

Solare Kombispeicher mit Wärmepumpen: Scheinbare Details entscheiden über die Performance!

M.Y. Haller, R. Haberl, I. Mojic, E. Frank

Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR

Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil

Tel.: +41 55 222 48 36, Fax: +41 55 222 48 44

E-Mail: michel.haller@solarenergy.ch

Internet: www.solarenergy.ch

Einleitung

Die Kombination von Solarwärme mit Wärmepumpen erfreut sich wachsender Beliebtheit. Insbesondere in Kombination mit solaren Kombispeichern liegen jedoch sowohl aus Feldstudien als auch aus Labor-Messungen einige Resultate vor, in denen die Systemleistung deutlich unter den Erwartungen liegt (Thür et al. 2012, Ruschenburg et al. 2012). Oft wurde festgestellt, dass das Temperaturniveau der Wärmepumpe auf der Senken-Seite deutlich höher ist als das Temperaturniveau des Wärmebedarfs (Thür et al. 2012, Haller & Frank 2012). Die starke Abhängigkeit der Leistungszahl der Wärmepumpe (COP) von der Temperaturspreizung zwischen Quelle und Senke führt in diesen Fällen dazu, dass der Strombedarf erheblich steigt. Dies unterscheidet die Kombination von solaren Kombispeichern mit Wärmepumpen grundsätzlich von der Kombination mit Verbrennungsanlagen, da bei letzteren die Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Temperaturniveau der Nutzwärme weit geringer ist.

Der Beitrag von Haberl et al. (2013) in diesem Tagungsband zeigt die angesprochene Problematik anhand von Labormessungen, welche an einem System durchgeführt wurde, welches auf dem Markt erhältlich ist. In diesem Beitrag wird ergänzend mit Simulationsstudien der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die hydraulischen Einbindung und Regelung der Wärmepumpe in Systeme mit solaren Kombispeichern auf die System-Jahresarbeitszahlen und damit auf den elektrischen Energiebedarf der Anlage hat.

Methoden

Ein solares Kombisystem mit Luft-Wärmepumpe (WP) für Raumheizung (RH) und Brauchwarmwasser (Warmwasser, WW) in einem Einfamilienhaus wurde wie in Abbildung 1 gezeigt in TRNSYS modelliert und mit einem Simulations-Zeitschritt von zwei Minuten simuliert.

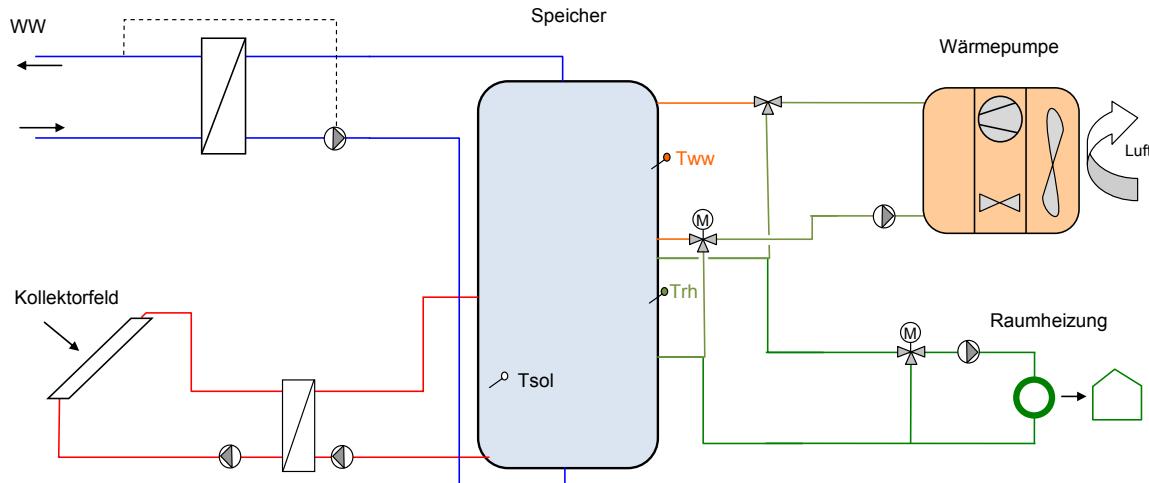


Abbildung 1: Vereinfachte System-Hydraulik des Solar-WP-Systems in der Referenz-Variante.

Als Randbedingungen für Klima, Raumwärme und Warmwasserbedarf wurde von den im IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 (T44A38) definierten Randbedingungen ausgegangen (Haller et al. 2012, Dott et al. 2012). Tabelle 1 zeigt die Charakteristik der Randbedingungen von Klima und Heizlast für den verwendeten Standort Strasbourg (FR).

Tabelle 1: Randbedingungen für die Simulationsstudien nach T44/A38 für das Klima Strasbourg.

| Parameter | Einheit | SFH15 (35/30) | SFH45 (35/30) | SFH100 (55/45) | SFH100 (35/30) |
|--|---------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Raumheizwärmebedarf | kWh/a | 2 500 | 6 500 | 14 000 | 14 000 |
| Warmwasserbedarf | kWh/a | 2 100 | 2 100 | 2 100 | 2 100 |
| Heizlast bei Auslegung ^{a)} | kW | 1.8 | 4.1 | 7.4 | 7.4 |
| Vorlauf-/Rücklauf-Temperatur der Raumheizung bei Auslegung ^{a)} | °C | 35/30 | 35/30 | 55/45 | 35/30 |
| Wärmeleistung der WP bei A2W35 | kW | 4.7 | 9.3 | 11.2 | 11.2 |
| Volumenstrom WP im Raumheizungsbetrieb | kW | 940 | 1 880 | 2 260 | 2 260 |

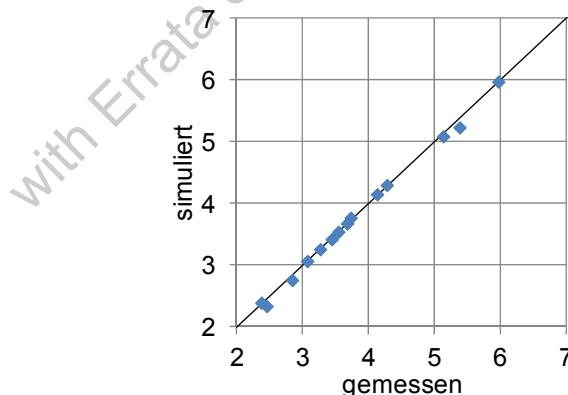
a) Auslegungstemperatur -10 °C

Für die Simulation des Kollektorfeldes (15 m^2 Apertur) wurde der in Perers & Bales (2002) beschriebene und in Haller et al. (2010) auf ein Mehrknoten-Modell erweiterte Type 832 verwendet, der mit EN12975-2 kompatibel ist. Die Kollektor-Kennwerte entsprechen dem Referenz-Flachkollektor des IEA-SHC Task 32 ($\eta_{0,0} = 0.8$, $a_1 = 3.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $a_2 = 0.015 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$). Der Speicher wurde mit einem eigens neu entwickelten Plug Flow Modell gerechnet. Im Unterschied zu Standard Plug Flow Modellen wie zum Beispiel TRNSYS Type 38 akzeptiert dieses Modell die Definition von bis zu 10 Ein- und Austritten für die Be- und Entladung, deren Höhe frei wählbar ist und deren Input jeweils schichtend oder nicht schichtend gerechnet werden kann (Haller 2012). Die Randbedingungen des Speichers sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Parametrierung des Plug-Flow Speicher-Modells.

| Parameter | Einheit | Wert |
|--|------------------------|-------------|
| Volumen | m^3 | 0.9 |
| Höhe | m | 1.75 |
| Effektive vertikale Wärmediffusion | $\text{W}/(\text{mK})$ | 1.8 |
| Wärmeverlustkoeffizient Deckel, Seiten, Boden | W/K | 1/3/1 |
| Relative Höhe Eintritt / Austritt Solar-Sekundärkreis | - | 0.35 / 0.01 |
| Relative Höhe Eintritt / Austritt WW-Primärkreis | - | 0.1 / 0.98 |
| Relative Höhe Eintritt / Austritt Raumheizung | - | 0.3 / 0.5 |
| Höhe Anschluss Wärmepumpe | Abbildung 3 - 5 | |
| Minimale / maximale relative Höhe einzelner Knoten (Plugs) | - | 0.005 / 0.1 |

Die Wärmepumpe wurde mit einem Kennlinien-Modell gerechnet, welches weitgehend dem Modell von Wetter und Afjei (1996) folgt, und einen Bi-Quadratischen Fit von Kondensator-Leistung und COP in Abhängigkeit der Quellen-Eintrittstemperatur und der Senken-Austrittstemperatur verwendet. Start-Verluste sind mit Start- und Stopp-Zeitkonstanten implementiert. Enteisungsverluste wurden bei Lufttemperaturen unter 5 °C als Wärmeverluste (reduzierte Wärmeleistung) mit einem rudimentären Ansatz berechnet. Die Modell-Parameter wurden auf Labor-Messungen einer im Handel erhältlichen Wärmepumpe von 16 kW Wärmeleistung (A2W23) abgestimmt. Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten COP Werten im Temperaturbereich Verdampfer-Eintritt -8 °C bis +30 °C und Kondensator-Austritt 33 °C bis 51 °C.

**Abbildung 2:** Gemessene und simulierte COP-Werte der Wärmepumpe.

Die thermische Leistung des Wärmepumpenmodells wurde nach dem Abgleich mit Messdaten auf die verschiedenen Heizlasten skaliert (Tabelle 1) und der elektrische Bedarf vereinfachend mit dem gleichen Faktor angepasst. Da Wärmepumpen geringerer Baugrösse in der Regel weniger effizient sind als grössere, resultiert bei einer Skalierung der Heizleistung nach unten tendenziell eine leichte Überschätzung der COP-Werte.

Die Boilerladung (Beladung der Warmwasser-Vorratszone des Speichers) durch die Wärmepumpe wurde über Sensor Tww im Speicher (siehe Abbildung 1) gesteuert (WP EIN bei Tww < 47 °C, AUS bei Tww > 52 °C). Der Raumheizbetrieb wurde gesteuert über Sensor Trh (WP EIN bei Trh < Tvl,soll, AUS bei Trh > Tvl,soll + 10 K).

Varianten

Ausgehend von einer Basis-Variante für die hydraulische Verschaltung (Ref in Abbildung 3) wurden verschiedene Varianten simuliert, die in Abbildung 3 bis Abbildung 5 graphisch dargestellt sind und im Folgenden kurz beschrieben werden. Jede Variante wurde einmal mit WW-Vorrang und einmal ohne WW-Vorrang simuliert. **Bei WW-Vorrang wurde die Heizkreispumpe bei Boilerladung ausgeschaltet.**

Ref (A) – Doppelte Umschaltung

Die Referenz-Variante verfügt über je ein Dreiweg-Ventil im Rücklauf und im Vorlauf der WP, mit welchen vom Heizungsbetrieb (RH) auf den Boilerladebetrieb (WW) umgeschaltet werden kann. Der Rücklauf der WP im WW-Betrieb wurde 9 cm höher am Speicher angesetzt als der Vorlauf zur Beladung und Entladung im RH-Betrieb. WW-Zone und RH-Zone des Speichers überlappen sich nicht. Der WW-Temperaturfühler (Tww) hat einen komfortablen Abstand von >50 cm gegenüber dem Vorlaufstutzen der RH.

B,C – Nur ein Vorlauf von WP zu Speicher

Das Dreiweg-Ventil im Vorlauf der WP wurde eingespart. Nur der Rücklauf wird umgeschaltet. Da keine Anschlusshöhen geändert wurden gegenüber der Referenz, kommt der Vorlauf im WW-Betrieb unterhalb des Rücklaufs zu liegen. Das Simulationsmodell rechnet in Variante B mit Mischung zweier Knoten bei Temperatur-Inversion, in Variante C mit Schichtung. Es berücksichtigt jedoch nicht die Möglichkeit von Kurzschlüssen zwischen Vorlauf und Rücklauf.

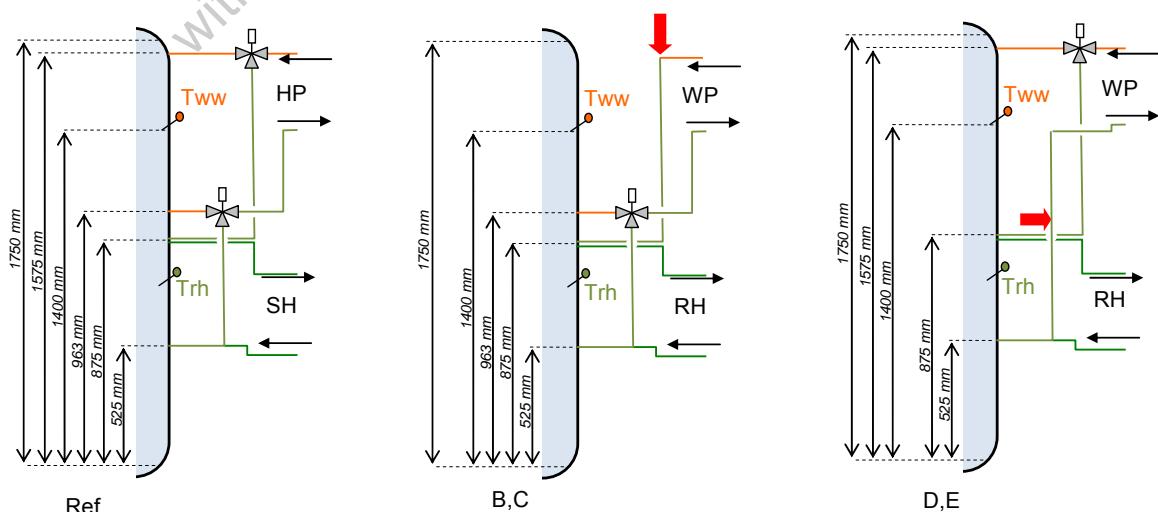


Abbildung 3: Hydraulische Varianten der Wärmepumpen-Anbindung; Ref: Referenz, B+C: ohne Vorlauf-Umschaltung, D+E: ohne Rücklauf-Umschaltung.

D,E – Nur ein Rücklauf von Speicher zu WP

Das Dreiweg-Ventil im Rücklauf der WP wurde eingespart. Die Wärmepumpe bedient sich auch im WW-Betrieb aus der gleichen Speicherhöhe wie im RH-Betrieb. Dadurch entsteht eine Überlappung von WW-Beladezone und der RH-Zone von 35 cm (180 Liter). In der Variante E wurde der Volumenstrom im WW-Modus auf einen Drittel des Volumenstroms im RH-Modus verringert, um durch eine grössere Temperaturspreizung über die Wärmepumpe ein schnelleres Erreichen der WW-Solltemperatur zu erreichen und damit einen vollständigen Umsatz der WW-Zone zu vermeiden.

F,G – Nur ein Rücklauf & WW Sensor tief

Varianten F & G sind ähnlich wie D & E, jedoch ist hier die Position des WW-Sensors tiefer als bei D & E, so dass der Abstand zum RH-Vorlauf nur noch 9 cm beträgt. Bei G wurde die WW-Ladung wiederum mit einem Drittel des Volumenstroms des RH-Betriebs gefahren.

H,I – Nur ein Rücklauf & WW Sensor noch tiefer

Varianten H & I sind ähnlich wie F & G, jedoch ist hier die Position des WW-Sensors noch tiefer als bei F & G, so dass der Abstand zum RH-Vorlauf nur noch 2.5 cm beträgt. Bei I wurde die WW-Ladung wiederum mit einem Drittel des RH-Betriebs gefahren.

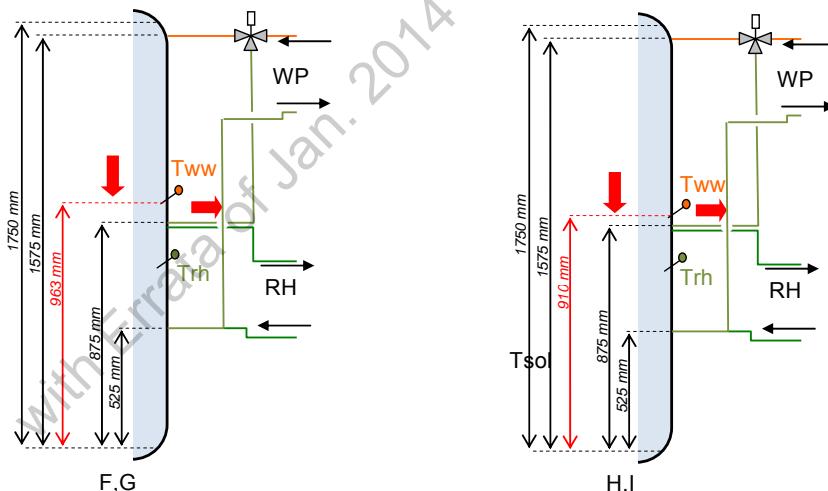


Abbildung 4: Hydraulische Varianten der Wärmepumpen-Anbindung; F,G: Nur ein Rücklauf & WW-Sensor tiefer, H,I: WW-Sensor noch tiefer.

J,K,I – Doppelte Umschaltung mit drei Anschlüssen

Hier ist die doppelte Umschaltung wie in der Referenz mit zwei Dreiweg-Ventilen realisiert, jedoch ist der WP-Rücklauf bei WW-Ladung auf gleicher Höhe am Speicher wie der Vorlauf bei RH-Betrieb. Damit können die beiden Leitungen kombiniert und als einen Speicheranschluss realisiert werden. Somit hat dieses System nur drei Speicheranschlüsse anstatt vier. Bei K wurde der WW-Sensor tiefer positioniert (9 cm Abstand), bei I noch tiefer (2.5 cm Abstand).

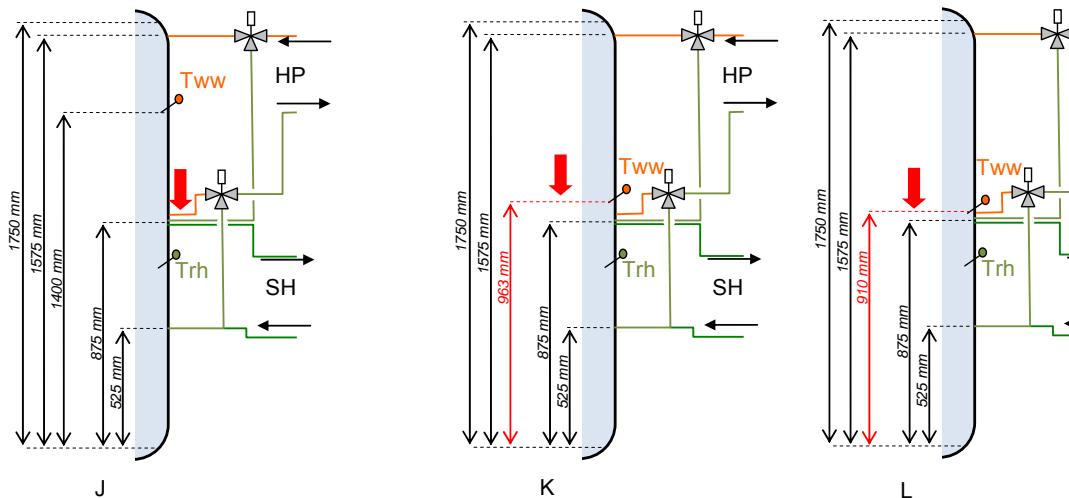


Abbildung 5: Hydraulische Varianten der Wärmepumpen-Anbindung; J: Doppelte Umschaltung, jedoch Rücklauf zur WP im WW-Betrieb auf gleicher Höhe wie Vorlauf der Raumheizung; K: wie J, jedoch WW-Sensor tiefer; L: wie K, jedoch WW-Sensor noch tiefer.

Resultate und Diskussion

Der Einfluss der hydraulischen Verschaltung und Regelung wurde ausgewertet indem der elektrische Bedarf für den Betrieb der Anlage (Kompressor und Ventilator der WP, Pumpen, Regler, etc.) jeweils über ein Jahr simuliert wurde. Den geringsten elektrischen Bedarf erzielte dabei das Referenzsystem (Ref) mit WW-Vorrang (vgl. Varianten – Ref (A) Doppelte Umschaltung sowie Abbildung 3).

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen den zusätzlichen elektrischen Bedarf der verschiedenen Varianten gegenüber der Referenz in % (linke Achse) respektive in absoluten Werten (rechte Achse) für die verschiedenen Gebäudearten (SFH15, SFH45, SFH100), jeweils mit WW-Vorrang und ohne WW-Vorrang.

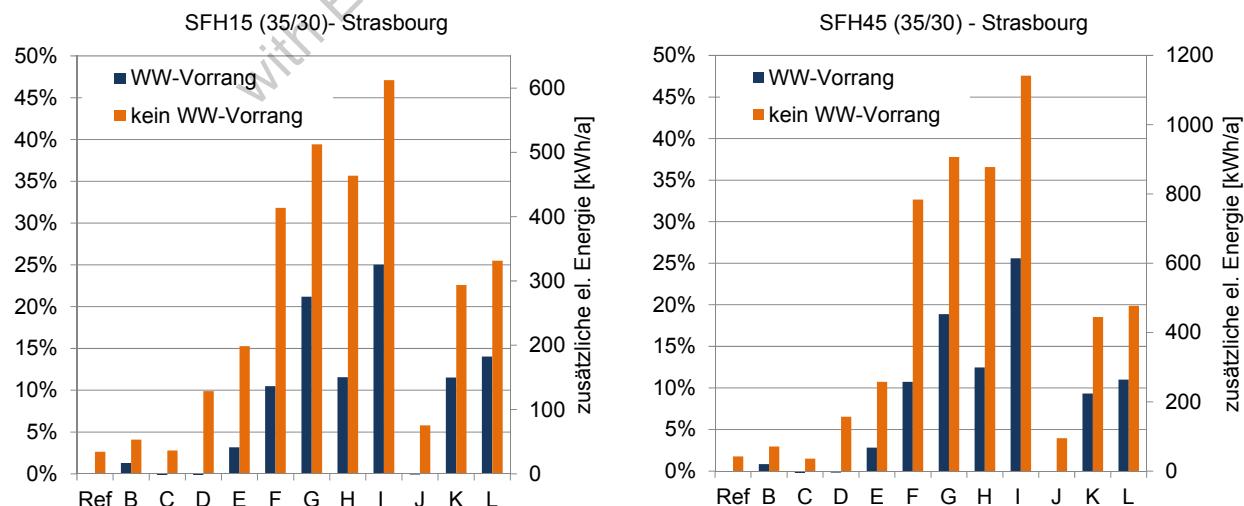


Abbildung 6: Zusätzlicher el. Energiebedarf gegenüber der Referenz für SFH15 und SFH45, jeweils mit Heizsystem 35/30 °C.

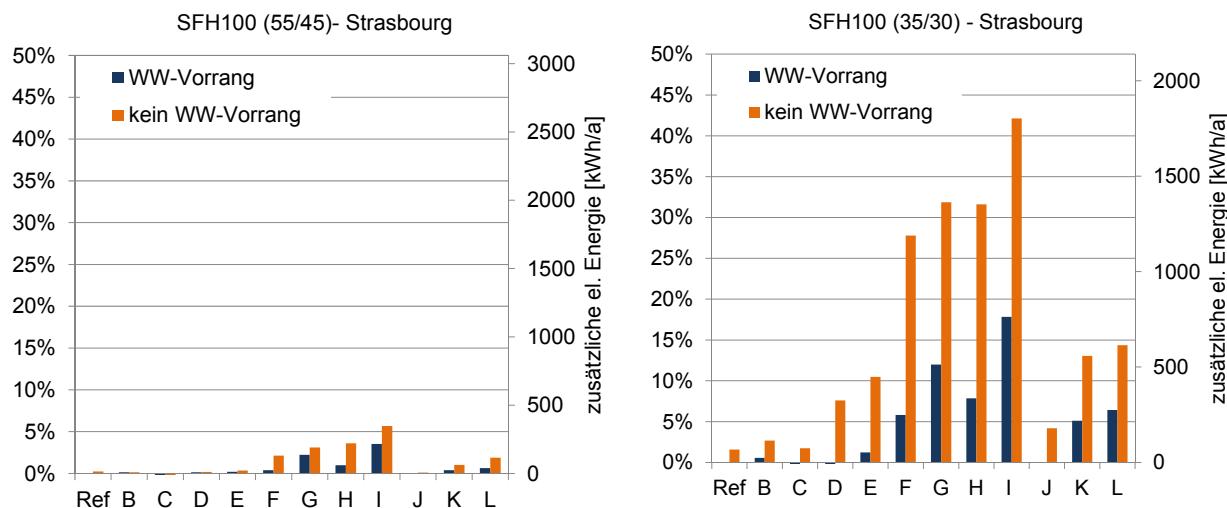


Abbildung 7: Zusätzlicher el. Energiebedarf gegenüber der Referenz für SFH100 mit Heizsystem 55/45 °C und 35/30 °C.

Der **zusätzliche elektrische Energiebedarf gegenüber der Referenz** wird in der Folge als **Mehrkosten** bezeichnet. Je nach gewählter Variante für die Hydraulik und Regelung betragen die Mehrkosten an elektrischer Energie gegenüber dem Referenzsystem bis zu 48 % (SFH45), respektive 1800 kWh_{el}/a (SFH100 35/30). In Prozenten ausgedrückt sind die Mehrkosten schlechter Varianten beim SFH100 mit hohen Vorlauftemperaturen für die Raumheizung (55/45) relativ gering – es spielt hier kaum eine Rolle, ob die Wärmepumpe im WW-Modus arbeitet oder im RH-Modus, denn in beiden Fällen arbeitet die Wärmepumpe mit ähnlichen Kondensationstemperaturen. Absolut gesehen sind jedoch auch hier die Mehrkosten mit bis zu 350 kWh_{el}/a nicht zu unterschätzen. In allen Simulationen inklusive Referenz führt eine WW-Vorrangschaltung zu besseren Ergebnissen. Beeindruckend ist, dass die Mehrkosten bei den „harmloseren“ Varianten B, C, D und J bei WW-Vorrangschaltung praktisch ganz verschwinden, während sie massiv reduziert werden für die übrigen Varianten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass ohne Warmwasser-Vorrang während der Boilerladung dem Speicher gleichzeitig Energie entzogen wird für den Heizkreis. Dadurch wird der Rücklauf der Wärmepumpe ausgekühlt und der Vorlauf erreicht länger die Soll-Temperatur für Warmwasser nicht. Die Boilerladung dauert entsprechend länger und es wird mehr Energie auf hohem Temperaturniveau bereitgestellt. Dass die Mehrkosten, respektive tiefe Jahresarbeitszahlen, mit der von der Wärmepumpe im Boilerlade-Modus bereitgestellten Energie korrelieren, zeigt eindrücklich Abbildung 8. Diese Abbildung zeigt die erzielten Jahresarbeitszahlen verschiedener Varianten in Abhängigkeit der Boilerlade-Wärmemenge. Dabei ist die von der WP im Boilerlademodus gelieferte Wärmemenge ($Q_{wp,ww}$) relativ zum Warmwasserbedarf dargestellt welcher vom Speicher bezogen worden ist ($Q_{ww} = 2100 \text{ kWh/a}$ für alle Anlagen).

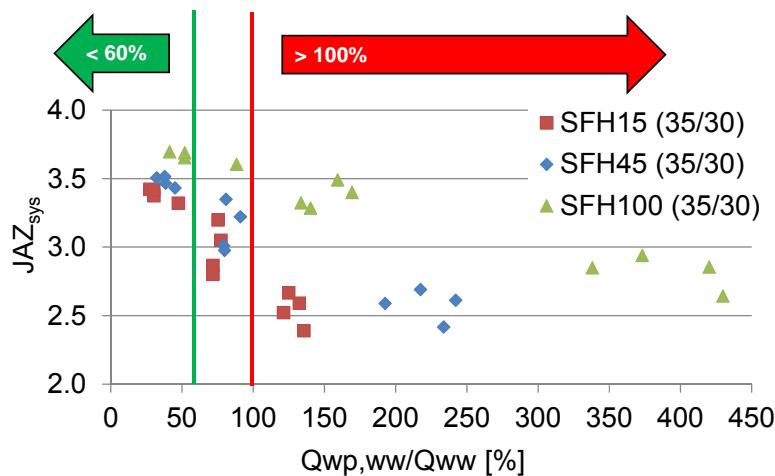


Abbildung 8: System-Jahresarbeitszahlen von SFH15, SFH45 & SFH100 (35/30) der verschiedenen Varianten A-L in Abhängigkeit der Wärmemenge, welche von der Wärmepumpe im Boilerlade-Modus erzeugt wird ($Q_{wp,ww}$, WW-Bedarf Q_{ww} konstant = 2500 kWh/a).

Für ein System mit guter Integration und Regelung der Wärmepumpe beträgt dieses Verhältnis 30% – 40%. Dieser tiefe Prozentsatz ist das Resultat von solarer Abdeckung über einen grossen Teil des Jahres einerseits, sowie der Vorwärmung im unteren Bereich des Speichers welche dazu führt, dass im WW-Bereich das Wasser anstatt von 10 °C nur noch von ca. 35 °C auf 55 °C aufgeheizt werden muss. Bei schlechter hydraulischer Einbindung, insbesondere bei Beeinflussung des WW-Sensors durch den Raumheizbetrieb, kann $Q_{wp,ww}$ um bis zu Faktor 10 steigen, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Jahresarbeitszahl.

Verzicht auf Umschaltventile

Der Verzicht auf ein 3-Weg-Ventil im Vorlauf der WP ergab bei Annahme einer perfekten Vorlauf-Einschichtung wie zu erwarten in der Simulation keine Nachteile gegenüber der Referenz (Variante C). Ohne Annahme von speziellen Schichtladeeinrichtungen ergeben sich (simulierte) Mehrkosten im Bereich von bis zu 4%. Der Verzicht auf ein 3-Weg-Ventil im Rücklauf der WP hat mit Mehrkosten bis zu 15 % (SFH15) respektive 450 kWh_{el}/a (SFH100 35/30) gravierendere Konsequenzen. Eine Reduktion des Volumenstroms über die Wärmepumpe bei Boilerladung zum schnelleren Erreichen der Soll-Temperatur (T_{ww}) führt wider Erwarten zu noch höheren Mehrkosten (Variante E). Ein Grund dafür könnte eine mit der Reduktion des Durchflusses einhergehende Erhöhung der Vorlauftemperaturen sein. Eine möglich Verringerung des Wärmeübertragungskoeffizienten des Kondensators bei einer Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit des beheizten Mediums wurde im Modell nicht abgebildet.

WW-Temperatursensor

Anscheinend hat die Position des WW-Temperatursensors im Speicher einen noch grösseren Einfluss als der Verzicht auf Umschaltventile. Die Mehrkosten der Varianten mit tieferer Position dieses Sensors (F-I sowie K & L) sind auffallend hoch.

Eine WW-Vorrangschaltung ist auch hier von Vorteil, löst jedoch das Problem alleine nicht. In der Simulation war auch ein Abstand von 9 cm (F, G & K) zwischen diesem Sensor und dem Raumheizungs-Vorlauf nicht ausreichend um zu verhindern, dass der Raumheizungsbetrieb die Temperaturen im Speicher in Sensornähe beeinflusst, und zu einem häufigeren Einschalten der Wärmepumpe für die Boilerladung führt.

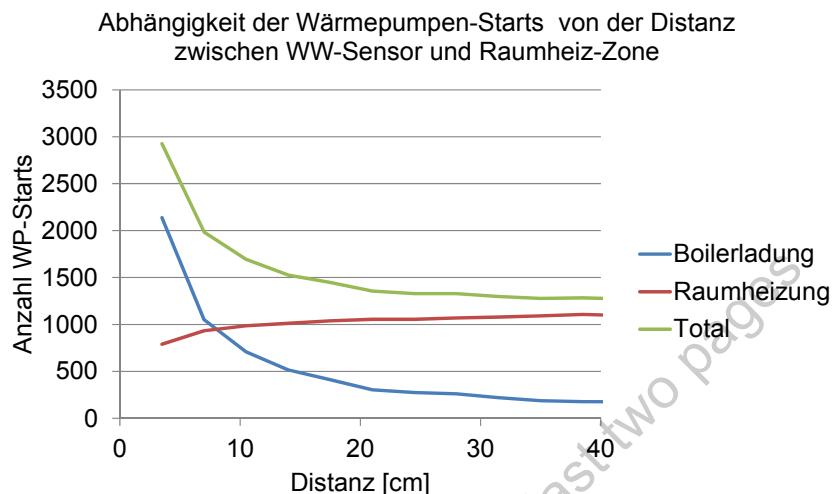


Abbildung 9: Abhängigkeit der Wärmepumpen-Starts von der Distanz zwischen WW-Sensor und Raumheiz-Zone des Speichers. Simulationen durchgeführt mit SFH45.

Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit der Anzahl Boilerladungen von der Position des WW-Sensors für SFH45. In diesen Simulationen führt erst ein Abstand von 20 cm zwischen dem WW-Sensor und dem RH-Vorlauf zu einer massiven Reduktion der Boilerladungszyklen. Dies obwohl sich mit dem grösseren Abstand auch das Warmwasser-Bereithaltungsvolumen verkleinert.

Vergleich mit Messdaten und Relativierung der Resultate

Die Simulationsresultate werden gestützt durch den Beitrag von Haberl et. al (2013), welcher auch in diesem Tagungsband zu finden ist und in dem eindrücklich an einem im Prüfstand ausgemessenen System gezeigt wird, dass die von der Wärmepumpe im WW-Modus an den Speicher gelieferte Wärme an Tagen mit grösserem Raumwärmebedarf ansteigt und bis zu 200% der an Warmwasser am gleichen Tag bezogenen Wärme betragen kann. Dennoch sind die Simulationsresultate mit Vorsicht zu geniessen, respektive unter Berücksichtigung der Annahmen und Grenzen der eingesetzten Modelle zu interpretieren. Folgende Punkte sind hierbei hervorzuheben:

- Das verwendete Speicher-Simulationsmodell berücksichtigt nicht die Möglichkeit von Kurzschluss-Strömungen zwischen eintretendem und austretendem Fluid, welche insbesondere bei einer Anordnung des Vorlaufs der Wärmepumpe im Bereich oder sogar unterhalb des Rücklaufs (Varianten B & C) auftreten könnte.

- Turbulenzen, die auf Grund eines Fluidstromes entstehen können, welcher mit hoher Geschwindigkeit in den Speicher eintritt, werden vom Modell ebenfalls nicht berücksichtigt. Hier besteht die Gefahr, dass der simulationstechnisch ermittelte Mindest-Abstand von 20 cm zwischen WW-Sensor und RH-Vorlauf in der Realität nicht ausreichend sein könnte.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Beitrag zeigt anhand eines Einfamilienhaus-Solarwärmesystems mit 15 m² Kollektorfeld und 0.9 m³ Kombispeicher für einen Heizwärmebedarf von 1 500, 4 500 und 10 000 kWh/(m²a), dass für den Betrieb hydraulisch und regeltechnisch schlechter Varianten – bei gleichen Anlagen-Komponenten - bis zu 48 % mehr elektrische Energie aufgewendet werden muss als für eine hydraulisch und regeltechnisch gute Lösung. Bei den aktuellen Strompreisen für Privatkunden im Europäischen Raum entspricht dies Mehrkosten im Bereich von 120 – 360 €/a.

Auf Grund der gemachten Erfahrungen im Prüfstand (Haberl et al. 2013) sowie der ergänzenden Simulationsstudien, welche hier präsentiert wurden, können folgende Empfehlungen gemacht werden:

1. Die Position des **Temperatursensors für die Boilerladung** muss einen Mindestabstand gegenüber der Raumwärme-Zone des Speichers einhalten. Dieser ist system-spezifisch (respektive abhängig vom Schichtungsverhalten des Speichers). Als erster Richtwert kann von einem minimalen Abstand von ca. 20 cm ausgegangen werden. Das Schichtungsverhalten des Speichers ist mit den real auftretenden Volumenströmen der Be- und Entladung zu testen, da bei ungenügender Schichtung der Raumwärmebetrieb ein Abkühlen des WW-Sensors und damit eine frühzeitige Beladung der Warmwasserzone auslösen kann, oder bei Beladung der Warmwasserzone der Speicher durchmischt werden kann.
2. Der **Speicher-Anschluss des Rücklaufs zur Wärmepumpe im Warmwasser-Betrieb** ist oberhalb der Raumwärme-Zone des Speichers anzusetzen. Zudem kann es von Vorteil sein, den Speicher bei Betrieb der Wärmepumpe im Raumheizungs-Modus ganz zu umgehen.

Die Möglichkeit, den Speicher im Raumheizungsbetrieb gänzlich zu umfahren, wurde in diesen Studien ausgeklammert. Bei modulierenden Wärmepumpen, insbesondere in Kombination mit Raumheizsystemen, welche immer einen Mindest-Durchfluss garantieren können, ist dieser Betrieb jedoch in Erwägung zu ziehen. Die Einbindung des Speichers in den Raumheizungsbetrieb der Wärmepumpe ist nur für die Nutzung von Solarwärme oder für die Verlängerung der WP-Laufzeiten zu empfehlen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Schweizerischen Bundesamt für Energie (BFE), welches diese Studien im Rahmen des SOL-HEAP Projektes finanziell unterstützt hat.

Literatur

- Dott, R., Haller, M.Y., Ruschenburg, J., Ochs, F. & Bony, J., 2012. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part B: Buildings and Space Heat Load - A technical Report of Subtask C. Report C1.
- Haberl, R., Reber, A., Haller, M.Y., Frank, E., 2013. Solare Kombispeicher mit Wärmepumpen: Labormessungen der Jahresleistung zeigen Optimierungspotential. In 23. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Haller, M., Dott, R., Ruschenburg, J., Ochs, F. & Bony, J., 2012. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part A: General Boundary Conditions - A technical Report of Subtask C. Report C1.
- Haller, M. & Frank, E., 2012. System-Jahresarbeitszahl grösser 4.0 mit Luft-Wasser Wärmepumpe kombiniert mit Solarwärme. In: 22. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11. Mai 2012, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Haller, M., Paavilainen, J., Dalibard, A., Perers, B., 2010. TRNSYS Type 832 v3.08 „Dynamic Collector Model by Bengt Perers“ - Updated Input-Output Reference. 2010.
- Haller, M., 2012. TRNSYS-Type 924 - Stratified Plug Flow Solar Combi-Store - Version 1.02. Internal Document.
- Perers, B. & Bales, C., 2002. A Solar Collector Model for TRNSYS Simulation and System Testing - A Technical Report of Subtask B of the IEA-SHC - Task 26.
- Ruschenburg, J., Palzer, A., Günther, D. & Miara, M., 2012. Solare Wärmepumpensysteme in Einfamilienhäusern - Eine modellbasierte Analyse von Feldtestdaten. In: 22. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11. Mai 2012, Bad Staffelstein, Germany.
- Thür, A., Vukits, M., Becke, W., Heinz, A. & Lerch, W., 2012. Ein Jahr Feldmessung von sechs Solar-Kombianlagen mit Wärmepumpen - Langfassung. In: 22. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11. Mai 2012, Bad Staffelstein, Germany.
- Wetter, M. & Afjei, T., 1996. TRNSYS TYPE 410 - Kompressionswärmepumpe inklusiv Frost- und Taktverluste - Modellbeschreibung und Implementation in TRNSYS. Zentralschweizerisches Technikum Luzern.

ERRATA for

Haller, M.Y., Haberl, R., Mojic, I. & Frank, E., 2013. 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.

Auf Grund eines Fehlers in den TRNSYS-Simulationsdecks für die Berechnungen der **Systeme mit Warmwasser-Vorrang-Schaltung** sind die entsprechenden Resultate zu korrigieren. Die positive Auswirkung der WW-Vorrang-Schaltung bei hydraulisch und regeltechnisch ungünstigen Varianten ist deutlich geringer als ursprünglich publiziert. Da die Referenz-Simulation neu die Variante ohne WW-Vorrang ist, reduziert sich auch der Mehrbedarf an el. Energie der einzelnen Varianten gegenüber der Referenz:

- Die Abbildungen 6 und 7 sind zu ersetzen durch:

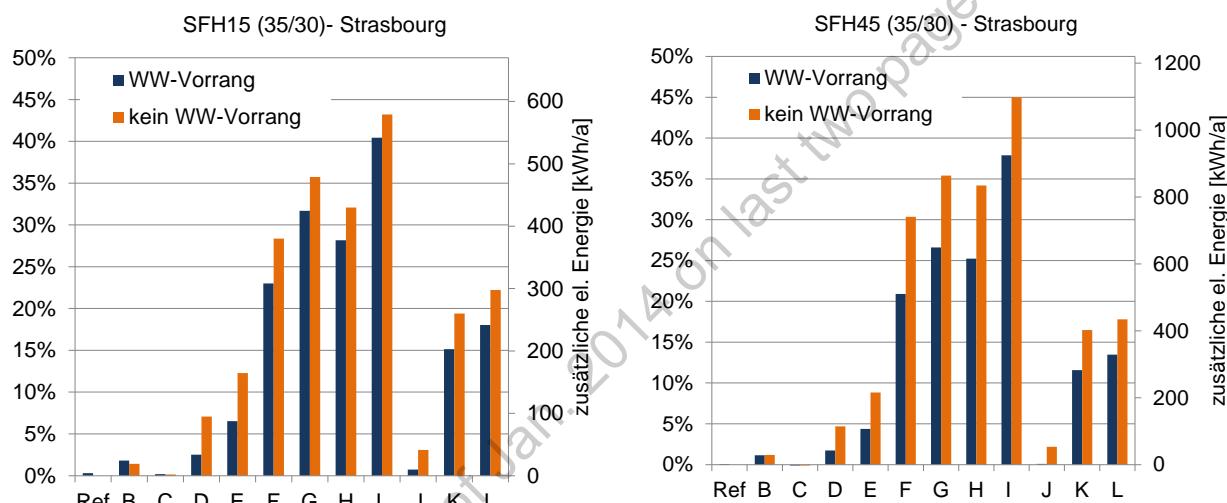


Abbildung 1: Zusätzlicher el. Energiebedarf gegenüber der Referenz für SFH15 und SFH45, jeweils mit Heizsystem 35/30 °C.

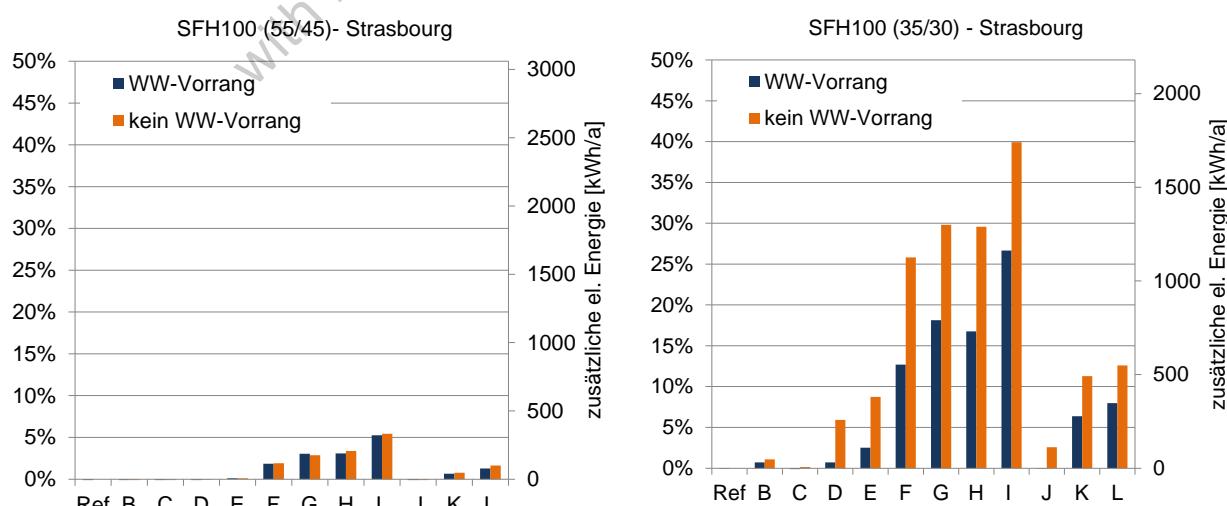


Abbildung 2: Zusätzlicher el. Energiebedarf gegenüber der Referenz für SFH100 mit Heizsystem 55/45 °C und 35/30 °C.

Daraus ergeben sich folgende Änderungen im Text:

S. 6 - Resultate und Diskussion – Abschnitt 1: "Den geringsten elektrischen Bedarf erzielten dabei das Referenzsystem (Ref) mit ohne WW-Vorrang, sowie Variante C".

S. 7: "... Mehrkosten an elektrischer Energie gegenüber dem Referenzsystem bis zu 458 % (SFH45), respektive 1800-1700 kWh_{el}/a (SFH100 35/30)."

S. 7: "Absolut gesehen sind jedoch auch hier die Mehrkosten mit bis zu 350-330 kWh_{el}/a nicht zu unterschätzen. In allen-den meisten Simulationen inklusive der Referenz führt eine WW-Vorrangschaltung zu besseren Ergebnissen. Beeindruckend ist, dass die Mehrkosten bei den "harmloseren" Varianten B, C, D und J bei WW-Vorrangschaltung praktisch ganz fast verschwinden, während dem sie massiv-deutlich reduziert werden für die meisten der übrigen Varianten."

S. 10 – Schlussfolgerungen und Empfehlungen: "bis zu 458% mehr elektrische Energie aufgewendet werden muss als für eine hydraulisch und regeltechnisch gute Lösung

Michel Y. Haller, 29. Jan. 2014