

Experimentelle Untersuchung der Schichtungseffizienz - Entwicklung einer Testmethode

P. Persdorf, R. Haberl, A. Reber, M.Y. Haller
Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR
Oberseestrasse 10, Schweiz-8640 Rapperswil
Tel.: +41 55 222 41 65, Fax: +41 55 222 48 44
E-Mail: patrick.persdorf@spf.ch
Internet: www.spf.ch

Einleitung

Ein solarer Kombispeicher mit einer Wärmepumpe (WP) als Zusatzheizung hat die Aufgabe Wärme sowohl für die Gebäudeheizung bei ca. 30 °C als auch für den Warmwasserbedarf bei rund 60 °C bereitzustellen. Um den Bedarf auf zwei so verschiedenen Temperaturen aus einem Speicher effektiv decken zu können, ist eine sehr gute Temperaturschichtung im Speicher erforderlich. Auf dem Markt werden diverse Schichtungseinrichtungen und hydraulische Lösungen zur Realisierung der Schichtung angeboten, doch eine Kennzahl zur Speicherschichtung in einem realitätsnahen Einsatz gab es bisher noch nicht. So war es bislang unmöglich, die Schichtungseffizienz verschiedener Speicher zu vergleichen. Am Institut für Solartechnik SPF wurde deshalb im Rahmen des Projektes StorEx ein Verfahren zur Beurteilung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern entwickelt, welches auf einem 24 h- Testprofil basiert. Die Haupt-Anforderung an dieses Profil war, dass das Ergebnis für unterschiedlich gut schichtende Kombispeicher repräsentativ ist für die Performance dieser Speicher über ein ganzes Jahr. Des Weiteren sollte es mit diesem Testprofil möglich sein, dass der Speicher nach der 24 h-Testsequenz den gleichen Schichtungszustand hat wie davor, damit der Test zyklisch wiederholt werden und ausgewertet werden kann. Zudem sollte mit dem Testprofil eine repräsentative Wärmebereitstellung und Energiezufuhr abgebildet werden.

Methode

Auswahl der Testsequenz

Die Dauer der Testsequenz wurde auf 24 h (1 Tag) beschränkt. An die Testsequenz wurden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Die Testsequenz sollte möglichst realitätsnah und dynamisch sein.
- Das Test-Ergebnis soll repräsentativ sein für die energetische Performance des Systems über ein ganzes Jahr.
- Insbesondere sollte sich eine unterschiedlich gute Schichtung und Einbindung des Speichers ähnlich auf das Testergebnis auswirken wie auf das Jahresergebnis.
- Da die Einbindung und Schichtung von Wärmespeichern gerade bei der Kombination von Solarwärme mit Wärmepumpen von entscheidender Bedeutung ist (Haberl et al. 2014, Haller et al. 2013), soll die Repräsentativität der Sequenz insbesondere für diese Kombination möglichst gut sein.
- In der Testsequenz sollen sowohl alle Beladevorgänge (Solar, Wärmepumpe) als auch alle Entladevorgänge (Raumwärme, Warmwasser) vorkommen.
- Der Zustand des Wärmespeichers soll nach der Testsequenz wieder dem Ursprungszustand vor der Testsequenz entsprechen (vernachlässigbare Differenz des Energie- und Exergiegehalts).
- Eine zyklische Wiederholung der Testsequenz soll – nach einem ersten Konditionier-Zyklus der verworfen wird, mehrmals dasselbe Resultat ergeben (Reproduzierbarkeit).

Ausgehend von einem TRNSYS-Modell eines Wärmepumpen-Solar Systems, das auf dem Task 44 des Solar Heating and Cooling Programm (SHC) basiert (Haller et al. 2012) und in der Abbildung 1 vereinfacht dargestellt ist, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Ziel der Studie war, denjenigen Tag aus einem Jahreswetterdatensatz zu ermitteln, welcher die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. Die Wetterdaten entsprechen dem Testreferenzjahr für den Standort Zürich, wie sie auch im Concise Cycle Test am Institut für Solartechnik (SPF) verwendet werden (Vogelsanger 2002). Mit den Wetterdaten ergibt sich ein Heizwärmebedarf von rund 8000 kWh/a (57.2 kWh/m²a). Das Warmwasser-Zapfprofil orientiert sich an europäischen Normen (EU tapping cycle Nr. 3 – L (large), FprEN 16147; September 2010). Dieses wurde jedoch leicht abgeändert (die Badewannen-Zapfung am Morgen wurde mit einer Dusch-Zapfung am Abend ausgetauscht). Der tägliche Warmwasserbedarf beträgt 9.45 kWh. Die Luft-Wasser Wärmepumpe wurde mit einer thermischen Leistung von 5.6 kW und einem COP von 3.24 bei A2W35 simuliert. Der Kombispeicher wurde in 4 Grössen simuliert (500 L; 780 L; 1000 L; 1200 L). Das simulierte Kollektorfeld ist nach Süden ausgerichtet mit einer Neigung von 45 ° und hat die folgenden Kennwerte:

Tabelle 1: Kollektorkennwerte

Aperturfläche	η_0	a1	a2
9.28 m ²	0.79	3.95 W/m ² K	0.012 W/m ² K ²

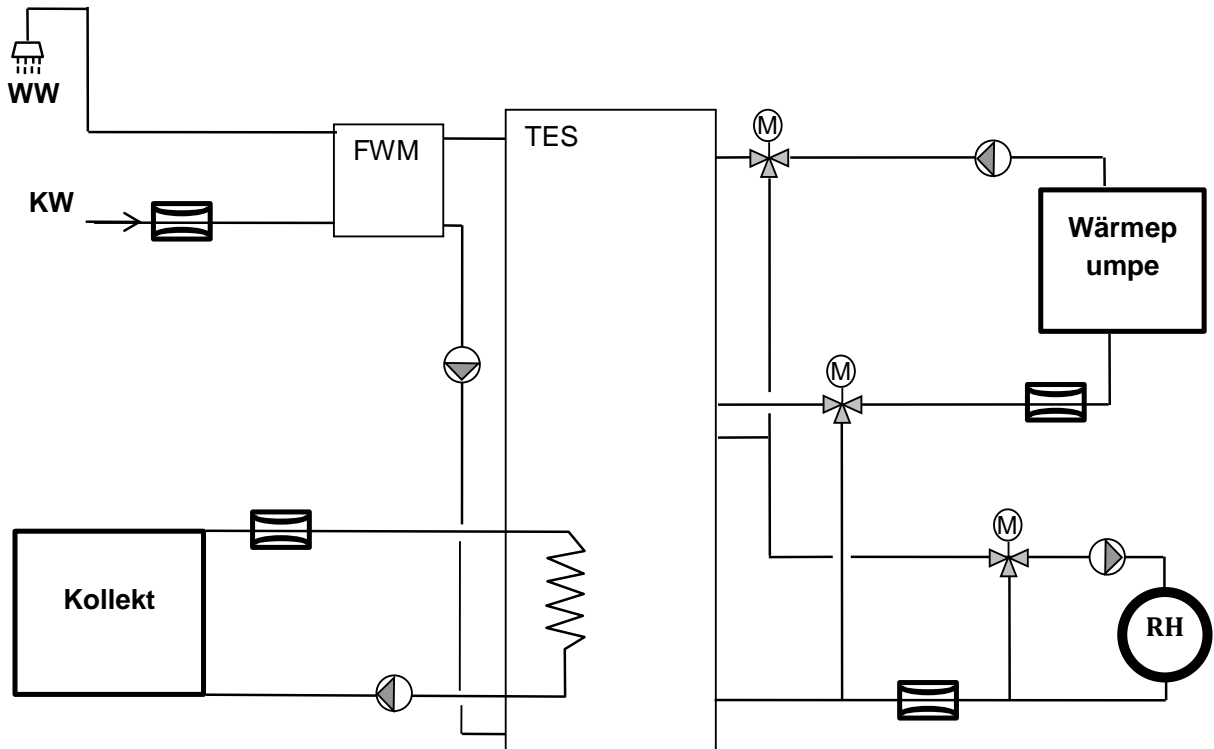


Abbildung 1: Wärmepumpen-Solar System (vereinfacht Darstellung).

Die Auswahl des geeigneten Tages des Jahreswetterdatensatzes erfolgte in mehreren Schritten:

1. Als erstes wurden aus einer Jahressimulation die Tage ausgeschlossen, an welchen kein Raumwärmebedarf vorhanden war, oder welche eine zu geringe (<10%) oder zu hohe (> 40%) solare Abdeckung zeigten.
2. In einem zweiten Schritt wurden aus den verbleibenden Tagen diejenigen ausgewählt, welche zu gleichem Speicherzustand zu Beginn und Ende des Tages führten, Zu diesem Zweck wurden Simulationssequenzen erstellt, in welchen die in Frage kommenden Tage sieben Mal hintereinander wiederholt wurden. Diese Wiederholungssequenzen enthielten jeweils zu gleicher Tageszeit die gleichen Werte für:
 - Warmwasser-Bedarf (Zapfungen)
 - Raumwärmebedarf (Leistung)
 - Einstrahlung auf die Kollektorebene
 - Umgebungstemperatur (Aussenluft)

Erreichte ein Tagesprofil auch nach mehrmaliger zyklischer Wiederholung nach Ablauf eines Tages nicht den gleichen Zustand wie zu Beginn des Tages, (+/-5%) so wurde das entsprechende Profil ausgeschlossen.

3. In einem dritten Schritt wurde von den verbleibenden Tagesprofilen dasjenige ausgesucht, welches am repräsentativsten die Jahresperformance des Systems widerspiegelt.

Diese Repräsentativität für das Jahresergebnis wurde ermittelt, indem mehrere Simulationen durchgeführt wurden in denen jeweils die **Schichtungseigenschaften** des simulierten Speichers geändert wurden. Unterschiedlich gute Schichtung wurde vereinfachend über eine Erhöhung der effektiven vertikalen **Wärmeleitfähigkeit** des Speichermediums in der Simulation eingestellt. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit (λ) des Speicherfluides von 0.6 W/(mK) schrittweise durch jeweils ungefähre Verdoppelung und Rundung auf 2048 W/(mK) erhöht. Mit jeder Einstellung der Wärmeleitfähigkeit wurden die folgenden Simulationen durchgeführt.

- Eine Jahressimulation und
- eine Simulation in welcher die verbleibenden Tagesprofile siebenmal hintereinander wiederholt wurden.

Für die simulierten Tagesprofile wurde die Korrelation zwischen dem Bedarf an elektrische Energie pro Tag und dem Bedarf an elektrischer Energie der Jahressimulation ermittelt.

4. In einem vierten Schritt wurde sichergestellt ob die Testsequenz universell einsetzbar ist. Dazu wurde überprüft ob die Simulationsergebnisse für unterschiedliche Speichergrößen bzw. Kollektorfeldgrößen gleich sensibel reagieren.
5. In einem letzten Schritt wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus den Tagesprofilen überprüft. Dies erfolgte im Hinblick darauf, dass bei einer realen Speicherprüfung das Tages-Testprofil so oft wiederholt werden soll, bis die Standardabweichung des Mittelwerts dreier aufeinanderfolgender Tage unter einem definierten Wert (zum Beispiel unter 1%) liegt. Nur wenn diese Wiederholbarkeit in den Simulationen erreicht wird, kann auch eine Wiederholbarkeit im realen Test erwartet werden. Es wurde dazu wiederum der simulierte Bedarf an elektrischer Energie betrachtet.

Systemgrenzen für den Labortest

Damit die Resultate der Tests von Speichersystemen verschiedener Hersteller und verschiedener Speicher-Konzepte vergleichbar sind, müssen für alle Prüflinge die gleichen Bedingungen geschaffen werden, und insbesondere die Systemgrenzen so gezogen werden, dass ein fairer Vergleich möglich ist. Bei vielen Kombispeichern sind die Wärmeübertrager des Solarkreises und der Brauchwassererwärmung im Speicher integriert. Diese Wärmeübertrager führen jedoch zu ähnlichen Auswirkungen auf die Schichtungseffizienz (Erhöhung der ΔT , Entropieproduktion beim Wärmeübergang) wie Mischungseffekte im Speicher.

Deshalb müssen auch eventuell vorhandene externe Wärmetauscher für das Warmwasser oder die Solarbeladung, sowie die dafür vorgesehenen zusätzlichen Pumpen in die Systemgrenzen mit einbezogen werden. Auch die jeweilige Bewirtschaftung des Speichers hat spezielle Auswirkungen auf die Schichtung, daher werden Ventile die zur Be- und Entladung genutzt werden in die Speicher-Bilanzgrenze miteinbezogen. Werden vom Speicher zu hohe Vorlauftemperaturen für Warmwasser oder Raumheizung geliefert, so führt dies ausserhalb des eigentlichen Speichers zu Mischung und Entropieerzeugung. Daher wird zusätzlich zur Speicher-Schichtungseffizienz ($\zeta_{str,Sp}$) auch eine Speicher-System-Schichtungseffizienz berechnet ($\zeta_{str,sys}$). Die unterschiedlichen Systemgrenzen dafür sind in Abbildung 2 dargestellt.

$\zeta_{str,sys}$ Bilanzgrenze = nach kalter Beimischung für RH und WW

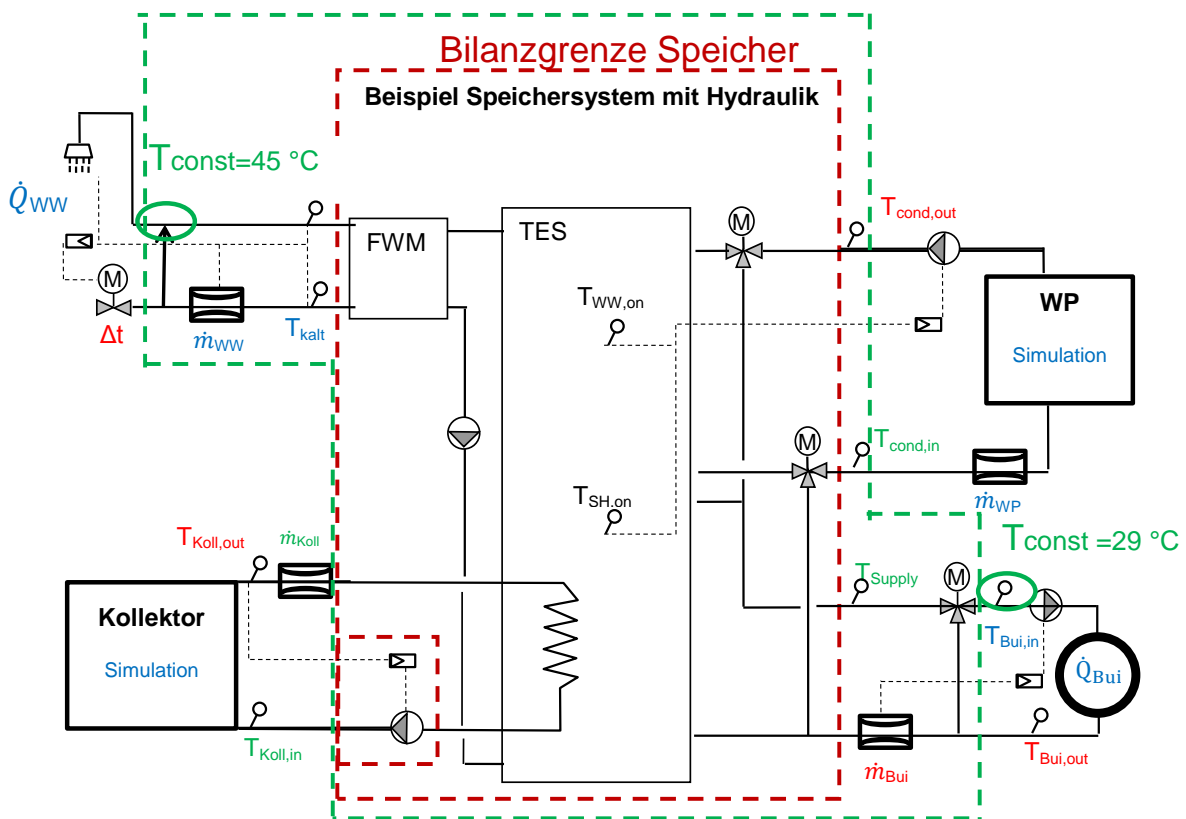


Abbildung 2: Bilanzgrenzen für die Schichtungseffizienz des Speichers (rot) und des Speicher-Systems (grün).

Kennzahlen die aus dem Speicher-Schichtungstest ermittelt werden sollen:

- Elektrischer Bedarf der Wärmepumpe
- Elektrischer Bedarf des gesamten Heizungssystems

- Tagesarbeitszahl (TAZ) der Wärmepumpe
- Systemtagesarbeitszahl
- Warmwasserverhältnis
- **Schichtungseffizienz**

Der **elektrische Bedarf der Wärmepumpe** ergibt sich aus der Integration (Diskretisierung nach Zeitschritten Δt) der simulierten elektrischen Aufnahme der Wärmepumpe:

$$W_{el,WP} = \sum_i P_{el,WP,i} \cdot \Delta t$$

Der **elektrische Bedarf des gesamten Heizungssystems** ergibt sich aus der zusätzlichen Berücksichtigung des el. Bedarfs für die Kreislaufpumpen, Ventile und Steuerung. Die Werte für die el. Pumpenleistungen beruhen auf den Durchflussmessungen und den Druckverlusten. Die elektrische Leistung für die Ventile und die Steuerung ist auf 10 Watt festgelegt. Der zusätzliche Bedarf für Pumpen, Ventile und Steuerung wird als parasitärer elektrischer Bedarf ausgewiesen ($P_{el,par}$).

$$W_{el,sys} = W_{el,WP} + W_{el,par}$$

Die **Tages-Arbeitszahlen der Wärmepumpe und des Heizungssystems** werden berechnet als:

$$TAZ_{WP} = \frac{Q_{WP}}{W_{el,WP}}$$

$$TAZ_{sys} = \frac{Q_{WW} + Q_{RH}}{W_{el,sys}}$$

Das Verhältnis der Wärmemenge welche von der Wärmepumpe im Warmwasser-Modus geliefert wurde, zur Wärmemenge welche effektiv für Warmwasser verwendet wurde, wird als **Warmwasserverhältnis** $Q_{WP,WW} / Q_{WW}$ ausgewiesen.

Die Schichtungseffizienz der Kombispeicher wird berechnet mit einer Methode, welche von van Berkel (1997) vorgeschlagen, von Huhn (2007) eingeführt und letztlich von Haller et al. (2010) weiter entwickelt wurde. Die Schichtungseffizienz (ζ_{str}) wird dabei als Verhältnis der Entropieproduktion im getesteten System ($\Delta S_{irr,exp}$) zur Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Referenz-Systems ($\Delta S_{irr,mix}$) angegeben.

$$\zeta_{str} = 1 - \frac{\Delta S_{irr,exp}}{\Delta S_{irr,mix}}$$

Die Entropieverluste werden auf Grund der ermittelten Wärmeverluste ($Q_{Verluste}$) des Speichers (aus der Energiebilanz) mit der mittleren Speichertemperatur während dem Test berechnet.

$$\Delta S_{Verlust} = \frac{Q_{Verlust}}{T_{Speicher,avg}}$$

Da die Speichertemperatur während des Tests räumlich und zeitlich nicht konstant bleibt, müssten die exakten Verluste variabel über Zeit und Speicheroberfläche gerechnet werden. Der Fehler, der durch die Annäherung durch die mittlere Speichertemperatur während dem Testzyklus ($T_{Speicher,avg}$) entsteht, ist jedoch bei relativ gut isolierten Speichern gering. Der Aufwand für eine genauere Bestimmung des Temperaturniveaus der Verluste wäre nicht gerechtfertigt.

Um die Entropiebilanz auflösen zu können muss folgende Bedingung für den Test erfüllt werden: Der Speicherzustand, und damit auch der Entropiegehalt des Speichers, muss am Anfang und Ende des Tests praktisch identisch sein:

$$\Delta S_{Speicher} = 0$$

Um sicher zu stellen, dass diese Bedingung erfüllt wird, wird die Testsequenz so oft in einer Schleife wiederholt, bis die Resultate der Messungen mehrmals hintereinander praktisch das gleiche Ergebnis aufweisen. Ausschlaggebend ist dabei die Standardabweichung des Mittelwerts dreier aufeinanderfolgender Test-Zyklen.

Resultate

Ausgewählte Test-Sequenz

Die Charakteristiken des ermittelten Test-Tagesprofils sind in Abbildung 4 dargestellt. Zu sehen sind die Leistungsprofile der 24h-Testsequenz für die Gebäudeheizung, den Kollektor und den Warmwasserbedarf.

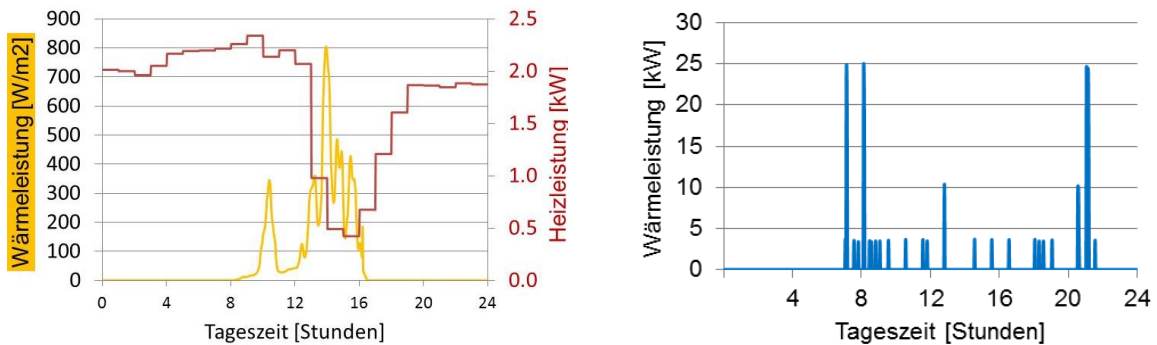


Abbildung 4a: Generierte Wärmeleistung pro m² Kollektorfeld vor Abzug der thermischen Verluste. Sollheizleistung (60 min. Mittelwerte). 4b: Warmwasser Zapfprofil

Abbildung 5 zeigt die Korrelation zwischen dem elektrischen Systemenergiebedarf am Testtag und dem elektrischen Systemenergiebedarf über ein Jahr:

- Die einzelnen Datenpunkte entsprechen dabei jeweils verschiedenen Einstellungen der vertikalen Wärmeleitfähigkeit des Speichers in der Simulation des Tagesprofils und der Jahresperformance.
- Jeder Datenpunkt der farblich dargestellt ist, steht für den Mittelwert aus 3 aufeinander folgenden Sequenzen des Testtags.
- Es besteht ein linearer Zusammenhang mit der Geradengleichung ($f(x) = 195.6x$)

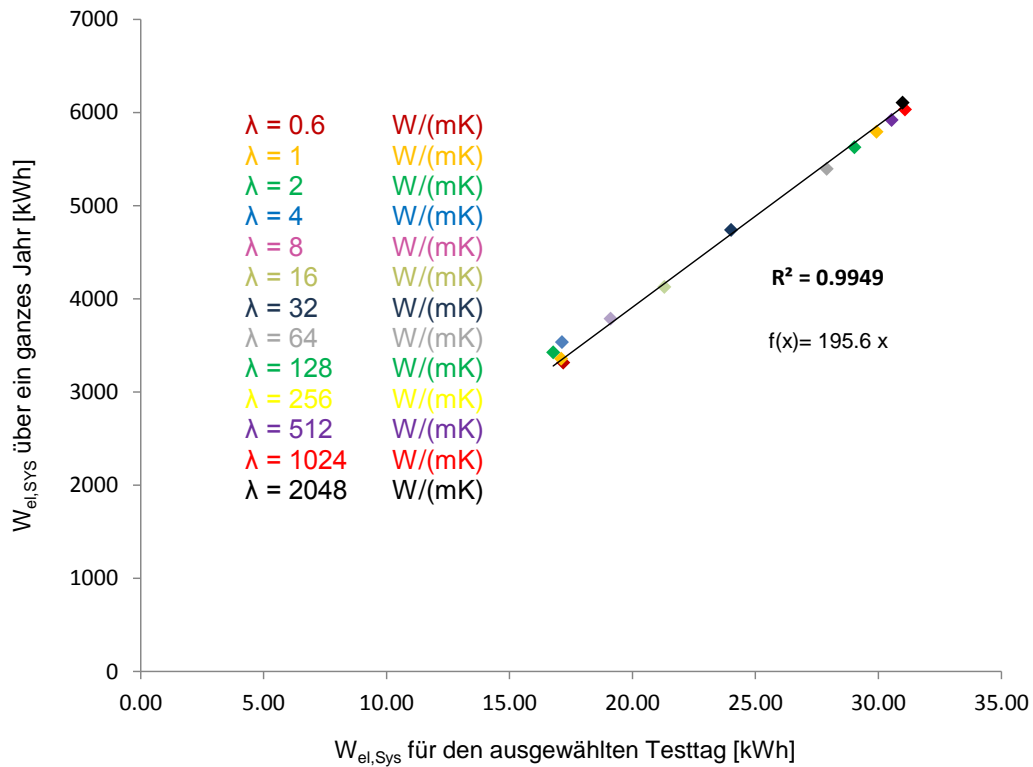


Abbildung 5: Korrelation zwischen elektrischem Systemenergiebedarf dreier Sequenzen mit dem elektrischen Energiebedarf über das ganze Jahr auf Grund von TRNSYS-Simulationen.

Die nachstehende Grafik zeigt die Korrelation zwischen dem elektrischen Systemenergiebedarf am Testtag und dem elektrischen Systemenergiebedarf übers Jahr für verschiedene Speichergrossen.

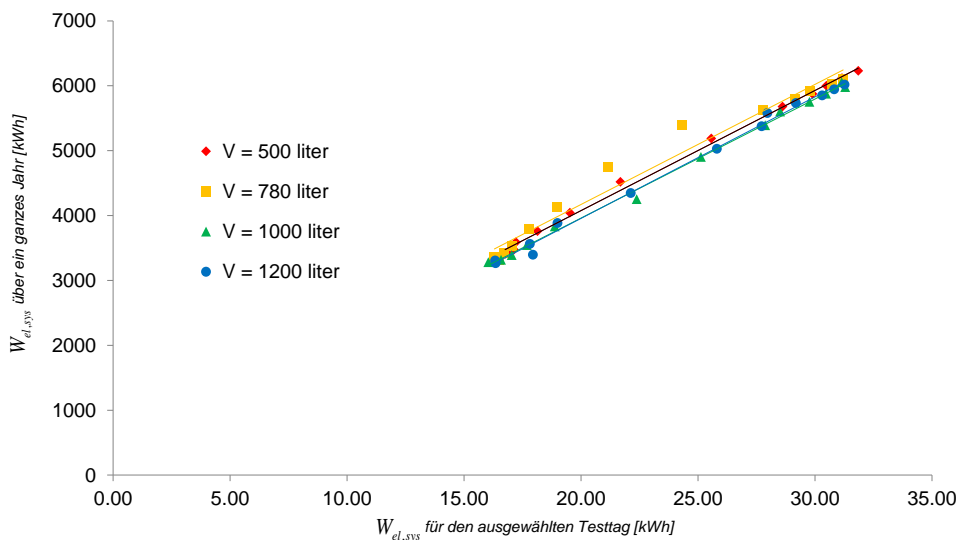


Abbildung 6: Korrelation zwischen elektrischem Systemenergiebedarf des ausgewählten Testtags mit dem elektrischen Energiebedarf über das ganze Jahr für verschiedene Speichervolumen.

Speicherbeladung und Speicherentladung im Prüfstand

Der **Solarwärmeeintrag** und die Beladung des Speichers durch die **Wärmepumpe** werden durch eine vereinfachte Simulation und Emulation dieser Komponenten in Abhängigkeit der Rücklauftemperaturen durchgeführt. Für die Ein- und Ausschaltkriterien müssen die Hersteller sowohl die Platzierung von Temperatursensoren am Speicher als auch die Ein- und Ausschaltpunkte vorgeben. Ein Resultat von diesem Vorgehen ist, dass sowohl der Solarertrag als auch die thermische Energiezufuhr der Wärmepumpe abhängig sind vom Prüfling.

Der Bedarf für **Raumheizung und Warmwasser** muss zur Vergleichbarkeit für alle Speicher gleich sein. Gleichzeitig muss eine ausreichende Nutztemperatur gewährleistet sein.

Die **Raumheizung** funktioniert wie in Abbildung 7 dargestellt. Es wird ein Heizleistungs-Sollwert (\dot{Q}_{Bui}) über die 24 h Sequenz vorgegeben. Der Tages-Heizwärmebedarf liegt insgesamt bei 42.5 kWh. Die Beheizung erfolgt immer an einen Raum (\mathcal{G}_{Room}) mit 20 °C, es wird dazu ein stationäres Modell für die Wärmeabgabe einer Fussbodenheizung berechnet. Dadurch wird sichergestellt, dass bei tiefen Vorlauftemperaturen vom Speicher auch der Raumwärme-Eintrag entsprechend sinkt.

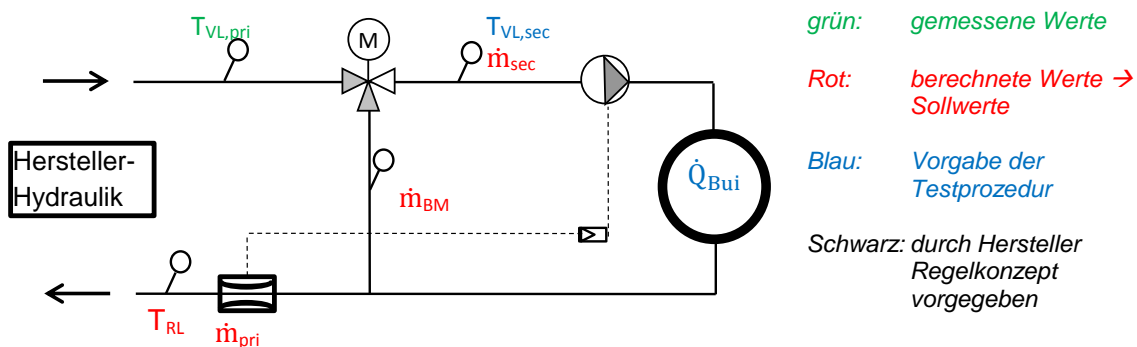


Abbildung 7: Regelung Heizkreis

Die **Warmwasser Zapfungen** mit insgesamt 9.45 kWh/d werden mit einer Kaltwasser-Temperatur von 9.1 °C emuliert.

Damit der Verbrühungsschutz gewährleistet ist wird die Vorlauftemperatur auf 52.5 °C gemischt. Dies kann optional vom Hersteller realisiert werden, ansonsten wird der Verbrühungsschutz vom Prüfstand übernommen. Um realistische Volumenströme während einer Zapfung im Speicher zu erhalten wird über ein zweites Mischventil auf 45 °C gemischt. Dadurch wird ein gewöhnliches Verbraucherverhalten emuliert. Diese Temperatur wird zur Berechnung der Entropieverluste auf Systemebene verwendet.

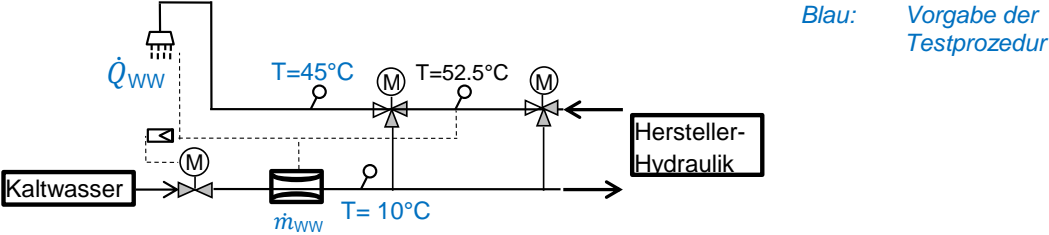


Abbildung 8: Regelung der Warmwasserzapfungen.

Schlussfolgerung

Es konnte eine 24h-Sequenz ermittelt werden, welche alle geforderten Bedingungen erfüllt, insbesondere belegen die gemachten Simulationsstudien, dass das Ergebnis des 24 h Testzyklus repräsentativ ist für die Performance des Systems über ein ganzes Jahr. Eine Veränderung der Schichtungseigenschaften des Speichers (vertikale Wärmeleitfähigkeit) wirkt sich auf das simulierte Test-Resultat in gleicher Weise aus wie auf das simulierte Jahresergebnis. Der Einfluss der Speichergrösse im Bereich von 0.5 – 1.2 m³ ist dabei vernachlässigbar gering.

Es wurde zudem ein einfaches Verfahren definiert für die Simulation und Emulation der Wärmepumpe (Zusatzheizung) und des Solarkreises, sowie das Verhalten von Warmwasser-Zapfungen und Raumheizung über den Testtag. Die Haupt-Kennzahlen welche aus dem Test resultieren sind die über die Entropiebilanz bestimmte Schichtungseffizienz des Speichers im engeren Sinne, sowie des Speichersystems inklusive Hydraulik. Zusätzlich können Warmwasser-Verhältnis sowie elektrischer Energiebedarf für Wärmepumpe und das gesamte System ermittelt werden, sowie die darauf basierenden Tagesarbeitszahlen.

Ausblick

Die Anwendung dieser neuen Testmethode und erste experimentelle Resultate aus Messungen an sechs verschiedenen Kombispeichern wird in einem zweiten Beitrag „Haberl et al. 2015: Experimentelle Untersuchung der Schichtungseffizienz – Kombispeicher auf dem Prüfstand“ am 25. Symposium Thermische Solarenergie erläutert.

Referenzen

- Haberl, R., Haller, M.Y., Frank, E., 2014. Solare Wärmepumpensysteme auf dem Prüfstand - Systemtests von 11 verschiedenen Systemen. In: 24. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 7.-9. Mai 2014, Bad Staffelstein, Germany.
- Haller, M.Y., Yazdanshenas, E., Andersen, E., Bales, C., Streicher, W. & Furbo, S., 2010. A method to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes independently from storage heat losses. *Solar Energy*, 84(6), p.997-1007.
- 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.Y., Haberl, R., Mojic, I., Frank, E., 2013. Solare Kombispeicher mit Wärmepumpen: Scheinbare Details entscheiden über die Performance! In: 23. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, Bad Staffelstein, Germany.
- Huhn, R., 2007. Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. PhD Thesis, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.
- VanBerkel, J., 1997. Thermocline Entrainment in Stratified Energy Stores. PhD Thesis, Technical University Eindhoven.
- Vogelsanger, P., 2002. The Concise Cycle Test Method – A Twelve Day System Test. IEA SHC Task 26 Technical Report.