

Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Speicherschichtung auf den Anlagennutzungsgrad

Robert Haberl, Elimar Frank

SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil

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

E-Mail: robert.haberl@solarenergy.ch

Internet: www.spf.ch

Einleitung

Das effiziente Funktionieren eines solaren Kombisystems hängt neben den Einzelkomponenten entscheidend von deren Integration in ein Gesamtsystem ab. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Speicher und dessen Be- und Entladestrategie. Die verschiedenen Hersteller von Speichern und Gesamtsystemen folgen dabei unterschiedlichen Philosophien. Einige Anbieter setzen möglichst gute Schichtladeeinrichtungen ein, die ihre Stärken vor allem bei hohen und wenig bzw. gar nicht geregelten Beladevolumenströmen und –leistungen haben. Andere Konzepte sind von der Auffassung geprägt, dass bei einem hydraulisch optimierten System Schichtladeeinrichtungen im Speicher keine nennenswerten energetischen Vorteile bringen, sondern ggf. sogar eher Nachteile (Kosten, Verschleiss usw.).

In dieser kontrovers geführten Diskussion wird immer wieder auf Simulationen Bezug genommen, die den Einfluss auf den Jahresertrag zeigen sollen. Es ist jedoch unklar, ob hier ein Speicher ohne Schichtbeladeeinrichtungen prinzipiell zu gut gerechnet wird, weil die üblichen Simulationsmodelle in Polysun, TRNSYS etc. die strömungsbedingte Durchmischung nicht detailliert berechnen.

Vorgehensweise

In den hier vorgestellten Untersuchungen wurde in dynamischen Systemtests der Einfluss von Schichtladeeinrichtungen und hydraulischer Verschaltungen auf den Nutzungsgrad von Gesamtsystemen ermittelt. Dazu wurden diese mit allen Komponenten auf dem Indoorprüfstand des SPF installiert.

Das zentrale Element der Untersuchung ist die am SPF entwickelte CCT Methode (CCT = Concise Cycle Test) [1]. Dieser dynamische Test beruht auf zwei Prinzipien:

- Erstens sind die Randbedingungen von Klima und Last, die während eines Jahres auftreten, in einem 12-tägigen Prüfzyklus repräsentativ zusammengefasst. Zum Beispiel besteht das Warmwasserlastprofil aus einer realistischen Anzahl

von Entnahmen verschiedener Mengen und Durchflussraten. Die Kaltwassertemperatur ist entsprechend der Saison und dem Volumen der einzelnen Zapfungen angepasst.

- Zweitens gibt es während des Tests möglichst keine Eingriffe in die Funktion des Systems.

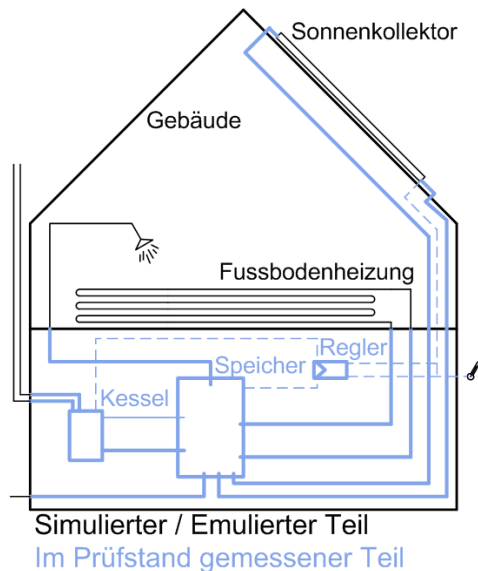


Abbildung 1: Konzept der Laborprüfung. Das Haus mit Heizverteilung und die Kollektoren sind simuliert, bzw. emuliert. Kessel und Speicher, sowie alle Regel- und Steuergeräte sind installiert und werden geprüft.

Die simulierte, bzw. emulierte Peripherie (Kollektorfeld, Haus, Warmwasserverbrauch) funktioniert möglichst realitätsnah in Reaktion auf das Verhalten, bzw. den Energieeintrag der installierten und real geprüften Anlagenteile (Speicher, Zusatzwärmeerzeuger, Regelungen). Abbildung 1 zeigt schematisch die Aufteilung zwischen den geprüften und emulierten Komponenten.

Im zweiten Teil der Prüfung werden die Mess-Ergebnisse des 12-tägigen Tests dazu verwendet ein Simulationsmodell des Gesamtsystems zu validieren, wobei analog zur interaktiven Gebäudesimulation am Prüfstand das Simulationsprogramm TRNSYS [2] verwendet wird.

Dieses Modell dient zur Bestimmung von Kennwerten wie dem Verbrauch an Zusatz- und Hilfsenergie und dem Nutzungsgrad der Anlage und einzelner Komponenten.

Beschreibung der getesteten Systeme

Die getesteten Kombisysteme haben als zentrales Element einen vermeintlich annähernd perfekt schichtenden Pufferspeicher. Dieser wird durch 15 m² Flachkollektoren und einen Öl-Brennwertkessel beladen. Der Solarkreis besteht aus zwei Hydraulikkreisen die durch einen Wärmeübertrager (WÜ) getrennt sind. Der Primärkreis steht unter Druck und ist mit einem Gemisch aus Wasser und Glykol gefüllt. Das durch den WÜ erwärmte Speicherwasser wird im Sekundärkreis durch die Schichteinrichtung des Speichers eingebracht. Die Zusatzheizung ist direkt mit dem Speicher verbunden. Ein weiterer externer WÜ dient der Warmwasserbereitung (Frischwasserstation). Durch eine drehzahlregelte Pumpe wird auf der heißen Seite thermostatisch gemischtes Speicherwasser durch den WÜ gepumpt. Die Raumheizung wird durch das erwärmte Speicherwasser direkt versorgt. In Test 1 wurde die Nachheizung (unter der herstellerseitigen Annahme eines lediglich margi-

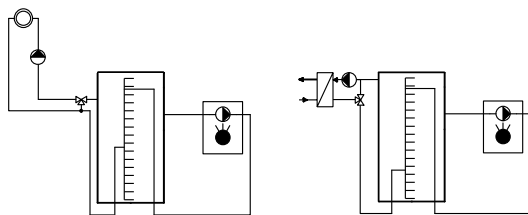


Abbildung 2: Konzept für Raumheizung und Wassererwärmung aus Test 1.

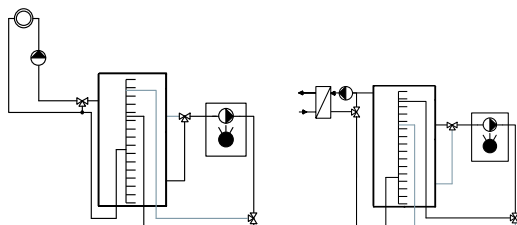


Abbildung 3: Konzept für Raumheizung und Wassererwärmung aus Test 2.

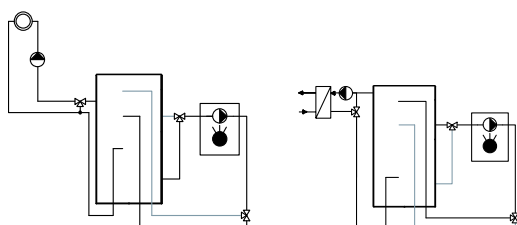


Abbildung 4: Konzept für Raumheizung und Wassererwärmung aus Test 3.

Leistungen entsprechend der aktuellen Randbedingungen modulieren. Für Test 3 wurde der Speicher aus Test 2 gegen ein identisches Modell ohne die Schichtladeeinrichtung getauscht (siehe Abbildung 4). Alle anderen Bedingungen (Solarkreis, Frischwasserstation, Umschaltventile und Regelung des Ölkessels etc.) bleiben gleich.

Ergebnis der Labormessungen

Der experimentelle Teil der Prüfung zeigt die Funktionalität des Systems und ermöglicht eine detaillierte Bewertung des Betriebsverhaltens. Für einen direkten Vergleich der Resultate der einzelnen Tests ist zu beachten, dass der kumulierte Energiebedarf zur Raumheizung in den verschiedenen Tests nicht identisch ist. Deshalb werden nach Formel 1 und Formel 2 System-Nutzungsgrade ausgewiesen, wobei die Strombedarf mit dem Faktor $F_{el} = 3$ gewichtet wird. Der Nutzungsgrad des Ölkessels wird nach Formel 3 aus der zugeführten Brennstoffenergie (bezogen auf den Heizwert) und der wasserseitig bilanzierten Energie ermittelt.

$$\zeta_{S,\text{öl}} = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{Q_{\text{öl}}} \quad \text{Formel 1}$$

$$\zeta_{S,\text{öl}+\text{so}+\text{el}} = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{Q_{\text{öl}} + Q_{\text{solar}} + F_{el} * E_{el}} \quad \text{Formel 2}$$

$$\zeta_K = \frac{Q_{\text{wat}}}{Q_{\text{öl}}} \quad \text{Formel 3}$$

nen Einflusses auf den jährlichen solaren Deckungsgrad) im Ein/Aus Betrieb ohne Leistungsmodulation betrieben. Die Einbindung erfolgte, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, über jeweils einen Anschluss im Vor- und Rücklauf. Für Test 2 wurde sowohl die Regelung als auch die Einbindung der Nachheizung (vgl. Abbildung 3) verändert. Es wird aufgrund der Temperaturen im Speicher zwischen einer Anforderung für Warmwasser (WW) oder Raumheizung (RH) unterschieden. Durch zusätzliche Umschaltventile wird der Vor- und Rücklauf der Nachheizung entsprechend der Anforderung auf verschiedenen Höhen realisiert. Die Solltemperatur des Kessels beträgt $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Warmwasserbereitung, für die Raumheizung ergibt sich die Solltemperatur aufgrund der Vorlauf Solltemperatur der Raumheizung plus einer Hysterese. Somit kann der Ölkessel die

Die Ergebnisse der drei durchgeführten 12-Tages Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Ausgangstest des Systems in der Standardkonfiguration (Test 1) konnte die gute Leistung des Kombisystems belegen. In Abbildung 5 ist der Verlauf der Messung an Tag 11 der Prüfung (entspricht in etwa den klimatischen Randbedingungen im November) gezeigt. Der On/Off Betrieb der Nachheizung ist deutlich zu erkennen.

Eine hydraulische und regelungstechnische Optimierung führte in System 2 zu einer Steigerung der Effizienz (der Nutzungsgrad unter Berücksichtigung von Öl- und Stromverbrauch verbessert sich um ca. 2 %). Die veränderte Regelung führt wie erwartet zu einer längeren Laufzeit der Nachheizung (vgl. Abbildung 6).

In Test 3, der mit Ausnahme der fehlenden Schichteinrichtung im Speicher dem Test 2 entspricht konnte ebenso die verlängerte Laufzeit des Ölkessels festgestellt werden, die modulierende Betriebsweise wurde insbesondere im Fall einer Heizungsanforderung erreicht (vgl. Abbildung 7).

Tabelle 1: Kennzahlen der 12-Tages Messung. Die ausgewiesenen Nutzungsgrade beziehen sich auf die Prüfzeit von 12 Tagen.

⁽¹⁾ Bezogen auf den Heizwert.

Grösse	Einheit	Test 1	Test 2	Test 3
Energieeintrag Heizöl ⁽¹⁾	[kWh]	475.6	476.7	503.6
Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	207.1	208.3	195.3
Elektrischer Eintrag Ölkessel	[kWh]	11.3	13.0	11.7
Elektrischer Eintrag gesamt	[kWh]	16.4	18.4	16.8
Energieverbrauch Raumheizung	[kWh]	507.8	526.2	532.6
Energieverbrauch Warmwasser	[kWh]	92.1	92.1	92.1
Anzahl Brennerstarts	[-]	72	53	54
Laufzeit Ölkessel	[h]	37.3	65.4	73.6
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	46.2	45.8	45.8
Systemnutzungsgrad $\zeta_{S,12d,\text{öl}+\text{so}+\text{el}}$	[%]	81.9	83.5	83.4
Systemnutzungsgrad $\zeta_{S,12d,\text{öl}}$	[%]	126.1	129.7	124.0

Ergebnis der Jahressimulationen

Die Ergebnisse der Jahressimulationen (vgl. Tabelle 2) zeigen eine Reduktion des jährlichen Ölverbrauchs durch die regelungstechnische und hydraulische Optimierung (Test 1 zu Test 2) von 1.6 %. In Test 2 wird der Rücklauf des Ölkessels bei einer Anforderung für die Raumheizung an einer tieferen und somit kälteren Stelle entnommen, zusätzlich erfolgt die Wärmebereitstellung auf einem tieferen Temperaturniveau. Dadurch wird der Brennwärtekessel bei einem höheren Wirkungsgrad betrieben. Auch der spezifische Kollektorertrag steigt (von 343 kWh/(m²a) auf 354 kWh/(m²a)).

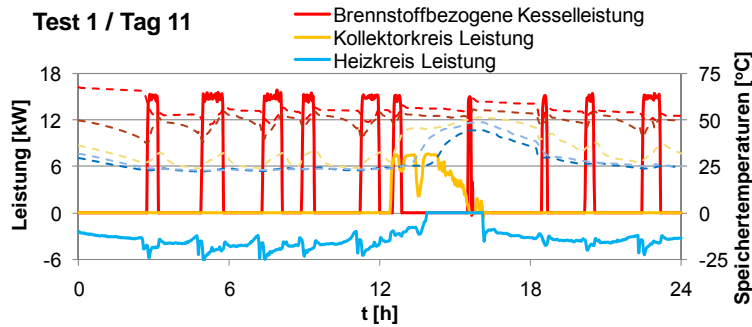


Abbildung 5: Ausschnitt der Messung aus Test 1: Ölkessel im Ein/Aus Betrieb, keine Leistungsmodulation, Einbindung über ein Anschlusspaar auf Schichteinrichtung.

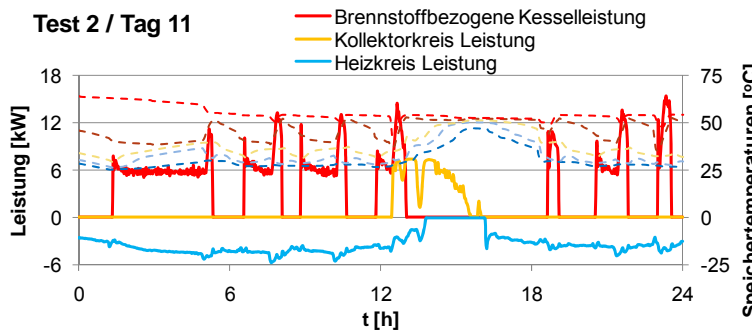


Abbildung 6: Ausschnitt der Messung aus Test 2: Ölkessel modulierend mit Vorlaufsoll entsprechend WW oder RH Anforderung, Einbindung mit zwei Anschlusspaaren (Umschaltventile) auf Schichteinrichtung.

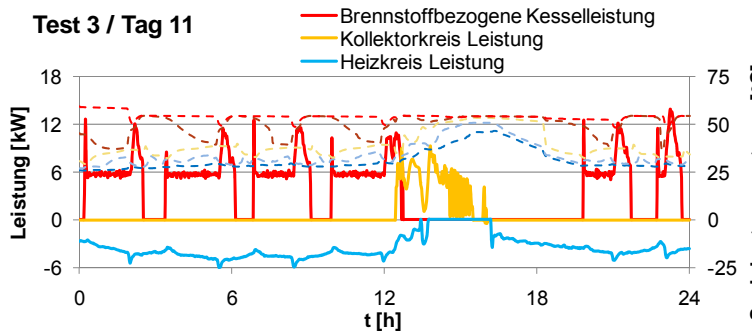


Abbildung 7: Ausschnitt der Messung aus Test 3: Ölkessel modulierend mit Vorlaufsoll entsprechend WW oder RH Anforderung, Einbindung mit zwei Anschlusspaaren (Umschaltventile) ohne Schichteinrichtung.

Tabelle 2: Ergebnisse der Jahressimulationen. Die Ausgewiesenen Nutzungsgrade beziehen sich auf ein Jahr.

⁽¹⁾ Bezogen auf den Heizwert.

Grösse	Einheit	Test 1	Test 2	Test 3
Energieeintrag Heizöl ⁽¹⁾	[MWh]	16.81	16.54	16.91
Energieeintrag Kollektorkreis	[MWh]	5.15	5.30	4.99
Elektrischer Eintrag gesamt	[MWh]	0.33	0.37	0.33
Energieverbrauch Raumheizung	[MWh]	15.57	15.57	15.57
Energieverbrauch Warmwasser	[MWh]	2.80	2.80	2.80
Systemnutzungsgrad $\zeta_{S,a,\text{öl}+so+el}$	[%]	116.8	118.7	116.1
Systemnutzungsgrad $\zeta_{S,a,\text{öl}}$	[%]	84.0	83.9	84.3
Jahresnutzungsgrad des Kessels ζ_K	[%]	97.7	100.1	99.7

In Test 3 wurde auf die Schichtladeeinrichtung im Speicher verzichtet. In dem hydraulisch und regelungstechnisch optimierten System erfolgt die Beladung des Speichers durch die Nachheizung entsprechend der Anforderung (RH oder WW, und somit entsprechend der erwarteten Vorlauftemperatur) wogegen der Vorlauf des Kollektorkreises immer an der selben Position zugeführt wird. Der Verbrauch an

Zusatzenergie dieser Variante ist im Vergleich zu Test 2 um 2.2 % höher, wobei der Jahresnutzungsgrad des Ölkessels sich leicht verschlechtert (von 100.1 % auf 99.7 %) und der spezifische Kollektorsertrag deutlich sinkt (von 354 kWh/(m²a) auf 332 kWh/(m²a)).

Zusammenfassung und Ausblick

- Die Prüfung des Kombisystems in der Basisvariante (Test 1) zeigte ein effizientes System, das den Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser sicher deckt. Die Installation und Inbetriebnahme ist durch das unkomplizierte hydraulische Schema und die übersichtliche Regelung sehr benutzerfreundlich.
- Die hydraulische und regelungstechnische Optimierung führt zu einer deutlichen Verbesserung der Effizienz der Anlage. Insbesondere der Jahresnutzungsgrad des Brennwertkessels konnte durch die veränderte Einbindung der Nachheizung erhöht werden. Hier ist besonders auf die Position des Rücklauf-Anschlusses zu achten, der möglichst tief sein sollte um mit kalten Temperaturen die Nutzung der Kondensationswärme zu ermöglichen.
- Die hydraulische und regelungstechnische Optimierung bedeutet einen erheblichen Mehraufwand bei der Planung und Installation der Anlage und birgt im Vergleich zur Standardvariante zusätzliches Fehlerpotential.
- Der vorliegende Fall zeigt dass auch in einem hydraulisch und regelungstechnisch optimierten System die Schichteinrichtung im Speicher, bei ansonsten identischen Systemen den Verbrauch an Zusatzenergie um mehr als 2 % senkt.
- Genaue Informationen zu den getesteten Systemen und weitere Auswertungen werden in einem ausführlichen Bericht gezeigt werden [3].

Danksagung

Das SPF dankt dem Schweizerischen Bundesamt für Energie und den beteiligten Herstellern für die Unterstützung der dargestellten Forschungsaktivitäten.

Literatur

- [1] Vogelsanger, P., 2002. The Concise Cycle Test Method - A Twelve Day System Test. IEA SHC Task 26 Technical Report.
- [2] Klein, S. A. et al., 2000. TRNSYS 16, a transient system simulation program – reference manual. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin – Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [3] Haberl, R., Frank, E.: Experimentelle und theoretische Untersuchung des Einflusses von Schichtladeeinrichtungen und optimierter hydraulischer Systemverschaltung auf den solaren Deckungsgrad. Abschlussbericht. Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2011. In Vorbereitung.