

Steigert die Nutzung von Solarkollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen die System-Arbeitszahl?

Michel Y. Haller, Elimar Frank

Institut für Solartechnik SPF, Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil

Tel.: +41 55 222 4836, Fax: +41 55 4844

E-Mail: michel.haller@solarenergy.ch

Internet: www.solarenergy.ch

Einleitung

In den letzten Jahren wurden vermehrt Systeme für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser mit einer Kombination von Solarwärme und Kompressionswärmepumpe entwickelt und im Markt eingeführt [1]. Eine zunehmende Anzahl dieser Systeme bietet die Möglichkeit, die Solarwärme auch für den Verdampfer der Wärmepumpe zu nutzen oder zur Regeneration des Erdreichs einzusetzen. Die Möglichkeiten der hydraulischen Anordnung und Regelung der Komponenten in solchen Systemen sind vielfältig, und die Vor- und Nachteile verschiedener Konzepte zur Kombination beider Wärmeerzeuger sind derzeit noch wenig untersucht [2,3]. Die Analyse existierender Ansätze und neuer Konzepte inklusive Simulationswerkzeugen und Bewertungsansätzen ist Gegenstand von Arbeiten, welche derzeit im Rahmen des IEA-SHC Task 44 / HPP Annex 38 durchgeführt werden [4]. Für Systeme, welche die Kollektorwärme einerseits direkt zur Warmwasserbereitung oder Raumheizung in einen Pufferspeicher leiten können, andererseits aber auch die Möglichkeit haben, Kollektorwärme für den Verdampfer einer Wärmepumpe zu nutzen, stellt sich die Frage, wann welche Art der Kollektorwärmenutzung für den Systemwirkungsgrad am sinnvollsten ist. Diese Frage ist Gegenstand dieses Beitrages.

Allgemeine Betrachtungen

Beim betrachteten System wird davon ausgegangen, dass Sonnenkollektoren, Wärmepumpe und Pufferspeicher hydraulisch so kombiniert sind, dass die Kollektorwärme entweder direkt in den Pufferspeicher geführt werden kann (Abb. 1 links), oder indirekt für den Verdampfer der Wärmepumpe genutzt werden kann

(Abb. 1 rechts). Gleichzeitig hat die Wärmepumpe jederzeit die Möglichkeit, anstelle der Kollektorwärme eine andere Wärmequelle für das Verdampfen des Arbeitsmediums zu benutzen (zum Beispiel Luft, Erdreich/Sole, etc.).

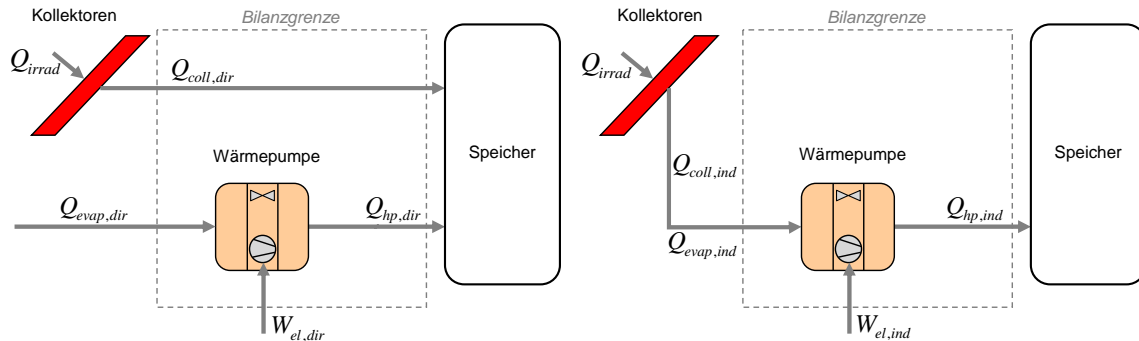


Abbildung 1: Einbindung der Kollektorwärme direkt (links) und indirekt, d.h. über den Verdampfer der Wärmepumpe (rechts). Quelle [5].

Eine entscheidende Frage für die Regelung dieses Systems ist, wann die Kollektorwärme direkt auf den Pufferspeicher geführt werden soll, und wann sie indirekt genutzt werden soll. Um dies beurteilen zu können wird als Zielgröße eine System-Arbeitszahl (AZ_{sys}) definiert (Gl. 1). Diese Arbeitszahl wird für einen beliebigen Zeitraum im Jahr berechnet als Verhältnis der Wärmemenge, welche vom gesamten System zur Verfügung gestellt wird ($Q_{use,sys}$), zur dafür benötigten elektrischen Arbeit ($W_{el,sys}$).

$$Gl. 1 \quad AZ_{sys} = \frac{Q_{use,sys}}{W_{el,sys}}$$

Für die Effizienz des Systems erscheint die indirekte Nutzung der Kollektorwärme nur dann sinnvoll, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$Gl. 2 \quad AZ_{sys,ind} > AZ_{sys,dir}$$

Damit die beiden Betriebsweisen (direkt und indirekt) miteinander verglichen werden können, wird angenommen, dass in beiden Betriebsweisen insgesamt gleich viel Energie auf gleichem Temperaturniveau in den Pufferspeicher geliefert wird. Dies ist dann der Fall, wenn ausreichend Energiebedarf vorhanden ist, um die gelieferte Wärme abzuführen. Ferner wird vereinfacht angenommen, dass die für den Betrieb des Kollektorkreises benötigte elektrische Leistung sowohl bei direkter Nutzung der Wärme als auch bei indirekter Nutzung der Wärme gleich gross ist. Unter diesen Bedingungen kann gezeigt werden, dass für eine vorteilhafte indirekte Nutzung der Kollektorwärme die in Gl. 3 gezeigte Bedingung erfüllt sein muss.

$$Gl. 3 \quad \frac{\Delta COP_{hp}}{(COP_{hp,dir} - 1)} \cdot \frac{\Delta \eta_{coll}}{\eta_{coll,dir}} > 1$$

Wobei $\Delta COP_{hp} = COP_{hp,ind} - COP_{hp,dir}$ und $\Delta \eta_{coll} = \Delta \eta_{coll,ind} - \Delta \eta_{coll,dir}$. Abb. 2 veranschaulicht diese Bedingung als Kurven für verschiedene Werte von $COP_{hp,dir}$. Angenommen, der $COP_{hp,dir}$ (d.h. der COP bei Nutzung der alternativ zum Kollektor zur Verfügung stehenden Wärmequelle) wäre 2.5. Damit nun die (indirekte) Nutzung der Kollektorstärke für den Verdampfer der Wärmepumpe einen positiven Effekt auf AZ_{sys} hätte, müsste zum Beispiel der COP der Wärmepumpe gegenüber der parallelen Betriebsweise von Kollektor und Wärmepumpe um 1, und zugleich der Kollektorertrag um 150% (relativ gegenüber dem Ertrag bei direkter Nutzung) steigen.

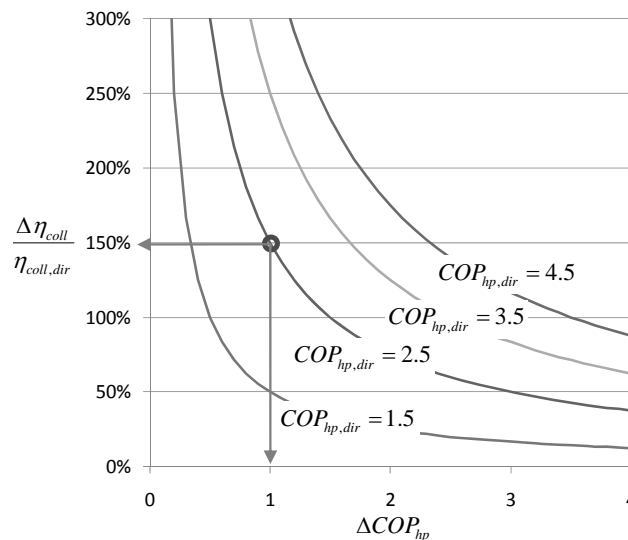


Abbildung 2: Grenzlinsen für eine vorteilhafte **indirekte** Nutzung der Kollektorstärke für verschiedene $COP_{hp,dir}$, d.h. für verschiedene COP der Wärmepumpe bei direkter Nutzung der Kollektorstärke und zusätzliche (paralleler) Nutzung einer anderen Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe.

Aus Gl. 3 folgt, dass eine kritische Grösse I_{limit} für die Einstrahlung auf die Kollektorebene errechnet werden kann, unterhalb derer die indirekte Nutzung der Kollektorstärke positiv für die Arbeitszahl des Systems ist:

$$Gl. 4 \quad I_{limit} = \frac{\Delta COP_{hp}}{(COP_{hp,dir} - 1)} \cdot \frac{x_{dir} - x_{ind}}{\eta_0} + \frac{x_{dir}}{\eta_0}$$

Wobei $x = a_1 \cdot \Delta t_m + a_2 \cdot \Delta t_m \cdot |\Delta t_m|$ die Verluste des Kollektors in W/m^2 darstellen, welche abhängig sind von der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung ($\Delta t_m = (t_{coll,in} + t_{coll,out})/2 - t_{amb}$).

Anwendung auf einen konkreten Fall

Da sowohl der COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe als auch die Kollektorverluste abhängig sind von der Umgebungstemperatur (t_{amb}) zum einen und von der

Temperaturanforderung der Heizung ($t_{\text{heiz,VL}}$) zum anderen, ist auch der Wert von I_{limit} eine Funktion dieser beiden Größen, und kann für gegebene Kennlinien von Kollektor und Wärmepumpe berechnet werden. Im Folgenden wird die aufgezeigte Beziehung (Gl. 4) auf ein konkretes Beispiel angewendet, für welches gilt:

- Es wird Umgebungsluft verwendet als alternative Wärmequelle für die Wärmepumpe
- Eine Möglichkeit zur längerfristigen Speicherung von Solarwärme **vor** der Nutzung für den Verdampfer der Wärmepumpe ist nicht vorhanden.

Abb. 3 zeigt beispielhaft Kennlinien der Wärmepumpe im direkten und im indirekten Betriebsmodus, berechnet mit einer Simulation des Kältemittel-Kreisprozesses.

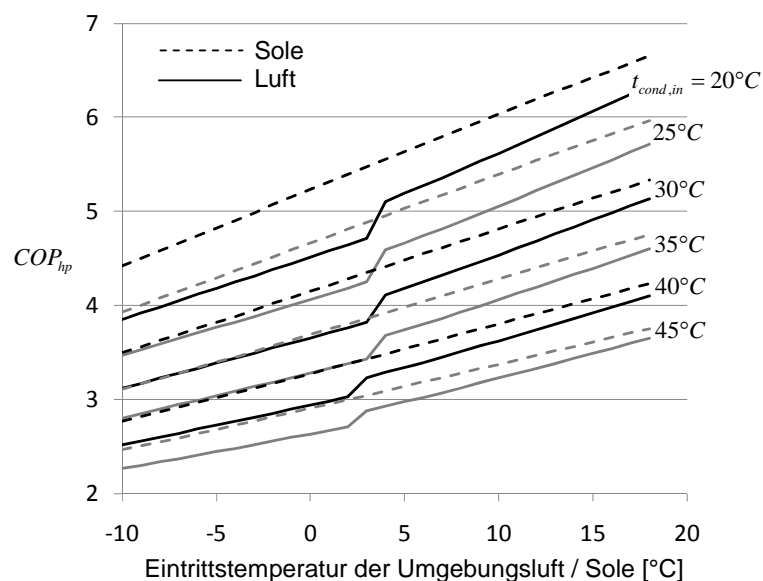


Abbildung 3: Kennlinien der Wärmepumpe für den Betrieb mit Luft und mit Sole in Abhängigkeit von den Eintrittstemperaturen (Luft oder Sole) auf den Verdampfer und vom Rücklauf des Heizkreises ($cond,in$).

Die Kennlinien der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Quelltemperatur sind generell schlechter für die Nutzung von Umgebungsluft, weil bei dieser Variante erstens zusätzlich ein Ventilator für die Luft betrieben werden muss, zweitens der Wärmeübergang von Luft auf das Arbeitsmedium schlechter ist, und drittens unterhalb von Umgebungstemperaturen von ca. 5 °C Vereisung auf dem Verdampfer stattfindet. Der momentane Wirkungsgrad der Kollektoren wird vereinfachend anhand der empirischen Gl. 5 und den Parametern $\eta_0 = 0.8$, $a_1 = 3.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $a_2 = 0.015 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$ berechnet:

$$\text{Gl. 5} \quad \eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{\Delta t_m}{I} - a_2 \cdot \frac{\Delta t_m \cdot |\Delta t_m|}{I}$$

Abb. 4 zeigt für die getroffenen Annahmen Werte für I_{limit} in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (t_{amb}) und der geforderten Nutztemperatur ($t_{heiz,VL}$). Daraus geht deutlich hervor, dass I_{limit} sich gegen grössere Werte verschiebt, je höher die Anforderungen der Heiz-Temperatur liegen und je tiefer die Umgebungstemperaturen sind. Die Resultate zeigen weiter, dass auch die optimale Temperaturdifferenz zwischen Kollektor-Austritt und Umgebungsluft ($t_{coll,out} - t_{amb}$) abhängig ist von der Heiz-Temperatur, der Einstrahlung und der Umgebungstemperatur.

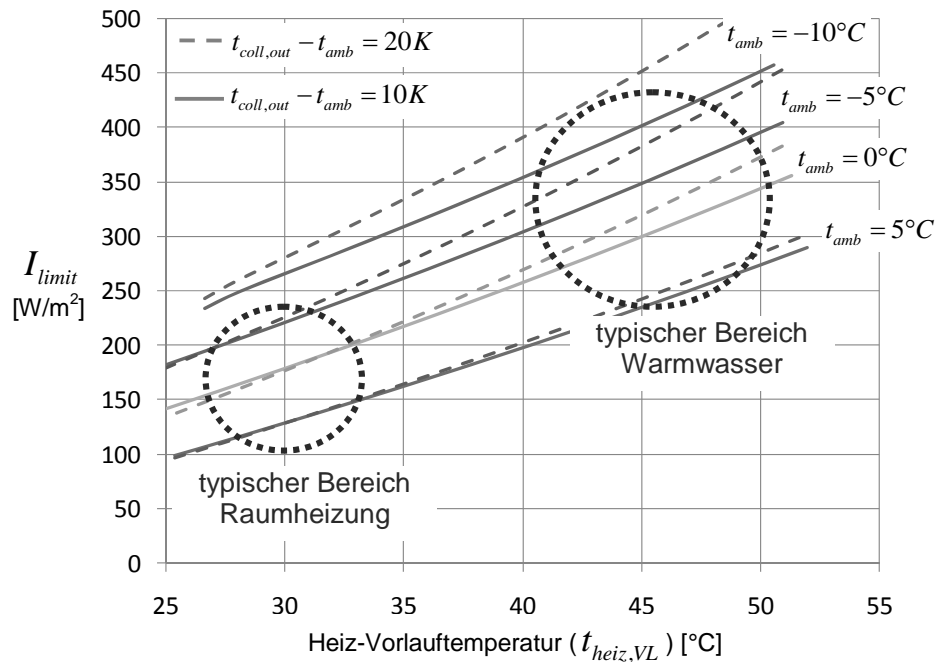


Abbildung 4: Werte für die Einstrahlung unterhalb derer sich die indirekte Nutzung von Kollektorzurwärme für das untersuchte System positiv auf die Arbeitszahl auswirkt, in Abhängigkeit der Heiz-Vorlauf-temperatur, der Umgebungstemperatur und der Temperaturdifferenz zwischen indirekt genutztem Kollektor und der Umgebung.

Schlussfolgerungen

Die Option, Solarwärme von der direkten Nutzung umzuschalten auf eine Nutzung für den Verdampfer einer Wärmepumpe wurde untersucht für Systeme, deren Wärmepumpe zusätzlich die Möglichkeit besitzt, eine alternative Wärmequelle (z. Bsp. Luft) zu nutzen. Mit Gl. 3 wurde eine Bedingung aufgestellt, welche erfüllt sein muss, damit die indirekte Nutzung der Kollektorzurwärme im Vergleich zur direkten Nutzung zu einer Erhöhung der System-Arbeitszahl und damit zu einer besseren System-Effizienz führt. Aus dieser Bedingung folgt, dass es bei gegebenen Kennwerten für die Wärmepumpe und den Kollektor sowie bei gegebenen Einsatzbedingungen (Heiz-Temperatur, Umgebungstemperatur, Temperatur der alternativen Quelle für die

Wärmepumpe) eine kritische Grösse für die solare Einstrahlung auf das Kollektorfeld gibt, oberhalb welcher eine indirekte Nutzung der Kollektorstärke nachteilig wäre. Für ein System mit abgedeckten Flachkollektoren, einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und **ohne** Speicherung von Wärme oder Kälte auf der Quellenseite der Wärmepumpe konnte gezeigt werden, dass die kritische Einstrahlung umso grösser ist, je tiefer die Umgebungstemperaturen sind und je höher die Temperatur der Heiz-Anforderung ist. Dies bedeutet, dass diese Art der Kollektorstärkenutzung vorwiegend bei Systemen mit tendenziell eher ungünstigen Bedingungen für „klassische“ Wärmepumpen oder Solarsysteme interessant sein könnte.

Symbole

AZ	Arbeitszahl, Verhältnis von Wärmelieferung zu el. Arbeit, -
a_1	Linearer Wärmeverlustkoeffizient, W/m^2K
a_2	Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient, W/m^2K^2
COP_{hp}	Coefficient of Performance (Arbeitszahl der Wärmepumpe)
I	Solareinstrahlung, W/m^2
Q	Wärme, J
t	Temperatur, °C
W	Arbeit, J
η	Kollektorwirkungsgrad, -
t_m	Mittlere Kollektortemperatur, °C

Subscript

amb	Umgebung
$coll$	Kollektor
$cond$	Kondensator (der Wärmepumpe)
dir	Direkte Kollektorstärkenutzung
el	Elektrisch
$evap$	Verdampfer (der Wärmepumpe)
$heiz, VL$	Anforderung Heizungs-Vorlauf
hp	Wärmepumpe
in	Eintritt
ind	Indirekte Kollektorstärkenutzung
$irrad$	Einstrahlung
out	Austritt
sys	System
use	Nutzenergie an den Speicher

Literatur

- [1] S. Trojek and E. Augsten, "Solartechnik und Wärmepumpe - Sie finden zusammen," Sonne Wind & Wärme, vol. 06/2009, 2009, pp. 62-71.
- [2] H. Henning and M. Miara, Systems using solar thermal energy in combination with heat pumps - 1st concept paper, Fraunhofer ISE, 2008.
- [3] S. Citherlet, J. Bony, and B. Nguyen, SOL-PAC - Analyse des performances du couplage d'une pompa à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation - Rapport final, Swiss Federal Office of Energy (SFOE), 2008.
- [4] Hadorn, J., 2010. Solar and Heat Pump Systems - A New IEA SHC Task 44 & HPP Annex and Analysis of Several Combinations for Low Energy Houses. In: Proc. of the EuroSun 2010 Conference, Graz, Austria.
- [5] Haller, M. & Frank, E., 2010. Kombination von Wärmepumpen mit solarthermischen Kollektoren - Konzepte und Fragestellungen. In: 16. Status-Seminar "Forschung und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt", BRENET, ETH Zürich, 1-6.

Korrigenda zu

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

S. 3, erste Zeile: anstatt $\Delta\eta_{coll} = \Delta\eta_{coll,ind} - \Delta\eta_{coll,dir}$ müsste $\Delta\eta_{coll} = \eta_{coll,ind} - \eta_{coll,dir}$ stehen.

6.5.2011, M.Y. Haller