 7 %. Bedingung für eine positive Bewertung von Anlagen, in denen photovoltaisch-thermische Kollektoren als Wärmepumpenquelle eingesetzt werden, ist also entweder eine unterbrechungsfreie Einspeisemöglichkeit ins Elektrizitätsnetz oder die ergänzende Ausstattung der Anlage mit größeren Speicherkapazitäten.

# Abstract

Solar thermal collectors and heat pumps can be combined for space heating purposes. Possible goals are low operating costs, saving of fossil resources, or less emissions of green house gasses or otherwise harmful fumes. Among today's heat generators, both heat pumps and solar thermal collectors are special, as they utilise final energy to activate environmental energy.

The main objective of this thesis was to describe the influence of solar thermal energy usage on the systems' seasonal performance factors. Solar thermal energy can be applied either on the source-side or sink-side of the heat pump, and so, the advantages and disadvantages of both options were to be assessed.

Regarding the methods, there were three approaches: an analysis of market-available systems, the evaluation of multiple field test projects, and finally, computer simulations. The scope was restricted to electric-driven compressor heat pumps and single-family or multi-family houses up to 15 units.

The analysis of 128 combined solar-thermal heat pump systems proved the market-availability of such combinations. For one third of these systems, solar energy was (also) utilised as heat pump source.

In total, 32 field test installations were evaluated. The seasonal performance factors of the systems ranged between values below 2 and values higher than 5. As a methodical result, seasonal performance factors of different system boundaries were converted with high determination. Additionally, the influences of component sizing on the system performance were quantified.

Simulation results showed that solar-thermal energy generated by photovoltaic-thermal collectors can clearly increase the system performance when applied as useful energy. An additional usage as heat source for the heat pump had a marginal effect. More convincing, the photovoltaic electricity generation that comes along could cover 58 % of the final energy in the given example. However, this is only

true on annual balancing. When the concurrence of the local production and consumption is taken into account, on-site coverage amounts to only 7 %. Therefore, the condition for a positive assessment of photovoltaic-thermal heat pump systems is either an unlimited option to feed the local electricity production to the grid or certain storage capacities added locally.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Größenverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlegende Aspekte der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen . . . . .	3
1.2 Ziel, Vorgehensweise und Gliederung . . . . .	5
<b>2 Marktbezogene Analyse</b>	<b>7</b>
2.1 Überblick über publizierte Studien . . . . .	8
2.2 Methoden . . . . .	9
2.3 Kategorisierung . . . . .	12
2.4 Vergleichende Analyse marktverfügbarer Systeme . . . . .	14
2.4.1 Vergleich der Unternehmen nach Herkunft . . . . .	15
2.4.2 Vergleich nach Systemfunktionen . . . . .	16
2.4.3 Vergleich nach Systemkonzepten . . . . .	18
2.4.4 Vergleich nach Wärmepumpen-Eigenschaften . . . . .	19
2.4.5 Vergleich nach Kollektor-Eigenschaften . . . . .	24
2.4.6 Queranalyse von Kollektor-Bauform und Systemkonzept . .	25
2.5 Verbreitung und Marktdurchdringung . . . . .	26

2.5.1	Häufigkeit der Solarthermie-Kombination unter den Wärmepumpenanlagen . . . . .	26
2.5.2	Prognose . . . . .	28
2.6	Zwischenfazit . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Vergleichende und exemplarische Auswertung von Feldtestprojekten</b>	<b>31</b>
3.1	Feldtest-Methoden . . . . .	31
3.2	Bewertungsgrößen . . . . .	32
3.2.1	Testverfahren und Bewertungsgrößen für Wärmepumpen . .	33
3.2.2	Systembezogene Bewertungsgrößen . . . . .	34
3.3	Auswertung von Anlagen unter realen Betriebsbedingungen . . . . .	38
3.3.1	Dokumentation der Anlagen . . . . .	38
3.3.2	Vergleich der Leistungszahlen und Arbeitszahlen . . . . .	41
3.3.3	Einflüsse auf die Arbeitszahlen und Bewertung . . . . .	45
3.4	Detailanalyse: Außenluft-Wärmepumpenanlage mit parallelem Konzept . . . . .	51
3.4.1	Charakterisierung des Gebäudes und der Anlage . . . . .	51
3.4.2	Anlagenbewertung . . . . .	53
3.4.3	Aufschlüsselung des Endenergie-Aufwands . . . . .	57
3.4.4	Eignung der Bewertungsgrößen . . . . .	61
3.5	Detailanalyse: Außenluft-Wärmepumpenanlage mit parallel-seriellem Konzept . . . . .	67
3.5.1	Charakterisierung des Gebäudes und der Anlage . . . . .	67
3.5.2	Anlagenbewertung . . . . .	69
3.6	Zwischenfazit . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Analyse einer Wärmepumpenanlage mit photovoltaisch-thermischen Solarkollektoren als Quelle</b>	<b>78</b>
4.1	Einleitung . . . . .	78
4.1.1	Zielstellung . . . . .	79
4.1.2	Photovoltaisch-Thermische Kollektoren . . . . .	80
4.1.3	Literaturrecherche . . . . .	83
4.2	Methoden und Randbedingungen . . . . .	85
4.2.1	Untersuchte Anlagenvarianten . . . . .	85
4.2.2	Charakterisierung des Gebäudes und der Anlage . . . . .	90
4.2.3	Simulationsprogramm und Modelle . . . . .	92
4.2.4	Optimierungsprogramm . . . . .	97

4.2.5	Systemregelung und Optimierungsparameter . . . . .	98
4.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	99
4.3.1	Bilanzierung der Anlagen-Varianten . . . . .	99
4.3.2	Optimierung der Regelungsparameter . . . . .	103
4.3.3	Bewertung der solarthermischen Quelle . . . . .	105
4.3.4	Bewertung des photovoltaischen Ertrags . . . . .	108
4.4	Zwischenfazit . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
	<b>Anhang A Visualisierung der Konzepte</b>	<b>121</b>
	<b>Anhang B Evaluierte Unternehmen</b>	<b>129</b>
	<b>Literatur</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellarischer Lebenslauf</b>	<b>144</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Unternehmen nach Jahr der Markteinführung ihres Wärmepumpensystems mit Solarthermienutzung . . . . .	2
2.1	Auszug aus dem Datenblatt einer Wärmepumpe mit zweistufigem Kompressor . . . . .	10
2.2	Erfasste Unternehmen nach Ländern . . . . .	15
2.3	Marktverfügbare Systeme nach Funktion . . . . .	17
2.4	Marktverfügbare Systeme nach Konzept . . . . .	19
2.5	Marktverfügbare Systeme nach Quelle . . . . .	20
2.6	Marktverfügbare Systeme nach Kältemittel . . . . .	22
2.7	Marktverfügbare Systeme nach Kollektor-Bauform . . . . .	24
2.8	Marktverfügbare Systeme korreliert nach Konzept und Kollektor-Bauform	25
3.1	Vereinfachtes Schema der Heizungsanlage im Projekt „Haus der Zukunft“, Bilanzgrenzen nach Malenković et al. . . . .	36
3.2	Vereinfachtes Schema der Heizungsanlage im Projekt „Haus der Zukunft“, Visualisierung gemäß Frank et al. . . . .	37
3.3	Nenn-Leistungszahlen der installierten Wärmepumpen . . . . .	41
3.4	Gemessene Arbeitszahlen $SPF_{SHP}$ als Funktion der gemessenen Arbeitszahlen $SPF_{bSt}$ . . . . .	42
3.5	Gemessene Arbeitszahlen $SPF_{SHP}$ als Funktion der gemessenen Arbeitszahlen $SPF_{SHP+}$ . . . . .	43
3.6	Gemessene und konvertierte $SPF_{SHP}^*$ und $SPF_{bSt}^*$ der Feldtestanlagen sowie Aufwände für Raumheizung und Trinkwarmwasser . . . . .	44
3.7	Gemessene und konvertierte $SPF_{SHP}^*$ als Funktion der Wärmepumpenquelle . . . . .	46
3.8	Gemessene und konvertierte $SPF_{SHP}^*$ als Funktion des Verhältnisses von installierter Aperturfläche und Nennleistung der Wärmepumpen . . . .	48
3.9	Gemessene und konvertierte $SPF_{SHP}^*$ als Funktion des Trinkwarmwasser-Anteils am Nutzenergie-Aufwand . . . . .	50

3.10	Untersuchte Anlage „WP Effizienz F“ mit parallelem Konzept, Visualisierung nach Frank et al. . . . . .	53
3.11	Arbeitszahl auf Monats- und Jahresbasis gemäß verschiedener Bilanzgrenzen . . . . .	54
3.12	Energiebilanz des Trinkwarmwasser-Speichers . . . . .	56
3.13	Aufschlüsselung des (elektrischen) Endenergie-Aufwands auf die Komponenten der Heizungsanlage . . . . .	58
3.14	Aufschlüsselung des Jahres-Endenergieaufwands auf die Komponenten der Heizungsanlage . . . . .	59
3.15	Für die detailanalytisierte Feldtestanlage gemessener volumetrischer und energetischer Trinkwarmwasseraufwand sowie gemessene Kaltwasser- und Trinkwarmwassertemperatur . . . . .	63
3.16	„Haus der Zukunft“ in Regensburg aus Südost-Richtung . . . . .	68
3.17	SPF auf Monats- und Jahresbasis gemäß verschiedener Bilanzgrenzen . . . . .	70
3.18	Energiebilanz des Kombi-Speichers . . . . .	72
4.1	Wirkungsgradkennlinien nach DIN EN 12975-2 eines verglasten Flachkollektors und eines photovoltaisch-thermischen (PVT) Kollektors bei einer flächenbezogenen Einstrahlung von $800 \text{ W/m}^2$ . . . . .	82
4.2	Vereinfachte Darstellung der Variante 1 (nicht-solare Referenz) . . . . .	86
4.3	Vereinfachte Darstellung der Variante 2 (photovoltaische Referenz) . . . . .	87
4.4	Vereinfachte Darstellung der Variante 3 (solarthermische Referenz) . . . . .	88
4.5	Vereinfachte Darstellung der Variante 4 (photovoltaisch-thermische Referenz) . . . . .	89
4.6	Vereinfachte Darstellung der Variante 5 (finale Variante) . . . . .	90
4.7	Die Leistungszahl nach DIN EN 14511:2008 als Funktion der Quelltemperatur und der Wärmepumpen-Vorlauftemperaturen. Ergebnisse aus Teststands-Messungen sowie Simulationen mit dem polynomischen und dem abschnittsweise definierten Modell. . . . .	94
4.8	Sankey-Diagramm für Anlagen-Variante 1 (nicht-solare Referenz) . . . . .	100
4.9	Sankey-Diagramm für Anlagen-Variante 2 (photovoltaische Referenz) . . . . .	101
4.10	Sankey-Diagramm für Anlagen-Variante 3 (solarthermische Referenz) . . . . .	101
4.11	Sankey-Diagramm für Anlagen-Variante 4 (photovoltaisch-thermische Referenz) . . . . .	102
4.12	Sankey-Diagramm für Anlagen-Variante 5 . . . . .	103
4.13	Sensitivität der Arbeitszahl $\text{SPF}_{\text{SHP}+}$ auf den Regelungsparameter $\Delta \dot{T}_{\text{Kollektor}}$ . . . . .	104

4.14	Sensitivität der Arbeitszahl $\text{SPF}_{\text{SHP}+}$ auf den Regelungsparameter $\Delta\dot{T}_{\text{Quelle}}$ . . . . .	105
4.15	Solarthermische Wärmeerzeugung sortiert nach der Vorlauftemperatur des Kollektorfelds . . . . .	106
4.16	Elektrizitätsaufwand und -erzeugung in den drei Varianten mit Photovoltaik-Nutzung . . . . .	109
4.17	Elektrizitätsaufwand und -erzeugung in Variante 5 sowie Eigendeckungsanteil auf Monatsbasis nach DIN V 18599 [74] . . . . .	110
A.1	System mit rein parallelem Konzept . . . . .	122
A.2	System mit rein seriellen Konzept . . . . .	123
A.3	System mit rein regenerativem Konzept . . . . .	124
A.4	System mit parallel-seriellem Konzept . . . . .	125
A.5	System mit parallel-regenerativem Konzept . . . . .	126
A.6	System mit seriell-regenerativem Konzept . . . . .	127
A.7	System mit parallel-seriell-regenerativem Konzept . . . . .	128