Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Jahresbericht 1. Dezember 2011

Solarthermie-Wärmepumpen-Kombisysteme „SOL-HEAP“

Ein Beitrag an den IEA-SHC Task 44

Auftraggeber:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solarwärme
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:
Institut für Solartechnik SPF
Hochschule für Technik Rapperswil HSR
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.solarenergy.ch

Autoren:
Haller Michel, Institut für Solartechnik SPF, michel.haller@solarenergy.ch
Philippen Daniel, Institut für Solartechnik SPF, daniel.philippen@solarenergy.ch
Frank Elimar, Institut für Solartechnik SPF, elimar.frank@solarenergy.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns
BFE-Programmleiter: Jean-Christophe Hadorn
BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500494-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhalt

Abstract 3
Einleitung / Projektziele 4
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 5
Thermodynamische Analysen 5
Messungen an unabgedeckten Kollektoren 5
Messung und Simulation von Wärmepumpen 6
Erweiterung des Kombi-Teststandes und Messungen an Wärmepumpen-Solar Kombisystemen 7
Nationale / internationale Zusammenarbeit 8
Bewertung 2011 und Ausblick 2012 8
Publikationen 2011 8
Publikationen 2010 9
Literatur 9

Abstract

Im Projekt SOL-HEAP wird am Institut für Solartechnik SPF die Kombination von Solarwärme mit Wärmepumpen für die Bereitstellung von Raumwärme und Brauch-Warmwasser untersucht. Die Projektdauer ist von Januar 2010 bis Februar 2014. Die Aktivitäten des SPF finden dabei im Zusammenhang mit dem IEA-SHC Task 44 & HPP Annex 28[1] statt, in welchem das SPF den Subtask C „Modelling and Simulation“ leitet.

Die im Vorjahr begonnenen thermodynamischen Analysen von Solar-Wärmepumpen-Systemen wurden 2011 erweitert und auf internationalen Konferenzen präsentiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Solarwärme für den Verdampfer einer Wärmepumpe gegenüber der direkten Verwendung nur bei geringer Sonneneinstrahlung interessant ist.

Die ebenfalls im Vorjahr begonnenen Messungen an unabgedeckten Kollektoren wurden sowohl im Outdoor-Prüfstand als auch in der Klimakammer fortgesetzt. Mit diesen Messungen konnten verschiedene Einflüsse auf den Kollektorertrag bei Betrieb unterhalb der Umgebungstemperatur ohne Solarstrahlung demonstriert werden. Es konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass der höhere Energiegewinn bei stärkerer Neigung auch bei Abwesenheit von Wind nicht auf eine Zunahme der freien Konvektion zurückgeführt werden kann, sondern ein Resultat der Infrarot-Strahlungsbilanz ist.

Bei der Entwicklung neuer Simulationsmodelle konnte durch eine Kooperation mit der TU Graz das am SPF (anfänglich in Zusammenarbeit mit der NTB) erstellte physikalische Wärmepumpen-Modell deutlich verbessert werden.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten in diesem Jahr bildete die Fertigstellung des System-Teststandes für die Prüfung von Solarwärme-Anlagen in Kombination mit Wärmepumpen. Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme einer Klimakammer und eines Emulationsmoduls für Erdsonden können nun sowohl Luft-Wärmepumpen als auch Erdsonden-Wärmepumpen im dynamischen Systemtest in Kombination mit Solarwärmeanlagen getestet werden. Ein erster Systemtest konnte bereits abgeschlossen werden, das zweite System befindet sich derzeit in der Prüfung und weitere Systeme sind bereits zur Prüfung angemeldet. Durch die dynamische Prüfung der von den Herstellern entwickelten Systemen kann die Qualität insbesondere der System-Integration einzelner Komponenten wesentlich verbessert werden, und damit den Herstellern eine wichtige Dienstleistung für die Entwicklung energieeffizienter Systeme angeboten werden.

[1] International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme (SHC) and Heat Pump Programme (HPP)

Einleitung / Projektziele

In den vergangenen Jahren wurden etliche Systeme zur Wärmebereitstellung auf Basis der Kombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen (WP) entwickelt. Prototypen sind auf grossen Messen vorgestellt worden und die ersten Modelle befinden sich bereits in Serienproduktion. Die Hersteller bzw. Anbieter kommen oft entweder aus der Solarenergie- oder der Wärmepumpenbranche und verfügen dementsprechend über versiertes fachspezifisches Hintergrundwissen schwerpunktmässig in einer der genannten Technologien. Dies hat vielfach Auswirkungen auf die Art der Systemzusammenstellung, und die angebotenen Systemkonzepte sind entsprechend sehr unterschiedlich. Für eine Reihe von unterschiedlichen neuen Entwicklungen werben die Anbieter mit drastischen Verbesserungen der System-Arbeitszahlen, welche bislang jedoch kaum von unabhängiger Seite untersucht und belegt worden sind. Hier stellt sich zum Beispiel die Frage, ob oder wann die Solarwärme mit Vorteil nicht direkt genutzt, sondern für den Verdampfer der Wärmepumpe bereitgestellt werden sollte, oder unter welchen Bedingungen eine Regeneration des Erdreichs mit Überschuss-Solarwärme im Sommer bei Tiefensonden sinnvoll ist. Aber auch für die einfacheren Kombinationen, in welchen die Solarwärme immer direkt genutzt wird, stellen sich derzeit noch unbeantwortete Fragen, zum Beispiel bezüglich der Beladung des solaren Kombispeichers durch die Wärmepumpe und zum Einfluss der Schichtung des Kombispeichers auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Aufgrund dieser Entwicklungen und Fragestellungen verfolgt das Projekt SOL-HEAP am Institut für Solartechnik SPF die folgenden Ziele:

1. Ausarbeitung einer ***systematischen Gliederung der Wärmepumpen-Solarthermie-Systemkonzepte*** aus technischer Sicht. Diese Gliederung soll als Grundlage dienen für den Vergleich und die Beurteilung verschiedener Konzepte, sowie für die (Weiter-) Entwicklung von neuen Anlagenkonzepten.
2. ***Dynamische Simulationen von Wärmepumpen-Solarsystemen***. Mit dynamischen Simulationen von Wärmepumpen-Solarthermie-Systemen werden verschiedene Konzepte für die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen untersucht und verglichen. Um neue Konzepte für die Einbindung des Wärmepumpen-Kreislaufs ins Gesamtsystem beurteilen zu können, kommt hierzu ein physikalisches Wärmepumpenmodell zum Einsatz. Aus den Simulationsstudien werden Empfehlungen abgeleitet für sinnvolle und vorteilhafte Kombinations-Strategien, sowie für die Anforderungen an die einzelnen Komponenten wie Speicher, Regelung, Kollektorkreis und Wärmepumpe.
3. ***Aufbau eines Kombi-Teststandes*** (KTS) zur Durchführung von Systemtests. Das am SPF entwickelte Concise Cycle Test (CCT)-Verfahren, welches in der Vergangenheit erfolgreich für die Prüfung von Solarthermie in Kombination mit Öl-, Gas- und Pelletswärmeerzeugern eingesetzt wurde, wird weiter entwickelt und auf die Anforderungen der Kombination mit Wärmepumpen angepasst.
4. ***Durchführung von Systemtests*** zur Ermittlung realitätsnaher Jahresarbeitszahlen (JAZ) unterschiedlicher kombinierter Wärmepumpen-Solarthermie-Systeme auf dem erweiterten Kombisystemteststand (KTS) des SPF. Überprüfung verschiedenster dynamischer Betriebszustände sowie der Eignung von Regelung und Systemkonfiguration.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Thermodynamische Analysen

Die bereits im Jahresbericht 2010 erwähnten Systembetrachtungen zur Nutzung von Solarwärme für den Verdampfer von Wärmepumpen wurden erweitert und sowohl am 21. OTTI-Symposium Thermische Solarenergie 2011 als auch am ISES Solar World Congress 2011 einem breiteren Publikum vorgestellt (Haller & Frank 2011b; Haller & Frank 2011a). Für Systeme, deren Wärmepumpe wahlweise Solarwärme oder eine andere Wärmequelle nutzen kann (dual source heat pumps), konnte gezeigt werden, dass oberhalb einer gewissen Einstrahlung auf die Kollektorebene die Nutzung der Solarwärme für den Verdampfer der Wärmepumpe zu niedrigeren System-Arbeitszahlen führt als die direkte Nutzung der Solarwärme. Diese Strahlungslimite ist einerseits abhängig von den Kennlinien der Wärmepumpe und des Kollektors, andererseits aber auch von den Temperaturen der Wärmequelle und des Wärmebedarfs. Detaillierte Ergebnisse sind den genannten Publikationen zu entnehmen.

Messungen an unabgedeckten Kollektoren

Messungen an unabgedeckten Kollektoren wurden sowohl im Outdoor-Prüfstand (Abbildung 1) als auch in der Klimakammer durchgeführt. Die Resultate der Outdoor-Messungen wurden am 21. OTTI Symposium Thermische Solarenergie veröffentlicht (Philippen et al. 2011).

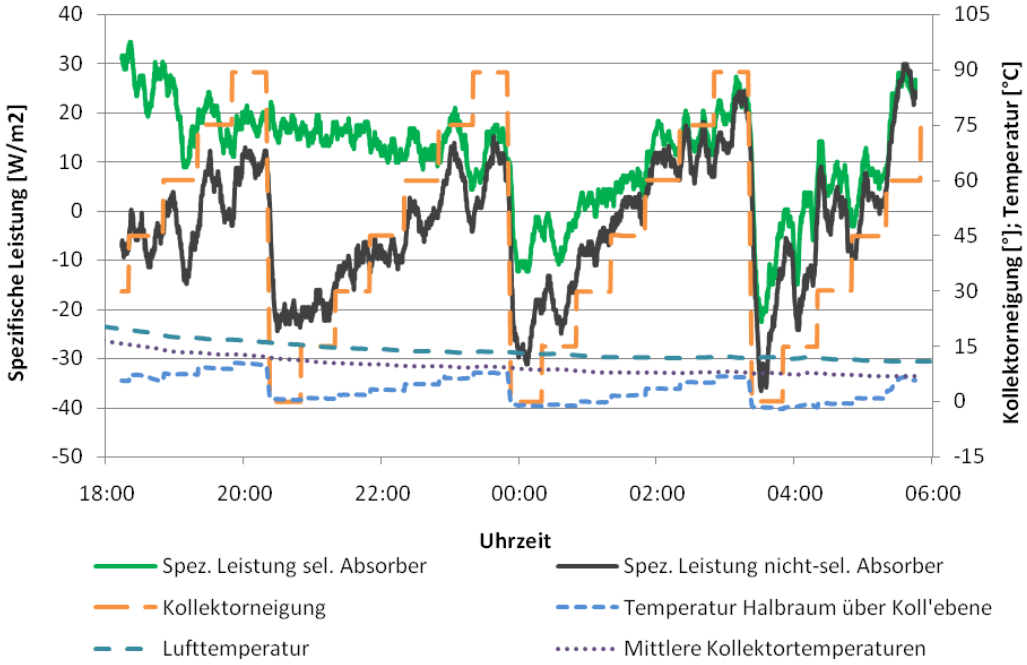

Abbildung 1: Spezifische Leistungen des selektiven und des nicht-selektiven unabgedeckten Absorbers und Temperatur des Halbraums über der Kollektorebene während einer Nachtmessung bei wechselnden Kollektorneigungen (Messung vom 21./22.10.2010, Temperatur Kollektoreinlass 4 K unter Aussentemperatur), publiziert in Philippen et al. (2011).

Ziel dieser Messungen war das Bestimmen des Verhaltens der Kollektoren unter Bedingungen, welche für Solarkollektoren sonst unüblich und daher in Systemen ohne Wärmepumpen auch nicht relevant sind. Dazu gehören zum Beispiel konvektive Energiegewinne, welche sich auch ohne Solarstrahlung erzielen lassen, sowie Energiegewinne durch Kondensation von Luftfeuchte. Aufgrund der Theorie der freien Konvektion war zu erwarten, dass der kon-

vektive Wärmeübergang bei Abwesenheit von Wind bei einer geneigten Fläche abhängig ist von ihrer Neigung. Aus den Messungen konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Eine Abhängigkeit der Energiegewinne von der Kollektorneigung konnte zwar festgestellt werden, jedoch lag die Ursache für diese Abhängigkeit nicht wie erwartet im Einfluss der Neigung auf die freie Konvektion, sondern im Einfluss des Infrarot-Strahlungsaustauschs. Dieser Strahlungsaustausch wird bei geneigten Flächen (resp. unabgedeckten Kollektoren) umso stärker von der Gegenstrahlung der Umgebung bestimmt, je mehr die Fläche aus der Horizontalen gedreht wird – und somit weg von der um rund 10 K kälteren Himmelstemperatur.
- Nach Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustauschs in der Energiebilanz konnte auch bei geringen Windgeschwindigkeiten kein eindeutiger Einfluss der Neigung auf den konvektiven Wärmeübergang festgestellt werden (Abbildung 2).
- Anhand eines unabgedeckten selektiven Absorbers konnte der temporäre Verlust der Selektivität bei einsetzender Kondensation eindeutig festgestellt werden, so wie er aufgrund der Theorie auch erwartet worden war.

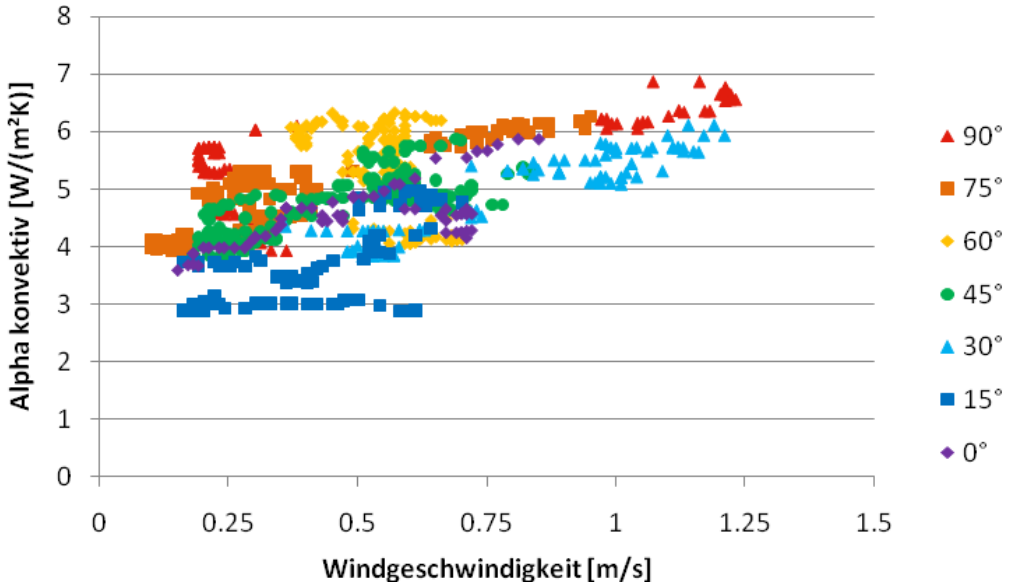

Abbildung 2: Berechneter konvektiver Wärmeübergangskoeffizient α_{conv} der unabgedeckten Kollektoren in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Kollektorneigung (Messung vom 17./18.2.2011, Temperatur Kollektoreinlass 7 K unter Aussentemperatur), Publiziert in Philippen et al. (2011).

Messung und Simulation von Wärmepumpen

Sowohl eine Luft-Wasser-Wärmepumpe als auch eine Sole-Wasser-Wärmepumpe wurden im Prüfstand des SPF ausgemessen und mit dem am SPF in Zusammenarbeit mit dem NTB Buchs und der TU Graz entwickelten physikalischen Wärmepumpen-Modell verglichen. Aufgrund dieser Messungen wurde das Modell weiter verbessert. Das entstandene verbesserte Modell bildet sowohl die Wärmeübertragung im Enthitzer als auch im Kondensator realitätsnaher ab und rechnet um Faktor 100 schneller als das vorhergehende.

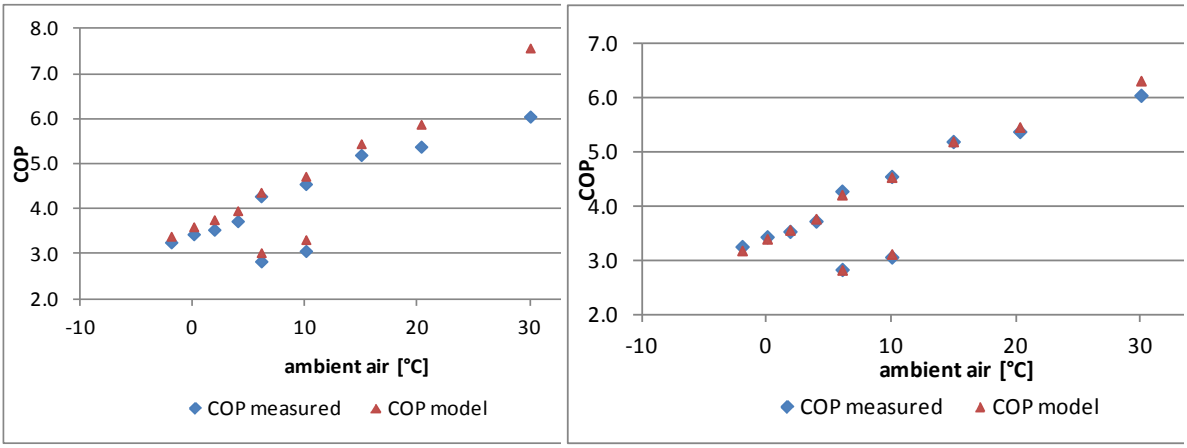

Abbildung 3: Vergleich von gemessenen und simulierten COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe vor der Erweiterung (links) und nach der Erweiterung des Simulationsmodells.

Erweiterung des Kombi-Teststandes und Messungen an Wärmepumpen-Solar Kombisystemen

Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2011 war der Abschluss der Erweiterung des Kombi-Teststandes für die Prüfung von Solar-Wärmepumpen-Kombinationen. Für die Prüfung von Luft-Wasser-Wärmepumpen konnte mit der Klimakammer das 12-Tages-Profil für Temperatur und Feuchte des Concise Cycle Tests erfolgreich abgefahren werden. Für die Prüfung von Sole-Wasser-Wärmepumpen wurde ein Emulationsmodul erstellt, welches aufgrund einer Simulation des Erdreichs mit dem Modell von (Wetter & Huber 1997) die Vorlauftemperatur der Sonde in Abhängigkeit der Jahreszeit und des Wärmeentzugs durch die Wärmepumpe einstellt. Die Weiterentwicklung dieser Prüfmethoden für Solar-Wärmepumpen-Kombisysteme wurde unter anderem am VDI Wissensforum Wärmepumpen in Deutschland vorgestellt (Hallller 2011).

Abbildung 4: Klimakammer für die dynamische Prüfung von Luft-Wärmepumpen (links) sowie Emulationsmodul für die Erdsonde (rechts) von Solar-Wärmepumpen-Systemen.

Ein Solar-Wärmepumpen-System eines Herstellers konnte bereits im Systemteststand mit der CCT-Methode vermessen werden. Die Prüfung von zwei weiteren Systemen steht kurz bevor. Insgesamt sollen bis Ende 2013 mindestens zehn Solar-Wärmepumpen-Kombisysteme vermessen werden.

Nationale / internationale Zusammenarbeit

Für die Weiterentwicklung des physikalischen Wärmepumpen-Modells wurde 2011 intensiv mit dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz (IWT-TUG) zusammen gearbeitet. Die Resultate dieser Kooperation wurden auch am TRNSYS-Usertag in Stuttgart präsentiert (Dröscher 2011). Im Rahmen des IEA-SHC Task 44 und HPP Annex 38 leitet Michel Haller (SPF) den Subtask C „Modelling and Simulation“. Die internationale Zusammenarbeit ist insbesondere im Rahmen dieses IEA Tasks und bezüglich von Modellen für die Simulation von Wärmepumpen-Solarsystemen sehr intensiv. Zwei IEA-Task 44 Meetings haben im Jahr 2011 stattgefunden. Das SPF Institut für Solartechnik hat in diesem Rahmen vor allem die Outdoor-Messungen an unabgedeckten Kollektoren, die thermodynamischen Analysen von Systemen mit zwei Wärmequellen für die Wärmepumpe sowie die Validierung des Wärmepumpenmodells vorgestellt. Begleitend zu den Aktivitäten des IEA SHC Task 44 und zwecks der Koordination und Vernetzung von Schweizer F&E-Projekten zu diesem Themenbereich hat das SPF bereits im Vorjahr eine schweizerische Arbeitsgruppe „Solarthermie und Wärmepumpen“ ins Leben gerufen. An den Treffen nahmen in diesem Jahr zusätzlich zu Teilnehmern des Vorjahres die 3S Swiss Solar Systems aus Lyss und die H+S Solar aus Rebstein teil.

Bewertung 2011 und Ausblick 2012

Der Fortschritt im Projekt SOL-HEAP entspricht dem Projektplan. Die kommenden Aufgaben umfassen:

- Im Vordergrund stehen im Jahr 2012 ***Kombi-Systemtests*** (CCT-Methode) von Systemen, welche Wärmepumpen mit solarthermischen Kollektoren kombinieren.
- ***Systematische Gliederung/Klassifizierung***: Erstellen von Factsheets für die in der Schweiz angebotenen Systeme.
- Die Untersuchungen mit Hilfe ***dynamischer System-Simulationen*** werden weitergeführt. Insbesondere soll auch der Einfluss einer guten Speicherschichtung und der Einfluss von Low-Flow Konzepten auf die Gesamt-System-Effizienz untersucht werden, sowie der Einfluss thermischer Speicher auf der Quellenseite der Wärmepumpe.
- Auswertung und ***wissenschaftliche Aufbereitung von Feldmessdaten*** eines kombinierten Systems mit Luft-Wärmepumpe und Solarmwärme-Anlage für Raumheizung und Warmwasser.

Publikationen 2011

Haller, M.Y., 2011. Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen mit Kombination aus Wärmepumpen und Solarthermie. In: VDI-Fachkonferenz Wärmepumpen 2011 - Umweltwärme effizient nutzen, 7. - 8. Juni 2011, Frankfurt, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, Germany, 159-167.

Haller, M.Y. & Frank, E., 2011a. On the Potential of Using Heat from Solar Thermal Collectors for Heat Pump Evaporators. In: Proc. of the ISES Solar World Congress 2011, Aug. 28 - Sep. 2, Kassel, Germany.

Haller, M.Y. & Frank, E., 2011b. Steigert die Nutzung von Solarkollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen die System-Arbeitszahl? In: 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11. - 13. Mai, OTTI Regensburg, Bad Staffelstein, Germany, CD.

Philippen, D., Haller, M.Y. & Frank, E., 2011. Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang unabgedeckter Absorber. In: 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11. - 13. Mai, OTTI Regensburg, Bad Staffelstein, Germany, CD.

Publikationen 2010

Frank, E., Haller, M., Herkel, S. & Ruschenburg, J., 2010. Systematic Classification of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems. In: Proc. of the EuroSun 2010 Conference, Graz, Austria.

Haller, M. & Frank, E., 2010. Kombination von Wärmepumpen mit solarthermischen Kollektoren - Konzepte und Fragestellungen. In: CD - Konferenzbeiträge 16. Status-Seminar "Forschung und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt", BRENET - Nationales Kompetenznetzwerk Gebäudetechnik und erneuerbare Energien, ETH Zürich, 1-6.

Haller, M., Frank, E., Trinkl, C. & Zörner, W., 2010. Systematische Gliederung der Systemkombination von solarthermischen Anlagen mit Wärmepumpen. In: 20. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany.

Literatur

Dröscher, A., 2011. Type 877 - A new heat pump model for TRNSYS. Presentation at the TRANSSOLAR TRNSYS Usertag 2011, 18.11.2011, Stuttgart, Germany.

Haller, M.Y. & Frank, E., 2011a. On the Potential of Using Heat from Solar Thermal Collectors for Heat Pump Evaporators. In: Proc. of the ISES Solar World Congress 2011, Aug. 28 - Sep. 2, Kassel, Germany.

Haller, M.Y. & Frank, E., 2011b. Steigert die Nutzung von Solarkollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen die System-Arbeitszahl? In: 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11. - 13. Mai, OTTI Regensburg, Bad Staffelstein, Germany, CD.

Hallller, M.Y., 2011. Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen mit Kombination aus Wärmepumpen und Solarthermie. In: VDI-Fachkonferenz Wärmepumpen 2011 - Umweltwärme effizient nutzen, 7. - 8. Juni 2011, Frankfurt, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, Germany, 159-167.

Philippen, D., Haller, M.Y. & Frank, E., 2011. Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang unabgedeckter Absorber. In: 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11. - 13. Mai, OTTI Regensburg, Bad Staffelstein, Germany, CD.

Wetter, M. & Huber, A., 1997. TRNSYS Type 451 - Vertical Borehole Heat Exchanger EWS Model Version 2.4. Zentralschweizerisches Technikum Luzern & Huber Energietechnik.