

## **Solarwärme & Wärmepumpen – Interpretation der Simulationen des IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38**

Michel Y. Haller, E. Frank

Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR

Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil

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

E-Mail: michel.haller@solarenergy.ch

Internet: www.solarenergy.ch

### **Einleitung**

Die Kombination von Solarwärme mit Wärmepumpen erfreut sich wachsender Beliebtheit. Die möglichen Varianten der hydraulischen und regeltechnischen Kombination von Sonnenkollektoren, Wärmepumpen, und Wärmespeicher sind jedoch zahlreich, und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Konzepte sind für den Kunden kaum einschätzbar. Im IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 (T44A38) "Solar and Heat Pump Systems" wurden von 2010 – 2014 verschiedenste System-Konzepte im Feld-Monitoring, durch Labortests und mit System-Simulationen untersucht. Subtask C dieses IEA Tasks befasste sich mit der Simulation von Komponenten und Systemen. In den meisten Fällen beschränkten sich die Untersuchungen dabei auf Systeme welche Warmwasser und Raumwärme für Einfamilienhäuser bereitstellen. Manche Untersuchungen schlossen jedoch auch Kühlung oder Mehrfamilienhauskonzepte in die Untersuchung mit ein. In diesem Beitrag werden Resultate präsentiert und analysiert, welche im Rahmen des T44A38 von verschiedenen Teilnehmern des Tasks erarbeitet wurden.

### **System-Klassifizierungen und Kennzahlen**

Es gibt unzählige verschiedene Möglichkeiten, Solarthermie und Wärmepumpen in einem System zu kombinieren. Für ein einfaches und schnelles Verständnis der Systeme wurde im T44A38 eine einheitliche Nomenklatur in Anlehnung an frühere Arbeiten (Freeman et al. 1979; Trinkl et al. 2004) verwendet, und eine schematische Darstellung der möglichen Energiepfade in einem "energy flow chart" definiert (Frank et al. 2010). Im Wesentlichen wird dabei unterschieden zwischen den folgenden prinzipiellen Ansätzen:

- **Parallel (P):** In einem parallelen System liefern die Solarkollektoren und die Wärmepumpe direkt Wärme auf Nutztemperaturniveau, und es besteht keine Möglichkeit, Solarwärme für den Verdampfer der Wärmepumpe zu nutzen. Es steht eine andere Wärmequelle wie Erdreich oder Luft für die Wärmepumpe zur Verfügung.



$$SPF_{SHP+} = \frac{\int (\dot{Q}_{SH} + \dot{Q}_{DHW}) \cdot dt}{\int P_{el,SHP+} \cdot dt} \quad (2)$$

Diese Definition der Jahresarbeitszahl weicht grundlegend ab von anderen Publikationen über Wärmepumpensysteme. Zum Beispiel wurde in Feldstudien, welche von Miara et al. 2011 oder Erb et al. 2004 präsentiert wurden, die Wärmespeicherung meist nicht oder nur teilweise in der Jahresarbeitszahl berücksichtigt, und der elektrische Bedarf der Heizkreispumpe wurde in der Regel nicht berücksichtigt. Deshalb können die in T44A38 präsentierten Werte kaum direkt mit älteren Studien verglichen werden. Gegenüber Studien, in welchen an die Speicher gelieferte Wärme, anstatt der aus dem Speicher bezogenen Wärme, als Nutzwärme bilanziert wurde, sind Jahresarbeitszahlen nach T44A38 niedriger. Auf Grund der bisher verfügbaren Simulationsdaten beträgt die Differenz erfahrungsgemäss:

- 0.2 bis 0.5 für Wärmepumpen-Anlagen ohne Solarwärme
- 0.4 bis 1.0 für solare Kombisysteme mit Wärmepumpe

## Vergleichbare Randbedingungen für vergleichbare Resultate

Die Jahresarbeitszahl von Solar-WP-Systemen resultiert nicht nur aus der Wahl des Systemkonzepts und der Qualität der Umsetzung, sondern in einem hohen Masse auch der Randbedingungen des Klimas und der Wärmequellen (Temperaturen von Luft und Boden, Solarstrahlung im Jahresverlauf, Auslegung von Erdreich-Wärmetauscher) auf der einen Seite, sowie der Charakteristik des Wärmebedarfs (Temperaturniveau und Verteilung über das Jahr) auf der anderen Seite. Reproduzierbare Randbedingungen sind in Feldtests praktisch unmöglich. Laborbedingungen oder Simulationstools sind notwendig, um reproduzierbare Randbedingungen zu erreichen und verschiedene System-Konzepte miteinander zu vergleichen. Deshalb wurden für die Simulationen in T44A38 gemeinsame Randbedingungen definiert, z.B. für die Eigenschaften des Klimas, des Bodens, und des Erdreich-Wärmetauschers (Dott et al. 2013; Haller et al. 2013a). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über diese Randbedingungen für das Klima von Strasbourg mit drei unterschiedlichen Gebäudestandards. SFH45 ist ein Einfamilienhaus mit einem spezifischen Heizwärmebedarf von 45 kWh/(m<sup>2</sup>a). SFH15 ist ein Passivhausgebäude mit 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), und SFH100 hat einen spezifischen Heizwärmebedarf von 100 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die beheizte Fläche beträgt jeweils 140 m<sup>2</sup>. Der Warmwasserbedarf (Q<sub>DHW</sub>) beträgt 2076 kWh/a.

**Tabelle 1: Raumwärmebedarf und Warmwasserbedarf für die verschiedenen Gebäude in Strasbourg.**

$Q_{SH}$ SFH15	2474 kWh/a, 35/30 °C
$Q_{SH}$ SFH45	6476 kWh/a, 35/30 °C
$Q_{SH}$ SFH100	14031 kWh/a, 55/45 °C
$Q_{DHW}$	2076 kWh/a

Im Rahmen von T44A38 wurden die Simulationsplattformen TRNSYS, Polysun, Matlab/Simulink und IDA-ICE verwendet. Die korrekte Implementierung der Randbedingungen wurde mit einem "platform independence check" überprüft, welcher auf einem Vergleich von Monatswerten beruht. Zusätzlich wurden die Temperaturen des Heizkreis-Vorlaufs und des Heizkreis-Rücklaufs mit kumulierten Energiekurven verglichen (Haller 2013). Um ein Mindestmass an Komfort zu gewährleisten wurde mit sogenannten "penalty" Funktionen gearbeitet (vgl. Weiss 2003, pp.137 – 140; Haller 2013), welche das Nichterreichen der Komfortbedingungen durch einen zusätzlichen elektrischen Energieaufwand (penalty) ausgleichen.

## Resultate

In diesem Abschnitt wird vereinfachend SPF an Stelle von  $SPF_{SHP+,pen}$  verwendet. Das Subscript "pen" bezieht sich auf die Berücksichtigung der im Abschnitt zuvor angesprochenen "penalty" Funktion. Sofern nicht ausdrücklich etwas andere erwähnt ist, gelten die Resultate für solare Kombisysteme und das SFH45 im Klima von Strasbourg.

### Systeme mit Luft-Wärmepumpen (P und P/S)

Simulationen mit Luft-Wärmepumpen erreichten SPF 2.4 bis 3.0 ohne Solarwärme, bis zu 4.2 mit grossen Kollektorflächen von 25 m<sup>2</sup>, und bis zu 3.9 mit kleineren Kollektorflächen von 10 m<sup>2</sup>. Parallel/Serielle Konzepte mit Zwei-Quellen Wärmepumpen konnten in diesen Studien keine nennenswert höheren Jahresarbeitszahlen erzielen als die seriellen Systeme mit gleicher Kollektorfläche (maximal +0.1 von SPF).

### Systeme mit Erdsonden-Wärmepumpen (P und R)

Erdsonden-Wärmepumpen ohne Solarwärme erreichten SPF 3.5 – 3.9. Systeme mit Solarwärme erreichten 5.5 – 6.5. Systeme mit unverglasten Kollektoren und Regeneration einer Einzelsonde konnten die Arbeitszahl gegenüber einem System ohne Kollektoren und ausreichend dimensionierter Erdsonde nicht sichtbar steigern. Ein Systemkonzept welches eine Erdsonden Wärmepumpe für Raumwärme kombinierte mit einer zusätzlichen Wärmepumpe, welche Warmwasser bereit stellt und als Quelle dafür entweder unverglasten Kollektoren oder den Rücklauf der

Raumwärmeverteilung benützt (Citherlet et al. 2013) erreichte ähnliche Jahresarbeitszahlen wie ein Erdsonden-System ohne Solaranlage.

### **Ein-Quellen Wärmepumpen mit Solarwärme für den Verdampfer (S und P/S)**

Die Jahresarbeitszahlen von Systemen welche ausschliesslich Solarwärme als Quelle für den Verdampfer der Wärmepumpe nutzen waren meist vergleichbar mit denjenigen von parallelen Luftwärmepumpen mit Solaranlage, respektive von Erdsonden-Wärmepumpen ohne Solaranlage. Eines der Systeme erreichte SPF 5.3, was eher im Bereich von Erdsonden-Wärmepumpe MIT Solaranlage liegt. Dieses System war jedoch deutlich grösser dimensioniert als die anderen. Es verfügte über einen Eisspeicher von 20 m<sup>3</sup>, welcher im Garten vergraben wird, und ein Kollektorfeld aus 20 m<sup>2</sup> abgedeckten und 5 m<sup>2</sup> unverglasten selektiven Absorbern. Ein weiteres System mit Eisspeicher erreichte Jahresarbeitszahlen welche vergleichbar sind mit Erdsonden-Wärmepumpen ohne Solarwärme und verfügte über einen Eisspeicher von 10 m<sup>3</sup> Grösse und 10 m<sup>2</sup> unverglaste Polymer-Absorber.

### **Alle Konzepte**

Die höchsten Jahresarbeitszahlen von bis zu 6.5 wurden bei der Simulation von parallelen Erdsonden Wärmepumpen mit Solarwärme erreicht, gefolgt von Luft-Wärmepumpen mit Solarwärme, Erdsonden-Wärmepumpen ohne Solarwärme, oder Wärmepumpen mit ausschliesslich Solarkollektoren als Quelle. All diese Systeme schnitten in der Regel energetisch deutlich besser ab als Luft-Wärmepumpen ohne Solarwärmenutzung. Eine Analyse des elektrischen Bedarfs, welcher in den verschiedenen Simulationen ausgewiesen wurde, zeigte, dass dieser in der Regel klar dominiert wurde vom Bedarf für die Wärmepumpe. Wenn der Rest-Strombedarf eine signifikante Rolle spielte, dann war die Ursache immer die elektrische Zusatz- oder Not-Heizung, welche je nach Auslegung und Einsatzgrenzen der Wärmepumpe zum Tragen kam. Bei Systemen welche ausschliesslich Solarwärme als Quelle nutzen, hat die Dimensionierung der Solarkollektoren und des Eisspeichers in Abhängigkeit der im Winter verfügbaren Solarstrahlung einen grossen Einfluss auf den elektrischen Bedarf der Zusatzheizung, und damit auch auf die Jahresarbeitszahl.

### **Andere Heizlasten**

Ähnliche Resultate sind für Gebäude mit höherem und mit geringerem Raumwärmebedarf verfügbar (Haller 2013). In absoluten Zahlen sind die nicht von der Wärmepumpe verbrauchten elektrischen Energiemengen im SFH15<sup>1</sup> nicht grösser als im SFH100, aber in relativen Angaben sind sie verantwortlich für einen

---

<sup>1</sup> ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung welche notwendig ist um diesen Gebäudestandard zu erreichen.

weit höheren Anteil des Strombedarfs als bei höherem Heizwärmebedarf und haben deshalb einen viel grösseren Einfluss auf die Jahresarbeitszahl. Man muss sich jedoch auch der Tatsache bewusst sein, dass eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl beim SFH100 eine ganz andere Bedeutung hat als beim SFH45. Zum Beispiel können durch eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl von 3.0 auf 4.0 im SFH100 1340 kWh<sub>el</sub>/a eingespart werden, bei SFH15 jedoch nur 380 kWh<sub>el</sub>/a.

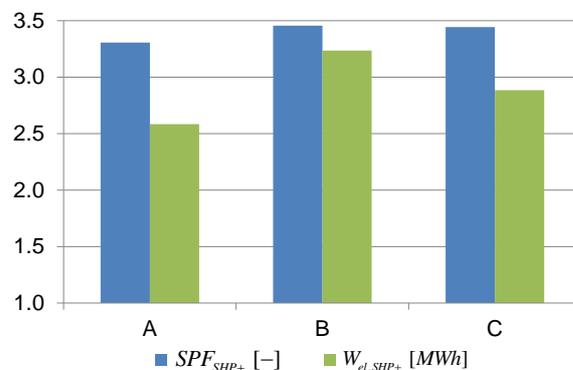
## DISKUSSION EINZELNER SYSTEM-KONZEPTE UND ASPEKTE

### Nutzen der Solarwärme als Zusatz zu Wärmepumpenanlagen

Für parallele Systeme für die Beheizung eines gut isolierten Einfamilienhauses im zentraleuropäischen Klima können die System-Jahresarbeitszahlen durch die Kombination einer Wärmepumpe mit Solarwärme um ca. 0.07 – 0.12 pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche angehoben werden. Die Solarerträge für Warmwassersysteme (500 - 600 kWh/(m<sup>2</sup>a)) und Kombisysteme (300 - 400 kWh/(m<sup>2</sup>a)) sind vergleichbar mit Solaranlagen in Kombination mit Öl- oder Gasheizungen. Die elektrischen Einsparungen bewegen sich in der Regel im Bereich von 120 - 180 kWh<sub>el</sub>/(m<sup>2</sup>a) für Warmwassersysteme mit geringem Deckungsgrad und im Bereich 60 - 120 kWh<sub>el</sub>/(m<sup>2</sup>a) für Kombisysteme.

### Einfluss des Raumwärme-Verteilsystems

Simulationen haben gezeigt, dass der Verzicht auf Thermostatventile in WP-Solar Systemen zu höheren Jahresarbeitszahlen führen kann. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese Systeme auch weniger Strom verbrauchen. Der Grund dafür ist, dass das Gebäude insbesondere an Tagen mit passiven Solargewinnen mehr als nötig zusätzlich über die Heizkreisverteilung beheizt wird. Weil dabei die Wärmelieferung mehr zunimmt als der elektrische Bedarf, steigt gleichzeitig mit dem elektrischen Bedarf auch die Jahresarbeitszahl (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Jahresarbeitszahl (SPF) und elektrischer Bedarf eines Wärmepumpen-Solar-Systems A: Mit Thermostatventilen (TV) im Heizkreis, B: Ohne TV; C: Ohne TV, jedoch Heizkurve bis an die Komfortgrenze abgesenkt.**

## **Hydraulische Integration und Regelung mit Kombispeicher**

Kombispeicher sind Speicher, in welchen Wärme sowohl für Warmwasser als auch für Raumheizung in einer Einheit gespeichert wird. Im weiteren Sinne fallen darunter auch Pufferspeicher mit Frischwassermodulen und Speicher mit Spiralrohr-Wärmetauscher für die Brauchwassererwärmung. Um die energetischen Vorteile von Niedertemperaturheizungen ausnützen zu können, ist eine gute Speicherschichtung insbesondere in Kombination mit Wärmepumpen essentiell. Basierend auf Jahressimulationen (Haller et al. 2013b; Haller et al. 2014) und zusätzlichen CFD Simulationen von Speichereintritten (Mojic et al. 2014), können die folgenden Empfehlungen für die Kombination von Wärmepumpen mit Kombispeichern gemacht werden:

1. Die Position des Warmwasser-Sensors, welcher die Beladung der Warmwasserzone durch die Wärmepumpe auslöst, muss einen Mindest-Abstand gegenüber der Raumwärmezone einhalten:
  - a. diese Distanz ist System-spezifisch und hängt von der Schichtungseffizienz des Speichers ab.
  - b. Als erster Schätzwert sind 30 cm zu empfehlen für einen Speicher mit ca. 80 cm Durchmesser.
2. Der Rücklauf vom Speicher zur Wärmepumpe muss bei der Beladung der Warmwasser-Zone oberhalb der Raumwärme-Zone angebracht sein.
3. Die Beladung der Warmwasser-Zone soll nicht mehr als zwei mal 2 h am Tag freigegeben werden. Sowohl aus energetischer Sicht als auch was den Komfort betrifft ist eine Freigabe während 2 h zwischen 14:00 Uhr und 20:00 Uhr zu empfehlen.

Die Schichtungseffizienz jedes einzelnen Speicheranschlusses muss mit den relevanten Massenströmen geprüft worden sein, und es sollte darauf basierend eine klare Empfehlung vorliegen, bis zu welchem Belade-Massenstrom die einzelnen Anschlüsse betrieben werden können ohne dass die Speicherschichtung beeinträchtigt wird. Zudem kann es von Vorteil sein, wenn der Speicher im Raumheizungsmodus wenn möglich nicht von der Wärmepumpe beladen wird.

## **Serielle Konzepte mit Zwei-Quellen Wärmepumpen**

Serielle Konzepte mit Zwei-Quellen Wärmepumpen zeigten in der Regel kaum eine bessere energetische Leistung als parallele Solar – Wärmepumpen Kombinationen mit gleicher Kollektorfläche. Gemäss Haller & Frank (2011) kann der COP des Gesamtsystems, bei Verwendung von Solarwärme für den Verdampfer der Wärmepumpe, nur dann höher sein als eine direkte Nutzung von Solarwärme und

eine Deckung des Rest-Bedarfs über die andere Quelle der Wärmepumpe (paralleler Betriebsmodus), wenn die folgende Bedingung erfüllt wird:

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

Mit:

- $COP_{hp,dir}$  COP der Wärmepumpe bei Verwendung der anderen Wärmequelle (zum Beispiel Luft oder Erdreich)
- $\Delta COP_{hp}$  Erhöhung des COP welche aus der Nutzung von Solarwärme anstatt der anderen Wärmequelle resultiert.
- $\eta_{coll,dir}$  Effizienz des Kollektors bei direkter Wärmelieferung auf dem Temperaturniveau des Nutzwärmebedarfs
- $\Delta \eta_{coll}$  Steigerung der Kollektor-Effizienz (absolut) welche aus der Nutzung des Kollektors auf dem Temperaturniveau des Verdampfers der Wärmepumpe resultiert.

Die in Gleichung (3) präsentierte Bedingung ist nicht einfach zu erfüllen. Zum Beispiel müsste durch die serielle Wärmenutzung gegenüber dem parallelen Betriebsmodus der COP der Wärmepumpe von 3.0 auf 4.0 steigen, und die Kollektoreffizienz müsste gleichzeitig um Faktor 3 steigen, damit die serielle Nutzung genau gleich gut abschneidet wie die parallele Nutzung. Um einen Vorteil durch serielle Nutzung zu erzielen, müssten diese Steigerungen sogar noch übertroffen werden. Eine Steigerung des Kollektorwirkungsgrades um Faktor 3 ist jedoch nur möglich, wenn der Wirkungsgrad bei direkter Wärmenutzung bereits sehr gering war, was typischerweise nur dann der Fall ist, wenn die spezifische Einstrahlung auf das Kollektorfeld gering ist und entsprechend wenig Solarwärme zur Verfügung steht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für eine Steigerung der Arbeitszahl der Wärmepumpe von 3.0 auf 4.0 eine substantielle Steigerung der Quellentemperatur notwendig ist, und deshalb die Kollektortemperatur um diesen Betrag höher sein muss als die Temperatur der anderen Wärmequelle. Wird ohne Speicher auf der kalten Seite gearbeitet, so muss die Wärmelieferung des Kollektorfeldes den Bedarf des Verdampfers der Wärmepumpe abdecken können, was bei nicht modulierenden Wärmepumpen einer entsprechend grossen thermischen Leistung entspricht.

### **Solarwärme als einzige Wärmequelle in seriellen oder parallel/seriellen Systemen**

Konzepte, in welchen ausschliesslich Wärme von den Solarkollektoren als Quelle für den Verdampfer der Wärmepumpe zur Verfügung steht (Ein-Quellen Wärmepumpe), werden üblicherweise mit unverglasten Absorbern ausgeführt (zum Beispiel Thissen 2011) oder mit speziell entwickelten verglasten Kollektoren, welche zugleich als Luft-Wärmetauscher eingesetzt werden können (Leibfried & Stork 2010). Ein Speicher auf der kalten Seite der Wärmepumpe (Eisspeicher oder Glykolspeicher) kann verwendet werden, um Perioden mit Schnee oder mit sehr tiefen

Umgebungstemperaturen und wenig Sonnenschein zu überbrücken, bevor eine elektrische Zusatzheizung einspringen muss, wenn die Quelltemperatur zu weit absinkt. Diese Systeme haben den Vorteil, dass keine Erdsondenbohrung und kein zusätzlicher Luft-Wärmetauscher benötigt wird. Vereinzelt sind Resultate aus Simulationen oder Feldmessungen zu diesen Systemen zu finden. Generelle Empfehlungen für die Dimensionierung solcher Systeme sind jedoch noch nicht verfügbar. Insbesondere das Verhalten bei Schnee oder wachsenden Eisschichten auf den Absorbern wird in Simulationsstudien dieser Systeme oft nicht oder nur sehr vereinfacht abgebildet. Entsprechend sind Simulationsresultate dieser Systeme mit Vorsicht zu genießen.

### **Regeneration**

Die Regeneration einer ausreichend dimensionierten Einzelsonde hatte in keiner der Simulationsstudien eine signifikante Erhöhung der Jahresarbeitszahl zur Folge. Verschiedene Studien haben jedoch gezeigt, dass die Jahresarbeitszahl eines Systems mit unterdimensionierten Erdsonden durch Regeneration auf jenes einer ausreichend dimensionierten Erdsonde angehoben werden kann (Kjellsson et al. 2010; Bertram et al. 2013; Ochs et al. 2014). Dies könnte vor allem interessant sein für eine Nachrüstung bei existierenden Erdsonden, und eventuell auch für das Downsizing von existierenden Erdsonden-Projekten. Die Regeneration einer grösseren Anzahl von Erdsonden welche sich gegenseitig beeinflussen (Erdsonden-Felder) ist ein anderes Thema, welches jedoch in den Simulationen des T44A38 nicht untersucht wurde. Durch Kombination von PV/T Kollektoren mit Erdsonden-Regeneration konnte der PV-Ertrag in der Simulation um 4 % gesteigert werden. Für wärmere Bedingungen – wie sie zum Beispiel bei dachintegrierter Photovoltaik und wenig Wind – konnte der PV-Ertrag bis zu 10 % gesteigert werden (Bertram et al. 2012).

### **Schlussfolgerungen**

Die vorliegenden Resultate zeigen, dass Systeme, die auch die serielle Nutzung der Solarwärme zulassen, im Vergleich zu den rein parallelen Systemen nur geringfügig höhere Jahresarbeitszahlen (und somit Einsparungen elektrischer Energie) erzielen. Eine weitere Verbesserung der Effizienz konnte in den Simulationen von T44A38 nur erreicht werden, wenn gleichzeitig die Kollektorflächen und/oder Wärmespeicher vergrössert wurden. Die Resultate deuten jedoch darauf hin, dass Systeme, welche Kollektoren als einzige Wärmequelle verwenden, bei richtiger Dimensionierung und geeigneten Randbedingungen für Klima und Last im Vergleich zu den rein parallelen Systemen energetisch durchaus konkurrenzfähig sein können. Diese Systeme haben zugleich den Vorteil, dass keine Erdsondenbohrung und kein zusätzlicher Luft-Wärmetauscher benötigt werden. Für alle Systemvarianten zeigt sich jedoch,

dass die exergetische Effizienz von Wärmespeicher und hydraulischer Verschaltung entscheidend für die System-Effizienz ist. Insbesondere die Kombination von Kombispeichern mit Wärmepumpen muss dabei strengen Kriterien genügen.

Eine Steigerung der System-Jahresarbeitszahlen gegenüber reinen Wärmepumpensystemen um 0.5 – 0.7 für Warmwasser-Systeme und um 1 – 1.5 für Kombisysteme ist mit den für solche Anlagen üblichen Kollektorflächen durchaus möglich. Obwohl dies zeigt, dass die Anlagen-Effizienz durch die Einbindung von Solarwärme erheblich gesteigert werden kann und sollte, darf nicht vernachlässigt werden, dass die damit einhergehenden zusätzlichen Investitionskosten in der Regel durch die elektrischen Einsparungen bei den heutigen Preisen für Elektrizität in den meisten Ländern kaum amortisiert werden können. Für die Erschliessung eines Massenmarktes, in welchem einzig die Rentabilität zählt, braucht es deshalb mittelfristig weitere Subventionen für die Solarwärme oder entsprechend hohe Abgaben auf nicht erneuerbare Energieträger.

Die flächenspezifischen elektrischen Einsparungen für solarthermische Warmwassersysteme sind leicht höher, für Kombisysteme leicht geringer, als der zu erwartende Ertrag einer Photovoltaik-Anlage am gleichen Standort. Der Vergleich mit Photovoltaik ist jedoch problematisch, da man Äpfel mit Birnen vergleicht. Wer die eigene Ökobilanz verbessern will, muss die selber produzierte erneuerbare Energie auch selber verbrauchen. Wer seinen Photovoltaikstrom über kostendeckende Einspeisevergütung oder eine andere Vergütung verkauft, der verkauft auch die Ökobilanz dieses Stroms, wenn nicht explizit etwas anderes vereinbart ist. Für die eigene Ökobilanz zählen nur der direkt selber verbrauchte Anteil der PV, sowie der zusätzlich eingekaufte Strom-Mix. Zudem beinhaltet die Solarwärme die lokale Speicherung und verwirft Sommerüberschüsse. Beides ist bei der Photovoltaik heute in der Regel nicht oder nur geringfügig der Fall. Diese Vorteile der Photovoltaik können sich jedoch in Zukunft verringern, wenn die Netzeinspeisung ab einer gewissen Leistung gekappt wird, oder für die Einspeisung bei grossem Überschuss kaum noch eine Vergütung bezahlt wird. Es ist zu erwarten, dass damit auch Photovoltaik-Wärmepumpen Kombinationen vermehrt mit lokaler Speicherung arbeiten werden, und das Kosten-Optimum hin zu kleineren PV-Anlagen verschoben werden wird. Dennoch sind die Autoren der Meinung, dass die Solarwärmebranche weiter unter Kostensenkungsdruck stehen wird, wenn sie in Kombination mit Wärmepumpen den heutigen Marktanteil halten oder sogar ausbauen will.

## **Danksagung**

Die Arbeit des Hauptautors wurde unterstützt durch das Schweizerische Bundesamt für Energie (BFE) im Rahmen des Projektes SOL-HEAP und in Verbindung mit dem IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 "Solar and Heat Pump Systems". Allen Autoren

von Beiträgen zum Subtask C des IEA SHC Task 44 / I HPP Annex 38 sei an dieser Stelle gedankt. Beiträge mit vergleichbaren Simulations-Randbedingungen wurden zur Verfügung gestellt von Erik Bertram, Mircea Bunea, Daniel Carbonell, Werner Lerch, Fabian Ochs, und Christian Winteler.

## Literatur

- Bertram, E., Glembin, J. & Rockendorf, G., 2012. *Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger*. *Energy Procedia*, 30, p.414–423.
- Bertram, E., Pärtsch, P. & Tepe, R., 2013. *Solare Wärmepumpensysteme mit Erdwärmesonde - Konzeptvergleiche*. In: 12. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, OTTI e. V., Regensburg, Neumarkt in der Oberpfalz, Deutschland.
- Citherlet, S., Bony, J., Bunea, M., Eicher, S., Hildbrand, C. & Kleijer, A., 2013. *Projet AquaPacSol - Couplage d'une pompe à chaleur avec capteurs solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire*. Office fédéral de l'énergie OFEN.
- Dott, R., Haller, M., Ruschenburg, J., Ochs, F. & Bony, J., 2013. *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Report C1 Part B: Buildings and Space Heat Load - Final Revised*. FHNW, Muttenz, Switzerland.
- Erb, M., Hubacher, P. & Ehrbar, M., 2004. *Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen - FAWA 1996-2003*.
- 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.
- Freeman, T.L., Mitchell, J.W. & Audit, T.E., 1979. *Performance of combined solar-heat pump systems*. *Solar Energy*, 22(2), p.125–135.
- Haller, M.Y., 2013. *System Simulation Reports for the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - A technical report of subtask C - Report C3 – Final Draft*.
- Haller, M.Y., Dott, R., Ruschenburg, J., Ochs, F. & Bony, J., 2013a. *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Report C1 Part A: General Boundary Conditions - Final Revised*. Report C1 Part A, Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil, Switzerland.
- Haller, M.Y. & Frank, E., 2011. *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.
- Haller, M.Y., Haberl, R., Carbonell, D., Philippen, D. & Frank, E., 2014. *SOL-HEAP - Solarthermie-Wärmepumpen-Kombisysteme*. im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Haller, M.Y., Haberl, R., Mojic, I. & Frank, E., 2013b. *Solare Kombispeicher mit Wärmepumpen: Scheinbare Details entscheiden über die Performance!* In: 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, OTTI e. V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.

- Kjellsson, E., Hellström, G. & Perers, B., 2010. *Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings*. Energy, 35(6), p.2667–2673.
- Leibfried, U. & Stork, H., 2010. *Wirtschaftlichkeit der Solarheizung SOLAERA im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen*. In: 20. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany.
- Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T. & Wapler, J., 2011. *Wärmepumpen Effizienz - Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb*. Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany.
- Mojic, I., Huggenberger, A., Kaufmann, M. & Haller, M.Y., 2014. *Analyse und Optimierung der Wärmeschichtung in Kombiwärmespeichern - akzeptiert als Beitrag*. In: 3. OTTI Anwenderforum Thermische Energiespeicher, Neumarkt.
- Ochs, F., Dermentzis, G., Siegele, D., Feist, W., Loose, A. & Drück, H., 2014. *Thermodynamic analysis of ground coupled heat pumps with solar thermal regeneration - monitoring and simulation results, May 12-16, 2014*. In: 11th International Energy Agency Heat Pump Conference - accepted, Montreal, Canada.
- Thissen, B., 2011. *Kopplung von unverglasten selektiven Solarkollektoren mit einer Wärmepumpe und einem Latentwärmespeicher*. In: 21. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 11. - 13. Mai 2011, Bad Staffelstein, Germany.
- Trinkl, C., Zörner, W. & Hanby, V., 2004. *A Review on Solar-Assisted Heat Pump Systems for Domestic Heating*. In: Proc. of the EuroSun 2004 Conference, Freiburg, 1, 734 – 743.
- Weiss, W., 2003. *Solar heating systems for houses: a design handbook for solar combisystems*. Earthscan/James & James.