

## **Solare Wärmepumpensysteme auf dem Prüfstand - Systemtests von 11 verschiedenen Systemen**

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

Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR

Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil

Tel.: +41 (0) 55 222 48 32, Fax: +41 (0) 55 222 48 44

E-Mail: robert.haberl@solarenergy.ch

Internet: www.solarenergy.ch

### **Einleitung**

Die Effizienz von Heizsystemen hängt nicht nur von den einzelnen Komponenten ab sondern auch von deren Integration in ein Gesamtsystem. Dies gilt insbesondere dann, wenn mehrere Wärmequellen in ein System integriert werden. Der Concise Cycle Test (CCT) ist eine Testmethode, mit der unter realitätsnahen Bedingungen das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten getestet werden kann. Die Methode folgt dem "hardware in the loop" Konzept, und wurde in früheren Projekten bereits erfolgreich bei Systemen angewandt, die thermische Kollektoren mit Öl-, Gas- und Pelletkesseln kombinieren (vgl. Vogelsanger 2005, Haller & Vogelsanger 2005, Konersmann et al. 2007, Haberl et al. 2009). Innerhalb des Projektes Sol-HEAP, dessen Resultate in den IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 (T44A38) "Solar and Heat Pump Systems" eingeflossen sind, wurde die Methode erweitert um auch Anlagen mit Wärmepumpen testen zu können. Inzwischen sind am Institut für Solartechnik SPF bereits 11 Systeme oder System-Varianten von insgesamt 6 verschiedenen Herstellern getestet worden. Die Gemeinsamkeit all dieser getesteten Systeme sind thermische Kollektoren, eine Wärmepumpe und ein Kombispeicher. Ansonsten unterscheiden sich die Konzepte deutlich:

- **Senke der Kollektoren:**  
Die Kollektoren liefern Wärme direkt an den Kombispeicher, an einen kalten Speicher, an den Verdampfer der Wärmepumpe oder eine Kombination aus mehreren Möglichkeiten.
- **Quelle der Wärmepumpe:**  
Die getesteten Wärmepumpen beziehen Wärme aus der Luft, dem Erdreich, den Kollektoren (direkt oder über einen kalten Speicher) oder aus einer Kombination aus mehreren Möglichkeiten.

Dieser Beitrag gibt eine Übersicht über die Prüf-Prozedur sowie über die Resultate und Erkenntnisse aus den Systemtests.

## Testmethode

Ein komplettes Heizsystem wird, analog zu einer Installation in einem Einfamilienhaus, auf dem Prüfstand installiert und in Betrieb genommen. Während des Tests wird das Gebäude inklusive der Raumwärmeverteilung, dem Warmwasserbezug und auch der Solarkollektoren durch den Prüfstand simuliert und emuliert. Der Prüfling muss die Last des Einfamilienhauses selbständig decken, um die geforderten Komfortbedingungen zu erfüllen (Vogelsanger 2002, Haberl et al. 2010).

Die dem gesamten Test zu Grunde liegenden Klimadaten entsprechen einem durchschnittlichen Jahr im Schweizerischen Mittelland. Die Last für die Raumheizung wurde für die Tests entsprechend des zu prüfenden Systems variiert. Die ersten Tests wurden mit einem Gebäude durchgeführt, das einen spezifischen Energieverbrauch von  $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  aufweist. Weitere Tests wurden mit einem Verbrauch von  $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  und  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  durchgeführt. Die Energiebezugsfläche der Gebäude betrug jeweils  $140 \text{ m}^2$ .

## Emulation der Quelle

Die in diesem Beitrag gezeigten Tests haben gemein, dass jeweils eine Wärmepumpe im Heizsystem enthalten ist. Die daraus resultierende Herausforderung lag darin, auch die Quelle der Wärmepumpe während dem Test möglichst realitätsgetreu zur Verfügung zu stellen.

Bei **Luft/Wasser**-Wärmepumpen wurde die Ausseneinheit, die den Verdampfer enthält, in einer speziell konzipierten Klimakammer platziert. In dieser Klimakammer wird die Luft kontinuierlich nach denselben Wetterdaten konditioniert, die auch für die Gebäudesimulation und die Simulation der Kollektoren verwendet werden. Neben der Lufttemperatur wird auch die Luftfeuchtigkeit geregelt. Dadurch wird ein realitätsgetreuer Betrieb der Wärmepumpe gewährleistet, der unter anderem auch die Enteisungsfunktion des Verdampfers enthält.

**Sole/Wasser**-Wärmepumpen wurden mit verschiedenen Quellen getestet: Mit Erdsonden und mit direkter Solarwärmenutzung am Verdampfer.

Bei Verwendung von Erdsonden wurde eine Konditionierungseinheit des Prüfstandes mit einer TRNSYS-Simulation gekoppelt. Das Simulationsmodell enthält den TRNSYS-Type 451 (EWS Modell) für die Simulation von Erdsonden (Huber & Schuler 1997, Wetter & Huber 1997). Dem Modell werden die gemessenen Rücklauftemperaturen und die Durchflussrate auf der Sole-Seite der WP übermittelt. Die durch die Simulation bestimmte Austrittstemperatur aus der Erdsonde wird an den Prüfstand übergeben, wo diese Temperatur emuliert wird. Da der Prüfzyklus innerhalb der 12 Tage alle Jahreszeiten enthält – der Zyklus beginnt im Winter, geht über den Sommer wieder in den Winter – muss zwischen den einzelnen Testtagen eine Konditionierung des Erdreichs erfolgen, um realitätsnahe Sole-Temperaturen zu erhalten. Dazu wird die Simulation als Jahressimulation mit einer vorgegebenen Last

durchgeführt, die während der eigentlichen Testtage auf Realzeit synchronisiert wird und auf die tatsächliche Last des Prüflings umstellt.

Für die Verwendung von Kollektoren als Quelle für Wärmepumpen musste die Emulation des Kollektorkreises überarbeitet werden, da die Kollektoren in diesen Fällen auch unterhalb der Taupunkttemperatur betrieben werden. Dazu wurde sowohl die Simulation der Kollektoren angepasst, als auch die Tauglichkeit des Prüfstands für niedrige Temperaturen nachgerüstet.

## **Geprüfte Systeme**

Die Systeme **I & II** sind parallele Sole(I)- und Luft(II)-Wärmepumpen in Kombination mit solarem Kombispeicher und 12 m<sup>2</sup> Kollektorfeld, welche von demselben System-Anbieter auf dem Markt verfügbar sind. Entsprechend verfügen sie über denselben Kombi-Speicher und dasselbe Kollektorfeld, jedoch mit unterschiedlicher Wärmepumpe. Im Gegensatz zur verwendeten Sole/Wasser-Wärmepumpe war die Luft/Wasser-Wärmepumpe leistungsgeregelte.

Systemtests **III & IV** wurden mit einem kombinierten parallel und seriell verschalteten Konzept durchgeführt, welches am Markt verfügbar ist. Als Quelle für den Verdampfer dienen sowohl Aussenluft als auch die Kollektoren. In Systemtest III wurden 15 m<sup>2</sup> abgedeckte Kollektoren simuliert und emuliert, in Systemtest IV 20 m<sup>2</sup> selektiv beschichtete Absorber ohne Abdeckung.

System **V** verfügte über eine leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpe (Split-Gerät) in Kombination mit einem solaren Kombispeicher und 10 m<sup>2</sup> Solarkollektoren. Diese Kombination ist ebenfalls am Markt verfügbar.

Systemtests **VI, VII & VIII** wurden durchgeführt mit einem parallelen Systemkonzept mit Erdsonden-Wärmepumpe (Sole/Wasser-WP). Dieses System wurde dreimal mit unterschiedlicher Ausführung von Hydraulik und Regelung getestet. Die Wärmepumpe und das Kollektorfeld waren dabei immer gleich, am Speicher wurden jedoch Änderungen vorgenommen.

System **IX** ist ein paralleles System mit Erdsonden-Wärmepumpe. Bei diesem System ist der Kondensator in den Kombispeicher integriert. Das System verfügte über andere innovative Elemente welche aus Rücksicht auf den Hersteller, der das System in den nächsten Monaten auf den Markt bringen möchte, hier nicht erwähnt werden.

Systeme **X & XI** wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt und am SPF getestet. Die Besonderheit ist die Wärmequelle der WP die nur durch 30 m<sup>2</sup> fassadenintegrierte Solarkollektoren bereitgestellt wird. Im ersten Systemtest entsprach die Leistung jedoch noch nicht den Erwartungen. Auf Grund der Erkenntnisse aus dem Systemtest wurde das Konzept überarbeitet und ein zweites Mal getestet. Dieses System ist nur für Passivhäuser mit einem entsprechend niedrigen Raumwärmebedarf von 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) vorgesehen.

Die energy flow charts (nach Task 44) der verschiedenen Systeme sind in den

Abbildungen 1 bis 5 zu sehen, Informationen über die verwendeten Komponenten sind in Tabelle 1 bis Tabelle 3 zu finden. Weitere Details über hydraulische Konzepte und Regelung der Systeme werden nicht publiziert aus Rücksicht auf die Rechte des geistigen Eigentums und die Anonymität der Hersteller.

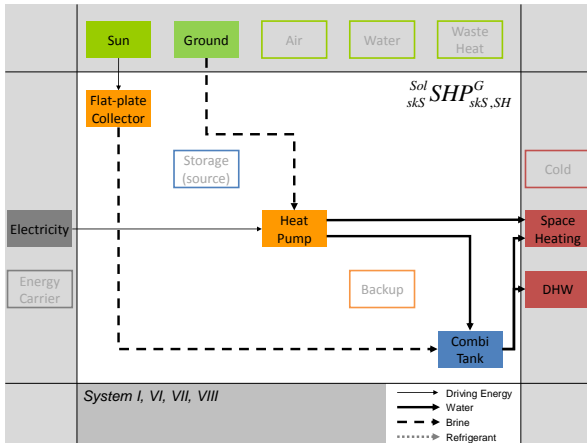


Abbildung 1: Energieflussdiagramm der Systeme I, VI, VII und VIII.

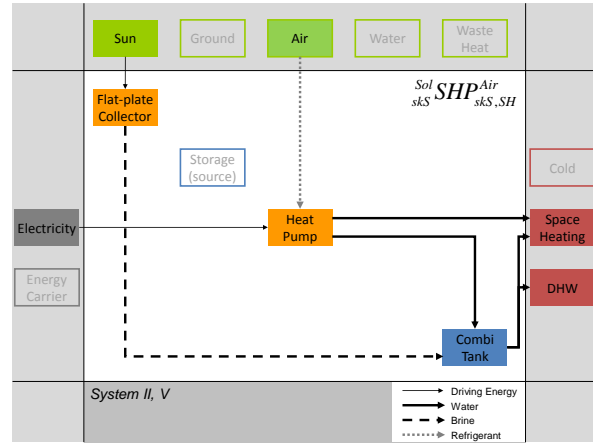


Abbildung 2: Energieflussdiagramm der Systeme II und V.

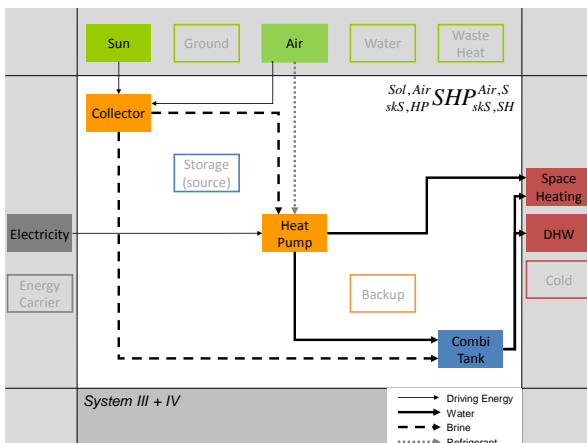


Abbildung 3: Energieflussdiagramm der Systeme III und IV.

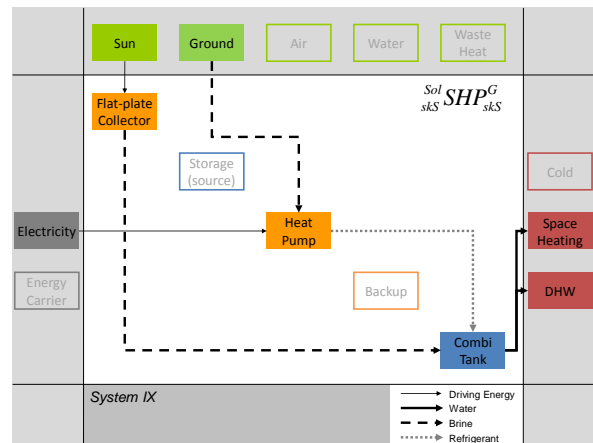


Abbildung 4: Energieflussdiagramm des System IX.

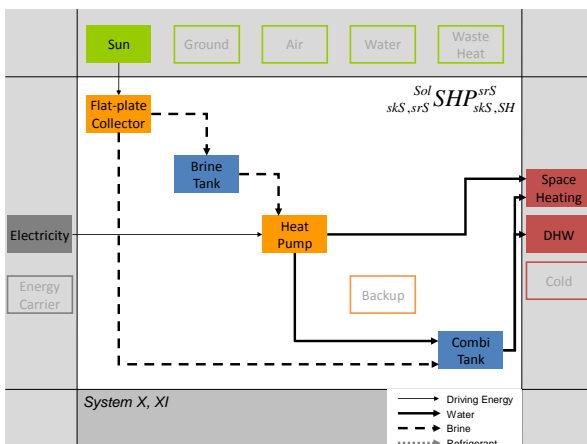


Abbildung 5: Energieflussdiagramm der Systeme X und XI.

**Tabelle 1: Herstellerangaben zu den Wärmepumpen der geprüften Systeme.**

	Min. / Max. thermische Leistung	Max. el. Leistungsaufnahme	COP
I	8.2 <sup>(a)</sup>	1.7	4.9 <sup>(a)</sup>
II	3.1 / 8.3 <sup>(b)</sup>	2.4	3.7 <sup>(b)</sup>
III + IV	n/a	n/a	n/a
V	1.3 / 5.6 <sup>(b)</sup>	1.7	3.2 <sup>(b)</sup>
VI – VIII	8.3 <sup>(a)</sup>	1.8	4.6 <sup>(a)</sup>
IX	n/a	2.4	n/a
X + XI	n/a	n/a	n/a

<sup>(a)</sup>B0W35; <sup>(b)</sup>A2W35**Tabelle 2: Herstellerangaben zu den Kombispeichern der geprüften Systeme.**

	Speicher Volumen [m <sup>3</sup> ]	Durch- messer mit Isolation [m]	Durch- messer ohne Isolation [m]	Speicher- höhe [m]	Wärme- übertrager Solar	WW Bereitung
I + II	0.9	1.0	0.8	2.1	Ja	TiT
III + IV	1.0	1.1	0.8	2.0	Nein	Ext.
V	1.0	1.0	0.8	2.2	Ja	IHX
VI - VIII	0.9	1.0	0.8	2.1	Nein	Ext.
IX	0.8	0.9	0.8	2.0	Ja	IHX
X + XI	1.0 <sup>(a)</sup>	1.0	0.8	2.2	Ja	TiT

TiT = Tank In Tank; Ext. = Externer Wärmeübertrager; IHX = Interner Wärmeübertrager;

<sup>(a)</sup> Es wurde ein zusätzlicher Glykolspeicher mit einem Volumen von 0.08 m<sup>3</sup> auf der Quellseite der Wärmepumpe eingesetzt.**Tabelle 3: Angaben zu den Kollektorfeldern, die im Test emuliert wurden.**

	Grösse des Kollektorfeldes [m <sup>2</sup> ]	Eta <sub>0</sub> <sup>(a)</sup> [-]	A <sub>1</sub> <sup>(a)</sup> [W/(m <sup>2</sup> K)]	A <sub>2</sub> <sup>(a)</sup> [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	Typ	Neigung
I + II	12	0.73	3.5	0.01	Flachkollektor	45°
III	15	0.75	3.4	0.01	Flachkollektor	45°
IV	20	0.84	7.9	0.01	Unabgedeckt- selektiv	45°
V	10	0.73	3.7	0.01	Flachkollektor	45°
VI - VIII	13	0.79	3.1	0.02	Flachkollektor	45°
IX	10	0.72	3.3	0.02	Flachkollektor	45°
X + XI	30	0.79	3.4	0.01	Flachkollektor	90°

<sup>(a)</sup> based on the collector gross area.

Die Installation der Anlagen erfolgte jeweils durch Installateure der Hersteller auf dem Prüfstand des SPF. Alle im Heizungsraum befindlichen Komponenten wurden in einem auf 20 °C konditionierten Testraum installiert. Die Ausseneinheit der Luft/Wasser-Wärmepumpen wurde in der Klimakammer installiert, die sich in einem Abstand von ca. 6 m von diesem Testraum befindet, wobei die Verbindungsleitungen Teil der zu prüfenden Anlage sind. Die Kollektoren und die Erdsonden wurden jeweils emuliert. Auch hier sind die Verbindungsleitungen Teil der geprüften Anlage.

## Resultate

Um die verschiedenen Anlagen zu vergleichen wurde die Arbeitszahl über die 12-tägige Prüfdauer nach Formel 1 ermittelt. Berücksichtigt werden in dieser Formel die vom System gelieferte Wärmemenge an das Heizkreis-Verteilssystem  $Q_{RH}$ , die gelieferte Warmwasser Energie  $Q_{WW}$  sowie der totale Bedarf an elektrischer Energie  $W_{el}$ . Entsprechend dieser Formel werden die Systemgrenzen um alle im Technikraum befindlichen Komponenten gezogen.

$$PF_{SHP+} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{W_{el}} \quad \text{Formel 1}$$

Wenn möglich wurde auch das Verhältnis aus der Wärmemenge, die zur Beladung des Warmwasser-Teils im Speicher durch die Wärmepumpe geliefert wurde ( $Q_{WP,WW}$ ), zum tatsächlichen Warmwasserbezug ( $Q_{WW}$ ) gebildet. Dieses Verhältnis ist ein guter Indikator für das Speicherkonzept und -management und sollte möglichst niedrig sein.

Die Ergebnisse der 12-Tages Tests sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Allerdings ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Systeme aus mehreren Gründen schwierig:

- Der Standard-Wärmebedarf der simulierten und emulierten Gebäude war in den Tests nicht identisch. Die ersten Tests wurden mit einem spezifischen Energieverbrauch (Normheizlast) von 100 kWh/(m<sup>2</sup>a) durchgeführt. Weitere Tests mit 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) folgten (im Zuge einer Umstellung auf einen neuen Teststandard in Absprache mit verschiedenen anderen europäischen Instituten). Schließlich wurden auch Tests mit 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) an Systemen durchgeführt, die speziell für Niedrigenergie-Häuser entwickelt wurden.
- Auch bei identischen Gebäuden war im Prüfzyklus der Energieverbrauch zur Raumheizung zwischen verschiedenen geprüften Anlagen verschieden. Dies liegt daran, dass der Durchfluss und Vorlauftemperatur im Heizkreis der Regelung des Herstellers überlassen wurde, und nicht vom Test-Verfahren vorgegeben war. Die Rücklauftemperatur ergibt sich aus der Reaktion des Gebäudes. Wie in den Ergebnissen zu sehen ist, unterscheidet sich die effektiv gelieferte Wärmemenge für dasselbe Gebäude um bis zu 50 %.
- Die Anlagen wurden mit verschiedenen Kollektorflächen getestet: 10 – 15 m<sup>2</sup> abgedeckte Flachkollektoren; 20 m<sup>2</sup> unabgedeckte, selektive Absorber; 30 m<sup>2</sup> abgedeckte Fassadenkollektoren als einzige Wärmequelle für die Wärmepumpe in einem Passivhaus.

**Tabelle 4: Ergebnisse der 12-Tages Messungen.**

<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 100 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	<b>PF<sub>SHP+</sub> [-]</b>	<b>W<sub>el,tot</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>RH</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WW</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>C</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WP,WW</sub>/Q<sub>WW</sub> [%]</b>
I	4.8	128.0	519.7	99.9	187.6	100
II	3.5 <sup>(a)</sup>	184.2 <sup>(a)</sup>	566.8	72.0 <sup>(a)</sup>	183.0	114 <sup>(a)</sup>
<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 60 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	<b>PF<sub>SHP+</sub> [-]</b>	<b>W<sub>el,tot</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>RH</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WW</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>C</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WP,WW</sub>/Q<sub>WW</sub> [%]</b>
III	3.2	95.1	203.7	99.8	234.1	-
IV	3.0	106.6	223.7	100.1	242.9	-
V	2.7	139.7	280.5	96.3	135.9	165
VI	4.0	105.2	315.6	102.1	149.5	112
VII	4.8	111.5	430.6	101.6	179.2	86
VIII	4.0	104.3	312.3	100.5	164.3	158
IX	4.5	95.3	334.7	91.6	141.3	-
<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	<b>PF<sub>SHP+</sub> [-]</b>	<b>W<sub>el,tot</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>RH</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WW</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>C</sub> [kWh]</b>	<b>Q<sub>WP,WW</sub>/Q<sub>WW</sub> [%]</b>
X	3.1	41.5	62.3	68.3	212.0	n/a
XI	3.5	47.7	95.1	70.0	224.0	40

<sup>(a)</sup> Das Mischventil zum Verbrühungsschutz wurde 3 Tage vor dem Ende des Prüfzyklus durch ein Stück Hartschaum verstopft. Dadurch konnte an den letzten 3 Tagen kein Warmwasser mehr gezapft werden.

PF<sub>SHP+</sub> = Arbeitszahl über die 12-Tage; W<sub>el,tot</sub> = Gesamte el. Energieaufnahme; Q<sub>RH</sub> = Heizenergie; Q<sub>WW</sub> = Warmwasserenergie; Q<sub>C</sub> = Eingebrachte Energie durch das Kollektorfeld; Q<sub>WP,WW</sub>/Q<sub>WW</sub> = Verhältnis aus der im Boiler-Lade Modus gelieferten Wärmemenge zur bezogenen Warmwasser-Wärmemenge.

Da die Ergebnisse der 12-Tages Tests nicht direkt zu Ergebnissen auf Jahresbasis extrapoliert werden können, müssen diese durch Simulationen ermittelt werden. Dazu wird jeweils ein Simulationsmodell der geprüften Anlagen mit den Messdaten aus dem 12-Tages Test erstellt und parametrisiert. Dies wurde für vier der getesteten Systeme gemacht: Für die beiden Systeme die mit einer Normheizlast von 100 kWh/(m<sup>2</sup>a) getestet wurden, eines der Systeme das mit 60 kWh/(m<sup>2</sup>a), und eines das mit 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) getestet wurde.

Die Simulationen wurden jeweils mit der dem Test entsprechenden Heizlast durchgeführt. Die Systeme I und II, die mit einer Last von 100 kWh/(m<sup>2</sup>a) getestet wurden, wurden zusätzlich mit einer Last von 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) simuliert. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Jahressimulationen.

<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 100 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	PF <sub>SHP+</sub> [-]	W <sub>el,tot</sub> [kWh]	Q <sub>RH</sub> [kWh]	Q <sub>WW</sub> [kWh]	Q <sub>WP,WW</sub> /Q <sub>WW</sub> [%]	Programm
I	4.5	15.5	2.9	4.1	100	TRNSYS
II	3.2	15.5	2.9	5.7	159	TRNSYS
<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 60 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	PF <sub>SHP+</sub> [-]	W <sub>el,tot</sub> [kWh]	Q <sub>RH</sub> [kWh]	Q <sub>WW</sub> [kWh]	Q <sub>WP,WW</sub> /Q <sub>WW</sub> [%]	Programm
I	4.6	11.7	2.9	3.2	100	TRNSYS
II	3.4	11.7	2.9	4.3	151	TRNSYS
V	2.9	11.7	2.8	5.0	166	TRNSYS
<b>Normheizlast (<math>Q_{SH}</math>) 15 kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>						
	PF <sub>SHP+</sub> [-]	W <sub>el,tot</sub> [kWh]	Q <sub>RH</sub> [kWh]	Q <sub>WW</sub> [kWh]	Q <sub>WP,WW</sub> /Q <sub>WW</sub> [%]	Programm
XI	3.7	2.5	2.2	1.7	-	Polysun

## Diskussion

**Arbeitszahlen:** Die im 12-Tages Test gemessenen System-Arbeitszahlen reichen von 2.7 bis 4.8. Die Einordnung dieser Arbeitszahlen ist allerdings, wegen der bereits oben beschriebenen Problematik mit verschiedenen Heizlasten, auch innerhalb eines Gebäudetyps, schwierig. Dies illustriert Abbildung 6. Hier sind Kennzahlen von zwei Systemtests gezeigt, welche mit denselben Komponenten, jedoch mit Unterschieden in Hydraulik und Regelung, durchgeführt wurden. Durch die Veränderungen am System wurde die Arbeitszahl von 4.0 auf 4.8 verbessert. Trotz der höheren Arbeitszahl war aber der Stromverbrauch im zweiten Test (System VII) höher als im ersten (System VI). Eine veränderte Reglereinstellung führte dazu, dass im zweiten Test während der gesamten Prüfdauer, also auch im Sommer, Wärme an das Gebäude geliefert wurde. Diese Wärme konnte unter sehr günstigen Bedingungen (hohe Außentemperatur und hohe solare Einstrahlung) erzeugt werden, wurde aber an das Gebäude geliefert, während effektiv kein Bedarf für Raumheizung bestand. Diese höhere Last führte dann zu einer Verbesserung der Arbeitszahl, weil der Bedarf an elektrischer Energie nicht in gleichem Masse gesteigert wurde wie die Wärmelieferung.

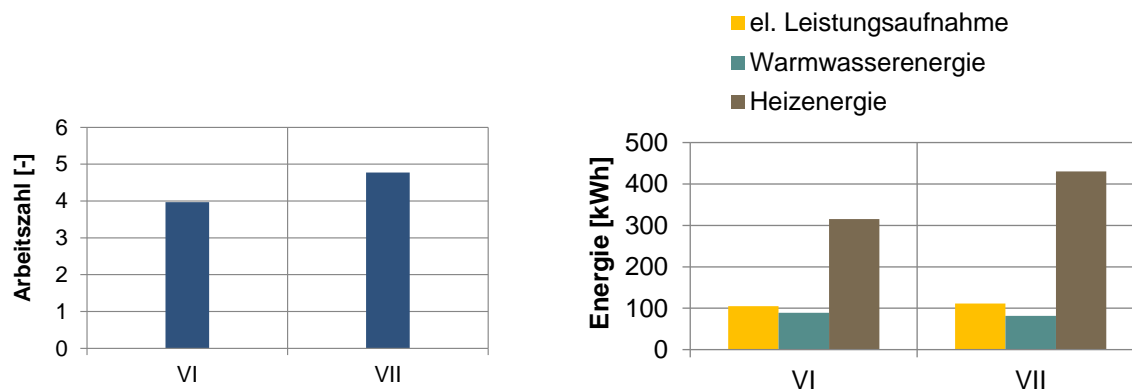


Abbildung 6: Kennzahlen der Systeme VI und VII aus dem 12-Tages Test. Die Arbeitszahl (PF<sub>SHP+</sub>) von System VII ist höher als bei System VI, obwohl gleichzeitig der Stromverbrauch höher ist.



**Kollektorertrag:** Der spezifische Kollektorertrag der getesteten Systeme reichte von 7 bis zu 16 kWh/m<sup>2</sup> pro Testzyklus. Den spezifisch niedrigsten Ertrag lieferten die Kollektoren in den Systemen X und XI. Hier handelt es sich allerdings um parallel/serielle Anlagen, die die Kollektoren in die Fassade integrieren, neben den Kollektoren keine andere Quelle für die WP verwenden und darüber hinaus in einem Niedrigenergie-Gebäude zum Einsatz kommen. In absoluten Zahlen lieferten die Kollektoren in diesen beiden Systemen deutlich mehr als 200 kWh während dem 12-tägigen Test, und damit mehr als in allen rein parallelen Systemen.

**WW-Bereitung:** In allen getesteten Systemen kam ein Kombispeicher für die Trinkwassererwärmung und Raumheizung zum Einsatz. Die Raumheizung wurde dabei in allen verwendeten Gebäuden über eine Fußbodenheizung emuliert – mit einer entsprechend niedrigen Vorlauftemperatur in der Heizkreisverteilung. Gerade bei der Verwendung von Wärmepumpen, deren COP stark von der Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke abhängt, ist eine saubere Trennung der Bereiche für Trinkwassererwärmung und Raumheizung wichtig um wenig Exergie zu verlieren. In Abbildung 7 ist zu sehen, dass die Wärmemenge, welche im Warmwassermodus von der Wärmepumpe geliefert wurde ( $Q_{WP,WW}$ ), in den meisten Fällen grösser war als die vom Speicher an die Warmwasserverteilung abgegebene Wärmemenge ( $Q_{WW}$ ). Von den Systemen, in denen die Messdaten es erlaubten dieses Verhältnis zu bilden, zeigte nur eines einen Wert von weniger als 100 %. Geht man davon aus, dass das Warmwasser im unteren Teil des Speichers auf die Temperatur der Raumheizung (ca. 35 °C) vorgewärmt wird, so sollte die von der Wärmepumpe gelieferte Wärmemenge für Warmwasser die vom Speicher bezogene Wärmemenge nicht überschreiten. Die gezeigten Daten sind ein Hinweis darauf, dass in fast allen Systemen eine Verfrachtung von Energie aus der Warmwasserzone des Speichers in die Raumheizungszone stattgefunden hat.

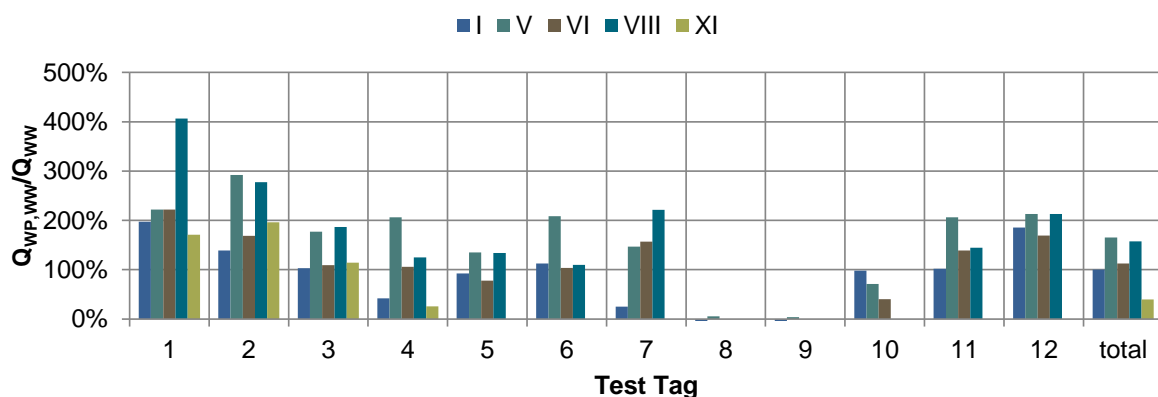


Abbildung 7: Wärmemenge von der Wärmepumpe im Boiler-Lade Modus geliefert ( $Q_{WP,WW}$ ) im Verhältnis zu bezogener Warmwasser-Wärmemenge ( $Q_{WW}$ ). Die einzelnen Testtage 1 bis 12 entsprechen den Monaten Januar bis Dezember eines Jahres.

**Exergetische Betrachtungen:** In Abbildung 8 sind Energie-Temperatur Diagramme der Systeme I und V gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus WP und Kollektoren ( $Q_{WP}$  und  $Q_C$ ) sowie die vom System gelieferte Energie für

Raumheizung und Warmwasser ( $Q_{RH}$  und  $Q_{WW}$ ) jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

In System I wurde die Wärme für die Raumheizung durch die nicht leistungsgeregelte WP bei Temperaturen zw. 32 °C und 40 °C geliefert während der Bezug der Raumwärme (gemessen nach dem Heizkreis-Mischer) bei 23 °C bis 33 °C stattgefunden hat. Die Energie für die Raumheizung wurde also bei einer im Durchschnitt um 8 K zu hohen Temperatur geliefert (A) mit einem entsprechend negativen Einfluss auf den COP der WP. Der Anteil der Wärme die bei über 40 °C geliefert wurde entspricht in etwa dem Bezug an WW (B).

In System V wurde die Wärme für die Raumheizung mit durchschnittlich nur 2 K Differenz zum Bezug geliefert. Allerdings zeigt sich auch, dass die Hälfte der gesamten Wärmelieferung der WP (ca. 160 kWh) bei Temperaturen über 45 °C stattgefunden hat (C). Der Bezug an Warmwasser war aber unter 100 kWh. Ein Teil der auf hohem Temperaturniveau gelieferten Wärme wurde also für die Raumheizung auf 25 °C bis 30 °C heruntergemischt.

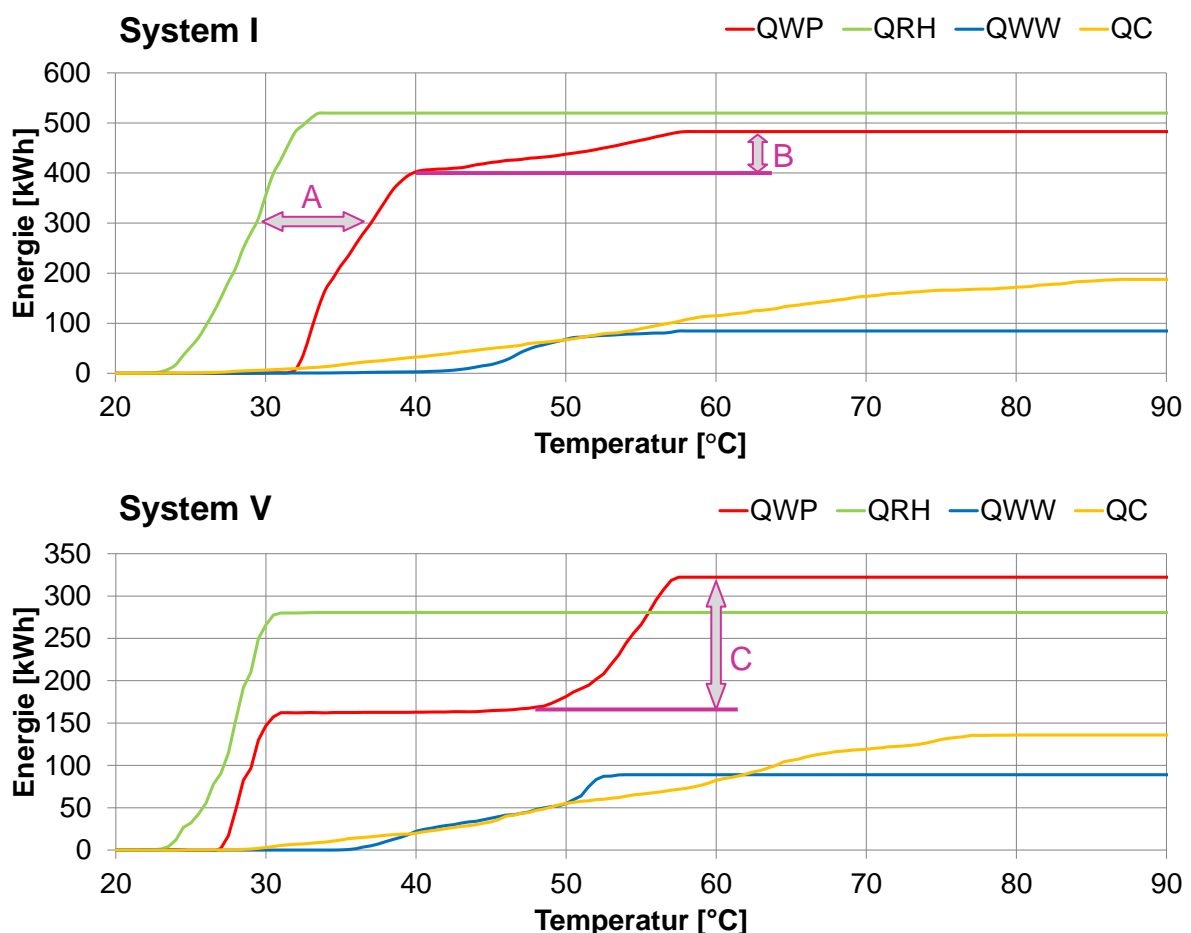


Abbildung 8: Energie-Temperatur Diagramme aus den 12-Tage Tests der Systeme II und V. Die Diagramme zeigen die kumulierte Energie über der Vorlauftemperatur zu der sie geliefert wurde ( $Q_{WP}$  und  $Q_C$ ) bzw. bezogen wurde ( $Q_{RH}$  und  $Q_{WW}$ ).

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Messungen zeigen, dass die Arbeitszahlen der Systeme nur bedingt für deren Beurteilung herangezogen werden können. Lediglich bei den Simulationen mit identischer Last können diese direkt verglichen werden. Dagegen haben sich in diesen Tests zwei Varianten der Datenauswertung als wesentlich für die Beurteilung des Verbesserungspotentials herausgestellt:

- Das Verhältnis aus Wärmelieferung im Warmwassermodus und dem tatsächlichen Wärmebezug ( $Q_{WP,WW}/Q_{WW}$ ) gibt einen wichtigen Anhaltspunkt über die Trennung der unterschiedlichen Temperaturbereiche für Warmwasser und Raumwärme im Speicher (Speicherschichtung und Speicherbewirtschaftung). Hier hat sich in den Tests gezeigt, dass es signifikante Unterschiede bei den verschiedenen Systemen gibt, die nicht nur aus dem Systemkonzept, sondern auch aus der Regelung und der Position der Temperaturfühler resultieren.
- Eine Darstellung der gelieferten (Wärmepumpe, Solarwärme) und bezogenen (Warmwasser, Raumheizung) Wärmemengen nach der jeweiligen Temperatur. Diese Darstellung veranschaulicht Exergieverluste im System und erlaubt eine qualitative Beurteilung des Systemverhaltens. Hier ist eine möglichst kleine Temperaturdifferenz zwischen der Lieferung und dem Bezug an Raumwärme, sowie ein möglichst kleiner Anteil an Wärmelieferung für die Warmwasserbereitung erstrebenswert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die verwendete Methode (CCT mit Jahressimulation) umfangreiche Möglichkeiten bietet, die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit von Gesamtsystemen zu analysieren und dadurch zu massgeblichen Verbesserungen beitragen kann.

Die Testmethode wurde seit Abschluss der Messungen weiterentwickelt. Durch einen neuen Ansatz wird nun sichergestellt, dass die Energiemenge für die Raumheizung in allen Tests identisch ist, wobei der Regler des Herstellers für die Raumwärme nach wie vor Teil des geprüften Systems ist. Dadurch sind neu auch die Arbeitszahlen bereits nach dem Test im Labor vergleichbar.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Schweizerischen Bundesamt für Energie (BFE), welches diese Studien im Rahmen des Projektes „SOL-HEAP“ finanziell unterstützt hat, sowie allen an den Tests beteiligten Firmen.

## Bibliographie

- Haberl, R., Haller, M.Y., Frank, E., 2010. Systemtests für solarunterstützte Heizungskonzepte mit dem Concise Cycle Test. In 16. Status-Seminar Forschen und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt, 2./3. September 2010, ETH Zürich, Schweiz.
- Haberl, R., Konersmann, L., Frank, E., 2009. Pelletsolar-2, Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand, Jahresbericht, Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- Haller, M., Vogelsanger, P., 2005. Kombi-Kompakt+. Schlussbericht, korrigierte Version von 2005. Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- Huber, A. & Schuler, O., 1997. Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. im Auftrag des BFE, Bern, Schweiz.
- Konersmann, L., Haller, M., Vogelsanger, P., 2007. PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung Pellet-Solarkombinierter Systeme für Heizung und Warmwasser. Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- Vogelsanger, P., 2002. The Concise Cycle Test Method – A Twelve Day System Test. IEA SHC Task 26 Technical Report.
- Vogelsanger, P., 2005. Untersuchungen von Kombisystemen mit Zusatzheizung. In: Tagungsband des 13. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland.
- Wetter, M. & Huber, A., 1997. TRNSYS Type 451 - Vertical Borehole Heat Exchanger EWS Model Version 2.4. Zentralschweizerisches Technikum Luzern & Huber Energietechnik.