

Systematische Gliederung der Systemkombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen

Michel Y. Haller^{a)}, Elimar Frank^{a)}, Christoph Trinkl^{b)}, Wilfried Zörner^{b)}

^{a)}SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik HSR

Oberseestr. 10 , CH-8640 Rapperswil

Tel.: +41 (0)55 222 48 21, Fax: +41 (0)55 222 48 44

E-Mail: elimar.frank@solarenergy.ch

Internet:www.solarenergy.ch

^{b)}KOMPETENZFELD ERNEUERBARE ENERGIEEN, Hochschule Ingolstadt,

Esplanade 10, D-85049 Ingolstadt

Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden vermehrt Systeme zur Wärmebereitstellung für Raumheizung und Warmwasser auf Basis der Kombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen bis zur Serienproduktion entwickelt. 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. Dementsprechend sind oftmals zwei prinzipiell unterschiedliche Herangehensweisen für die konzeptionelle Gestaltung der Systemlösungen erkennbar: A) Die Wärmepumpe ersetzt den Heizkessel eines „konventionellen“ solarthermischen Kombisystems, und B) die Solaranlage wird ergänzend zur Wärmepumpe vorwiegend dazu genutzt, thermodynamisch ungünstige Betriebspunkte der Wärmepumpe zu vermeiden. Inzwischen sind Entwicklungen zu beobachten, welche auf der Kombination beider oder auch auf neuartigen Ansätzen beruhen und beispielsweise die Solarwärme je nach Temperaturniveau direkt oder über die Wärmepumpe in das System einkoppeln. Je nach Systemkonzept kann so eine Steigerung des Kollektorertrags und damit verbunden ein verringerter Primärenergieverbrauch des Heizsystems verglichen mit einer „konventionellen“ Anwendung erreicht werden. Im Anfang 2010 gestarteten Task 44 des Solar Heating and Cooling Programmes der Internationalen Energieagentur IEA werden kombinierte Solarthermie-Wärmepumpen-Systeme eingehend untersucht und weiter entwickelt. Um einerseits einen systematischen Überblick über die vielfältigen Variationen der Kombination zu geben und andererseits eine Grundlage für die Abwägung von Vor- und Nachteilen der verschiedenen Lösungen aus technischer Sicht zu ermöglichen, bedarf es eines systematischen Gliederungskonzeptes. In dieser Arbeit wird, ausgehend von einem Überblick über bisherige Einteilungen, ein weiterführen-

der Ansatz für die systematische Gliederung und Darstellung solcher Systeme präsentiert.

Grundlagen

Die Idee der Kombination von Kompressions-Wärmepumpen mit Solarthermie ist bereits mehr als 50 Jahre alt (vgl. beispielsweise Sporn & Ambrose 1955). In wissenschaftlichen Publikationsorganen sind in den letzten 50 Jahren weit mehr als 100 Artikel erschienen, welche die Kombination von Wärmepumpen mit Solarthermie thematisieren. Dabei wurden auch Ansätze zur Klassifizierung der Systemkonzepte vorgeschlagen. Freeman et al. (1979) unterscheiden in „parallele“, „serielle“ und „duale“ Systeme, wobei im parallelen System der Wärmebedarf zunächst solar abgedeckt wird, bis die notwendige Temperatur nicht mehr erreicht wird und die Wärmepumpe einspringt. In der seriellen Konfiguration wird die Solarwärme als ausschliessliche Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet, oft ohne die Möglichkeit der direkten Solarwärmenutzung ohne Wärmepumpe. Als „dual“ werden Systeme bezeichnet, welche zusätzlich zum Solarkollektor noch eine andere Wärmequelle für die Wärmepumpe verwenden.

Für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in Mitteleuropa stellt sich in den aktuellen Entwicklungen abweichend von Freeman et al. weniger die Frage, ob die Wärmepumpe zusätzlich zur Solarstrahlung noch eine weitere Wärmequelle verwendet – dies ist hier meistens der Fall – sondern insbesondere, ob die Solarwärme für mehrere Senken (d.h. sowohl zur direkten Bedarfsdeckung als auch für den Verdampfer der Wärmepumpe) genutzt wird. Systeme welche dieses Kriterium erfüllen wurden beispielsweise von Trinkl et al. (2004) als „combined“ bezeichnet.

In sogenannten „solar boosted heat pump water heaters“ wird in (typischerweise unabgedeckten) Solarabsorbern das Kältemittel der Wärmepumpe direkt verdampft (serielle Anordnung). Solche Systeme werden vorwiegend in Ländern mit entsprechend vorteilhaften klimatischen Bedingungen untersucht (vgl. Hepbasli & Kalinci 2009).

In den letzten Jahren wurden in Zentraleuropa vermehrt Systeme für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser mit einer Kombination von Solarwärme und Kompressionswärmepumpe entwickelt und im Markt eingeführt (vgl. Trojek & Augsten 2006). Eine zunehmende Anzahl dieser Systeme verwendet nicht nur zwei Wärmequellen für die Wärmepumpe (darunter Solarenergie), sondern auch zwei Wärmesenken für die Solarwärme (darunter den Verdampfer der Wärmepumpe oder das Erdreich).

Zusammenfassend sind die Möglichkeiten zur Kombination verschiedener Systemkomponenten zu einem System, welches sowohl die Nutzung von Solarwärme als

auch eine Wärmepumpe beinhaltet, sehr vielfältig. Eine erste Einteilung in verschiedene konzeptionelle Ansätze, welche von den derzeit angebotenen Systemen verfolgt werden, geben Müller et al. (2008) und Henning & Miara (2008). Diesen liegt jedoch im Ansatz eine eher phänomenologische Einteilung zugrunde. Offen ist dabei, ob beispielsweise für jedes innovative System jeweils eine neue Kategorie eröffnet werden muss, und inwiefern ein solcher Ansatz für die Entwicklung neuer und technisch vorteilhafter Produkte genutzt werden kann. Darüber hinaus sind keine umfassenden Analysen und Vergleiche der unterschiedlichen Konzepte und Ihrer Einsatzpotenziale unter unterschiedlichen Randbedingungen verfügbar.

Ansatz zur systematischen Gliederung

Die Einteilung verschiedener Konzepte in Kategorien wie parallel, seriell, dual oder combined kann einen schnellen, jedoch im Detail meist unspezifischen Überblick liefern. In einer umfassenderen systematischen Gliederung sollte zusätzlich abgebildet sein, welche nicht-solare Wärmequelle die Wärmepumpe ggf. nutzt (z.B. Boden, Luft, Grundwasser), welches Kältemittel die Wärmepumpe verwendet, ob es einen oder mehrere Wärmespeicher gibt, was für eine Art von Wärmespeicher genutzt wird, welche Kollektortechnologie (abgedeckt, unabgedeckt etc.) eingesetzt wird, etc. Zudem ist die Sinnhaftigkeit eines Anlagen-Konzeptes auch abhängig von den geografischen Bedingungen und der Charakteristik der Wärmelast. Aufbauend auf Trinkl et al. (2004) wird hier eine Möglichkeit der grafischen Einteilung vorgestellt (vgl. Abbildung 1) in der die Komponenten und die Wärmeströme des Systems skizziert werden. Um diese Aspekte abbilden zu können, wurde ausgehend von einer umfangreichen Literaturrecherche eine tabellarische Systemspezifikation mit zehn Aspekten entwickelt (vgl. Tabelle 1):

1. *Klimatische Bedingungen (Land, Region)*
2. *Wärmelast (Brauchwasser, Raumheizung, etc.)*
3. *Wärmequellen der Wärmepumpe (Solar, Luft, Boden, etc.)*
4. *Wärmesenken/Anwendung der Wärmepumpe (Brauchwasser, Raumheizung etc.)*
5. *Arbeitsmedium der Wärmepumpe (Kältemittel)*
6. *Absorber- oder Kollektortyp (unabgedeckt, abgedeckt, flach, Vakuumröhren, etc.)*
7. *Senken/Anwendung für die Solarwärme (Brauchwasser, Raumheizung, Wärmepumpe, Regeneration Erdreich etc.)*
8. *Speicher kälteseitig der Wärmepumpe (keiner, Wasser, Kies-Wasser, PCM, etc.)*
9. *Speicher wärmeseitig der Wärmepumpe (keiner, Wasser, etc.)*
10. *Zusätzliche Wärmeerzeuger (Elektro, Öl, Gas, Holz, etc.)*

Die Einteilung von über 50 in der Literatur beschriebenen Systemen nach der vorgestellten Klassifizierungsmethode zeigt, dass die Mehrzahl der untersuchten System-

kombinationen nicht für Raumheizung UND Warmwasser ausgelegt ist. Die Klassifizierung einer Auswahl von beschriebenen Kombisystemen ist in Tabelle 1 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass bei den meisten Studien jeglicher Hinweis auf das in

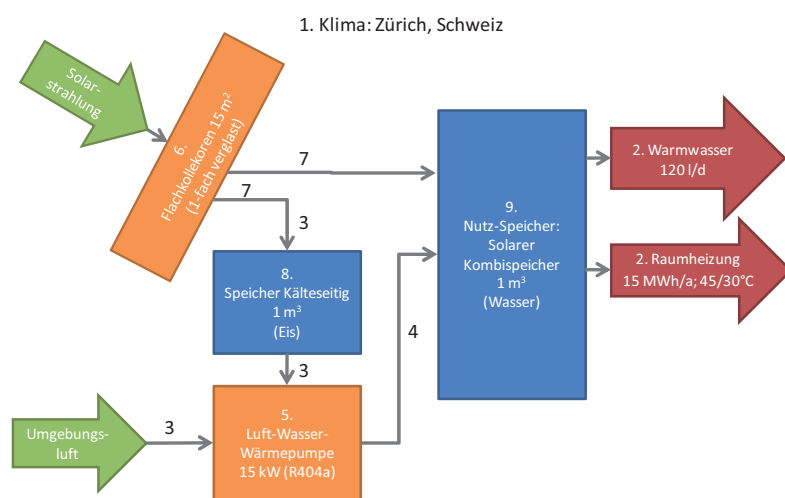


Abbildung 1: Grafische Darstellung eines exemplarischen Wärmepumpen-Solarsystems für Raumheizung und Warmwasser mit Luft-Wasser Wärmepumpe und Mehrfachnutzung der Kollektorwärme.

der Wärmepumpe eingesetzte Kältemittel fehlt, und in den wenigen Fällen mit Angabe des Kältemittels handelt es sich meist um R-22, so dass die ermittelten Leistungszahlen nicht übertragbar sind auf neue Produkte in welchen R-22 auf Grund des Kyoto-Protokolls zum Schutze der Ozonschicht nicht mehr zur Anwendung kommt. Studien von Anlagen, welche

explizit nicht FCKW-haltige Kältemittel erwähnen oder gar verschiedene nicht FCKW-haltige Kältemittel für diese Anwendung miteinander vergleichen, wurden bislang kaum veröffentlicht.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz für die systematische Gliederung und Darstellung von Solar-Wärmepumpen-Systemen präsentiert, welcher auf eingehenden Studien der wissenschaftlichen Literatur und der auf dem Markt angebotenen Systeme basiert. Der Ansatz umfasst zehn wesentliche Kriterien zur Einteilung der Systemkombinationen. Für einzelne Systeme lassen sich davon ausgehend grafisch vereinfachte Schemata abbilden. Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen sollen aus der vorgestellten Klassifizierung eine Typologie abgeleitet und Kennzahlen entwickelt werden, anhand deren existierende und neue Konzepte bewertet werden können. Insgesamt ist zu erwarten, dass die Sinnhaftigkeit der System-Anordnung und der Wahl der einzelnen Komponenten (Absorber- oder Kollektortyp, Wärmepumpe, Kältemittel) in wesentlicher Abhängigkeit steht zu den Bedingungen, welche durch das Klima und die Heizlast aufgeprägt werden. Denkbar ist, dass für verschiedene Kombinationen von Einträgen in der Matrix bestimmte Systembezeichnungen definiert und einige Aspekte der Klassifizierung als prinzipiell nicht sinnvoll kombinierbar erkannt werden.

Tabelle 1: Kriterien für die Gliederung von Solar-Wärmepumpen-Konzepten, angewendet auf Literatur über Systeme für Brauchwasser und Raumheizung (Kombisysteme).

	Freeman et al. 1979, parallel	Freeman et al. 1979, serial	Freeman et al. 1979, dual source heat pump	Aderson et al. 1980	Hahne & Homberger 1994	Schaap et al. 2000	Hafner 2004	Schmidt 2006	Kuang & Wang 2006	Trillat-Berdal et al. 2007	Citherlet et al. 2008, 1-air	Citherlet et al. 2008, 3	Tepe 2008	Kühl et al. 2008	Leibfried et al. 2008	Bauer et al. 2008: Eggenstein	Bauer et al. 2008: Rostock	Trinkl et al. 2009
0. Generelle Klassifizierung																		
P: parallel, S: serial, C: combined	C	C	C	P	C	C	P	C	S	C	C	C	C	P	C	C	C	C
1. Klima																		
Land	US	US	US	US	DE	NL	DE	DE	CN	FR	CH	CH	k.A.	DE	DE	DE	DE	DE
2. Nutzen / Bedarf																		
Brauchwasser	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raumheizung über Wasser					X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raumheizung über Luft	X	X	X	X			X		X									
Kühlung	(X)	(X)	(X)						X	X								
3. Wärmequelle(n) für die Wärmepumpe																		
Direktverdampfungs-Solarabsorber		X							X									
Solarwärme indirekt (Absorber ≠ Verdampfer)	X		X		X	X		X		X	X	X	X		X	X	X	X
Luft	X		X	X			X		X		X	X			a)			
Erdreich								X		X			X	X				
Grundwasser																	X	
Abwasser						X												
4. Wärmesenken für die Wärmepumpe																		
Keine Angabe																		
Brauchwasser						X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Raumheizung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5. Arbeitsmedium der Wärmepumpe																		
R-XX oder keine Angabe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	R290	R22	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
6. Solarkollektor-Typ																		
keine Angabe				X						X								
Direktverdampfungs-Absorber (unabgedeckt)									X									
Unabgedeckter Absorber (unabgedeckt)					X							X	X					
Flachkollektor (abgedeckt)	X	X	X			X	X	X				X	X	X		X	X	X
Vakuumröhren												X						
Luftkollektor											X							
Sonderkonstruktion:															b)			
7. Senken für die Solarwärme																		
Brauchwasser	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Raumwärme	X	X	X	X		X	X	X		X			X	X	X	X	X	X
Verdampfer der Wärmepumpe		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Aktive Erdreich-Regenerierung (BTES)										X			X					
Speicher kälteseitig der Wärmepumpe	X	X	X		X	X				c)		c)			X	X	X	X
8. Speicher kälteseitig der Wärmepumpe																		
Keiner				X			X		X	X	X			X				
Wasser (sensibel)	X	X	X		X	X		X				(X)						X
PCM (inkl. Eis)						X						(X)			X			
Anderes					d)											d)	e)	
Saisonale Speicherung					X	X				c)		c)		(X)	X	X	X	X
9. Speicher wärmeseitig der Wärmepumpe																		
Keiner	X	X	X															
Wasser				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
10. Zusätzliche Wärmeerzeuger																		
Elektro	X	X	X	(X)		(X)	X			X			X	X	X			
Öl				(X)														
Gas				(X)												X	X	
Holz																		
Anderes					f)													
k.A.: keine Angabe																		
a) Wärmeaustausch Luft-Absorber (Kollektor-Sonderkonstruktion), kein zusätzlicher Luft-Wärmetauscher																		
b) Hybrid aus Flachkollektor und Luft-Sole-Wärmetauscher																		
c) Aktive Erdreich-Regenerierung auf Grund der limitierten Speicher-Effizienz nicht als Saison-Speicherung bewertet																		
d) Künstlicher Aquifer, Kies-Wasser																		
e) natürlicher Aquifer (ATES)																		
f) Kraft-Wärme-Kopplung - nicht ausführlich beschrieben																		

Literatur

- Anderson, J., Mitchell, J. & Beckman, W., 1980. *A design method for parallel solar-heat pump systems*. *Solar Energy*, 25(2), 155-163.
- Bauer, D., Heidemann, W., Marx, R., Nussbicker-Lux, J., Ochs, F., Panthaloorkaran, V. & Raab, S., 2008. *Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher (Juni 2005 bis Juli 2008)*.
- Citherlet, S., Bony, J. & Nguyen, B., 2008. *SOL-PAC - Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation - Rapport final*. Swiss Federal Office of Energy (SFOE).
- Freeman, T.L., Mitchell, J.W. & Audit, T.E., 1979. *Performance of combined solar-heat pump systems*. *Solar Energy*, 22(2), 125-135.
- Hafner, B., 2004. *The Combination of Solar Thermal Collectors and Heat-Pumps in a Compact Unit for Passive Houses*. In: *Proc. of the EuroSun 2004*, Freiburg.
- Hahne, E. & Hornberger, M., 1994. *Experience With a Solar Heating ATEs System for a University Building*. *Journal of Solar Energy Engineering*, 116(2), 88.
- Henning, H. & Miara, M., 2008. *Systems using solar thermal energy in combination with heat pumps - 1st concept paper*. Fraunhofer ISE.
- Hepbasli, A. & Kalinci, Y., 2009. *A review of heat pump water heating systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1211-1229.
- Kuang, Y.H. & Wang, R.Z., 2006. *Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system*. *Solar Energy*, 80(7), 795-803.
- Kühl, L., Wendker, K. & Fisch, N., 2008. *Solarunterstützte Wärmepumpen-Heizsysteme-Betriebserfahrungen und Anlagenoptimierung*. In: *18. OTTI Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein.
- Leibfried, U., Günzl, A. & Sitzmann, B., 2008. *SOLAERA: Solar-Wärmepumpesystem im Feldtest*. In: *18. OTTI Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein.
- Müller, H., Trinkl, C. & Zörner, W., 2008. *Kurzstudie Niederst- und Niedertemperaturkollektoren für die Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform*. Kompetenzfeld Erneuerbare Energien, Hochschule Ingolstadt.
- Schaap, A., Warmerdam, J., Zegers, F. & Gramsbergen, E., 2000. *Solar Heating with Heat Pump and Ice Storage*. In: *Proc. of the EuroSun 2000*, Copenhagen.
- Schmidt, H., 2006. *Integrierte Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe zur Wärmezeugung*. *HLH*, 57(2), 22-29.
- Sporn, P. & Ambrose, E., 1955. *The Heat Pump and Solar Energy*. In: *Proc. of the World Symposium on Applied Solar Energy*. Phoenix, US.
- Tepe, R., 2008. *Kombination solarthermischer Anlagen mit erdgekoppelten Wärmepumpen: Systemkonzepte und energetisches Verhalten*. In: *18. OTTI Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein.
- Trillat-Berdal, V., Souyri, B. & Achard, G., 2007. *Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors*. *Applied Thermal Engineering*, 27(10), 1750-1755.
- Trinkl, C., Zörner, W. & Hanby, V., 2004. *A Review on Solar-Assisted Heat Pump Systems for Domestic Heating*. In: *Proc. of the EuroSun 2004*, Freiburg.
- Trinkl, C., Zörner, W. & Hanby, V., 2009. *Simulation study on a Domestic Solar/Heat Pump Heating System Incorporating Latent and Stratified Thermal Storage*. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131, 041008.
- Trojek, S. & Augsten, E., 2006. *Solartechnik und Wärmepumpe - Sie finden zusammen*. *Sonne Wind & Wärme*, 6/2006, 62-71.

Diese Arbeiten wurden mit unterstützender Finanzierung des Bundesamts für Energie (BFE) im Rahmen der IEA-SHC Task 44 durchgeführt.