

Die thermische Schichtung von Kombi-Wärmespeichern ist messbar – Ein Weg zur Zertifizierung der Schichtungseffizienz

Robert Haberl, Remo Waser, Michel Y. Haller
Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0) 55 222 48 32
E-Mail: robert.haberl@spf.ch
Internet: www.spf.ch

Einleitung

Kombispeicher können sowohl kostengünstiger (kompaktere Bauweise, nur eine Einheit muss installiert werden) als auch wesentlich energieeffizienter (weniger Wärmeverluste) sein als eine Lösung mit zwei getrennten Speichern. Die Schichtungseffizienz ist dabei eine entscheidende Grösse für den effizienten Betrieb von Systemen mit Kombispeicher. Insbesondere die Solarwärme, und in noch grösserem Masse die Wärmepumpe, reagieren sehr sensibel auf schlecht schichtende oder falsch eingebundene Speicher. Im Projekt SOL-HEAP (Haller et al. 2014) wurde gezeigt, dass die Schichtungseffizienz von Kombispeichern ein Schlüsselement für die Effizienz dieser Anlagen ist. Vor diesem Hintergrund wurde am Institut für Solartechnik SPF das Projekt StorEx durchgeführt, das sich umfassend mit der Simulation und Messung der Speicherschichtung befasste (Haller et al. 2015).

Das Projekt StorEx

Ziel dieses Projektes war die umfassende Erweiterung des Verständnisses von schichtungs-relevanten Parametern und Systemeinflüssen durch experimentelle und theoretische Untersuchungen der Schichtungseffizienz sensibler Wärmespeicher. Der Hauptfokus lag dabei auf der Bewertung der Schichtung mit einem geeigneten Prüfzyklus, sowie auf Untersuchungen zur Störung der Schichtung durch direkte Be- und Entladungen. Ein wesentlicher Teil dieses Projektes war die Entwicklung einer Testmethode für die Beurteilung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern.

Testmethode

Der Test basiert auf einem realistischen Tagesprofil für die Be- und Entladung des Speichers und einer Auswertung der dabei auftretenden Entropie- und Exergiebilanzen. Als „Key Performance Indicator“ wurde eine Schichtungseffizienz-Kennzahl eingeführt, welche beschreibt, wie gut der Speicher seine Aufgabe im Vergleich zu einem vollständig durchmischten Speicher (worst case) „erledigt“:

Formel 1

$$\text{Schichtungseffizienz} = 1 - \frac{\text{Entropieproduktion gemessen}}{\text{Entropieproduktion "worst case"}}$$

Diese Art der Berechnung einer Kennzahl für die Schichtungseffizienz wurde bereits in früheren Arbeiten vorgeschlagen (van Berkel 1997, Huhn 2007, Haller et al. 2010).

Das Testprofil wurde ermittelt mit den folgenden Randbedingungen:

- Das Testprofil soll einem realistischen Betrieb des Speichers über 24 h entsprechen.
- Während des Tests sollen Warmwasserbezug und Raumheizungsbedarf vorgegeben werden (Energie) und definierte Anforderungen an die Exergie erfüllen (Temperatur). Die Beladung des Speichers durch Wärmepumpe und Solarkollektoren soll über Simulation und Emulation dieser Komponenten erfolgen. Die Leistungs-Kennzahlen dieser Komponenten werden für alle Prüflinge gleich vorgegeben.
- Der Einfluss der Speicherschichtung auf den (simulierten) Endenergiebedarf in Form von elektrischer Energie für Wärmepumpe und System soll für das ganze Jahr repräsentativ sein.
- Reproduzierbarkeit: Ein zyklisches Durchlaufen des Testprofils sollte nach Einpendeln immer wieder dasselbe Ergebnisse aufzeigen (identischer Speicher-Zustand zu Anfang und Ende des 24 h Zyklus).

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 Vergleich möglich ist. Bei vielen Kombispeichern sind die Wärmeübertrager des Solarkreises und der Brauchwassererwärmung im Speicher integriert. Diese Wärmeübertrager führen jedoch zu vergleichbaren Auswirkungen auf die Schichtungseffizienz (Erhöhung der ΔT , Entropieproduktion beim Wärmeübergang) wie Mischungseffekte im Speicher. Deshalb müssen auch eventuell vorhandene externe Wärmeübertrager 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 Bilanzgrenze des Speichers 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 auch eine Speicher-System-Schichtungseffizienz berechnet. Die unterschiedlichen Systemgrenzen dafür sind in Abbildung 1 dargestellt.

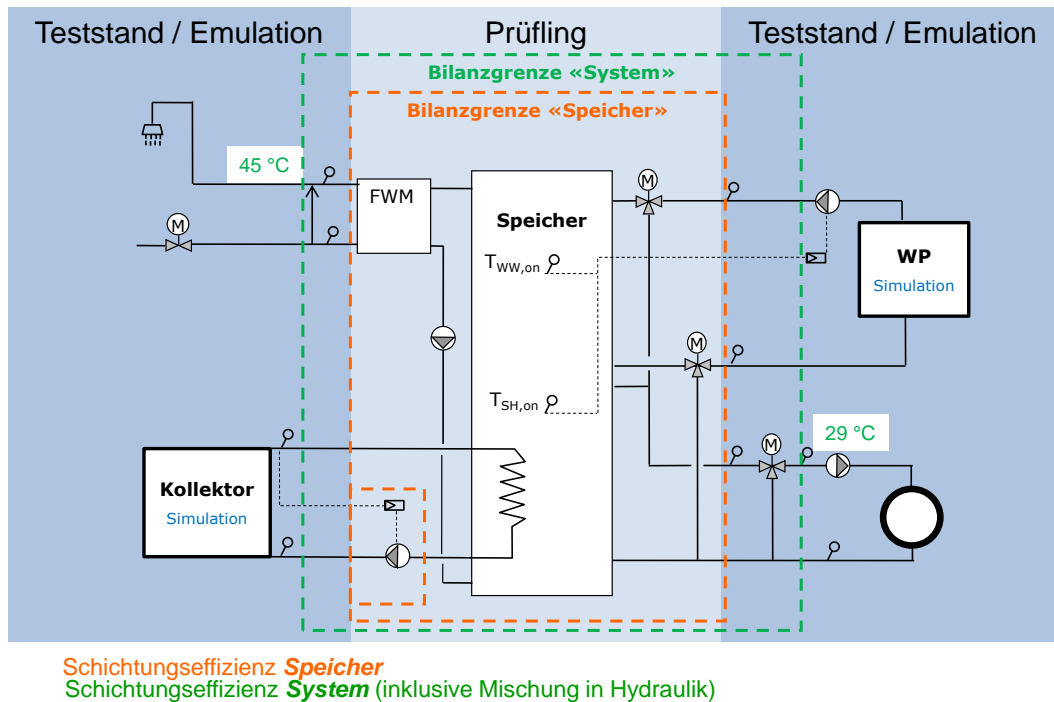


Abbildung 1: Beispielschema eines Kombispeichers im Speicherschichtungstest. Die Schichtungseffizienz wird für den Speicher und das Speichersystem ermittelt.

Testergebnisse

Im Projekt StorEx wurde mithilfe dieser Testmethode die Schichtungseffizienz von insgesamt 6 verschiedenen Kombispeichern bestimmt, wobei die Speicher verschiedene Konzepte zur Einbindung der Wärmepumpe und der solarthermischen Kollektoren sowie zur Warmwasserbereitung verfolgten. Die Prüfung wurde für jeden Speicher mit unterschiedlich starken Wärmepumpen sowie mit und ohne die Vorgabe von Zeitfenstern für die Warmwasserbereitung durchgeführt.

Als wichtigstes Ergebnis konnte gezeigt werden, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Strombedarf zur Deckung der Last für Raumheizung und Warmwasserbereitung und der Schichtungseffizienz des Speichers besteht (vgl. Abbildung 2). Für die angenommen Heizlast (3450 kWh Warmwasser und 8000 kWh Raumwärme mit Vor-/Rücklauf-temperatur bei Auslegung von 35/30 °C) hat eine Reduktion der Schichtungseffizienz um 10 % eine Steigerung des elektrischen Energiebedarfs für die Wärmepumpen-Zusatzheizung um 16 % (413 kWh_{el}/a) zur Folge. In einer Simulationsstudie wurde auch der Einfluss der Speicherschichtung auf die Kombination von Kombispeichern mit Heizkesseln untersucht. Dabei zeigte sich, dass bei Verwendung einer kondensierenden Gastherme anstelle der Wärmepumpe eine 10 % tiefere Schichtungseffizienz einen Mehrverbrauch an Erdgas von 4 % verursacht, bei einem Pelletskessel mit Rücklauf-Hochhaltung steigt der Pelletsbedarf um ca. 2 %.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Messungen mit einer 8 kW Wärmepumpe in einem Boxplot dargestellt. 50 % aller erzielten Resultate liegen innerhalb der gezeigten Box. Die Unterteilung der Box zeigt den Medianwert. Die sogenannten Whisker (Antennen) zeigen die kleinsten bzw. die grössten Werte aus der gesamten Serie. Aus dieser Grafik wird deutlich, wie gross die Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen sind. Besonders auffällig ist der enorme Unterschied zwischen den Messungen mit und ohne die Vorgabe von Zeitfenstern zur Warmwasserbereitung. Das schlechteste Ergebnis mit Vorgabe von Zeitfenstern ist noch besser als das beste Ergebnis, das ohne die Vorgabe von Zeitfenstern erzielt wurde.

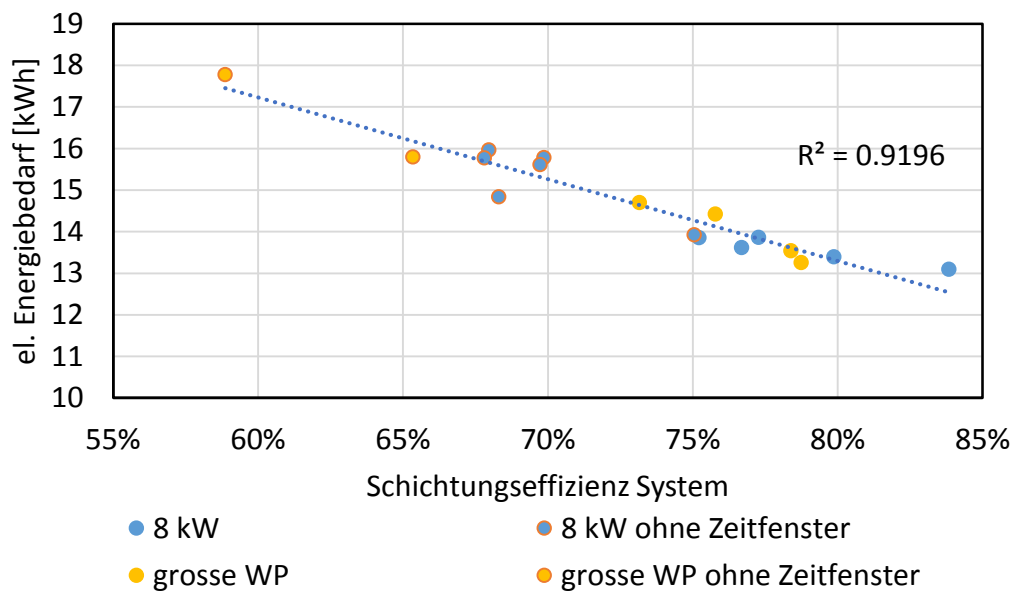


Abbildung 2: Abhängigkeit des el. Energiebedarfs des Gesamtsystems von der Schichtungseffizienz des Speichers.

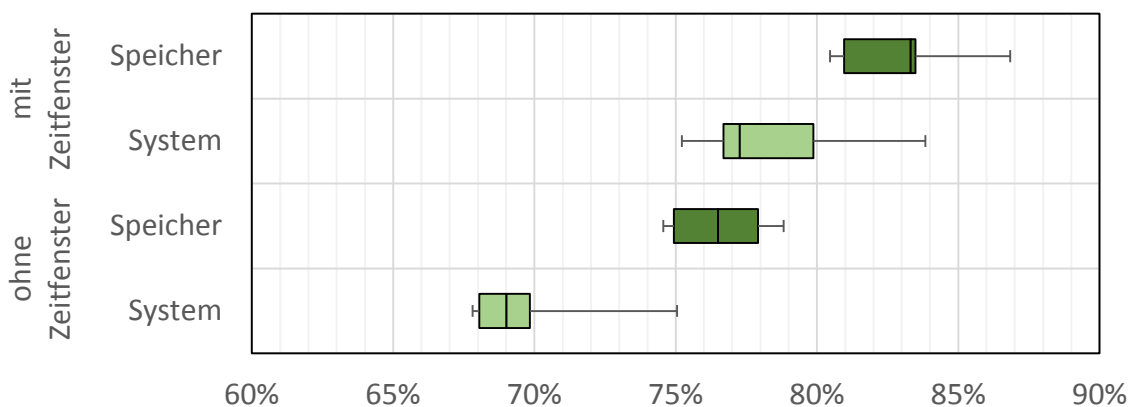


Abbildung 3: Boxplot der Messungen im Projekt StorEx mit einer 8 kW Wärmepumpe. Die Ergebnisse sind geordnet nach der Bilanzgrenze (Speicher und System), sowie mit und ohne die Vorgabe von Zeitfenstern für die WW-Bereitung.

Mithilfe der Prüfmethode können auch die thermischen Verluste des Speichers inklusive der Hydraulik an die Umgebung ermittelt werden. Da die Last für Warmwasser und Raumheizung im Test vordefiniert ist können erhöhte Wärmeverluste von Speicher und zugehöriger Hydraulik nur durch die Wärmepumpe oder effizientere Solarwärme-Nutzung kompensiert werden. Deshalb verwundert es auch nicht, dass die Wärmelieferung der Wärmepumpe mit den Wärmeverlusten korreliert (vgl. Abbildung 4). Durch das Mehr an Wärmelieferung benötigt die Wärmepumpe zwangsläufig auch mehr elektrische Energie. Aber:

Der Gesamt-Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe korreliert NICHT mit den Wärmeverlusten des Systems.

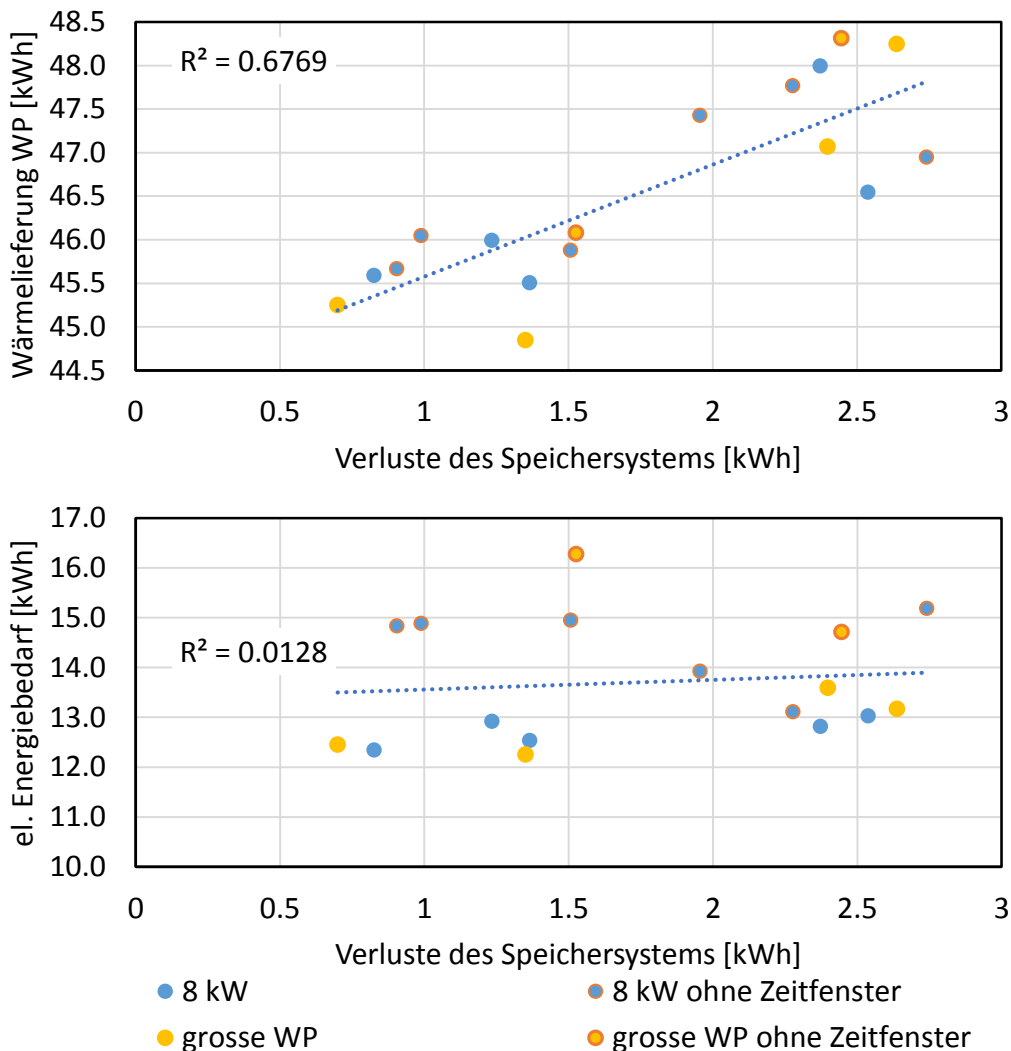


Abbildung 4: Wärmelieferung und el. Energiebedarf der Wärmepumpe gegenüber den thermischen Verlusten der Speichersysteme.

Factsheets

Um den Herstellern einen unabhängigen Ausweis über die Schichtungseffizienz ihrer Speicher-Lösungen in die Hand zu geben, werden die gemessenen Resultate in einem sogenannten Factsheet zusammengefasst und auf der Homepage des SPF publiziert: <http://www.spf.ch/Speicherschichtung.306.0.html>

In diesem zweiseitigen Dokument sind alle Informationen enthalten, um den Speicher und dessen Einbindung in das Heizsystem eindeutig zu beschreiben: Neben der genauen Typenbezeichnung und Angaben zum Hersteller wird auch ein vereinfachtes Hydraulikschema der Einbindung im Test gezeigt. In diesem Schema sind die Belegung der Anschlüsse, allfällige Umschaltventile sowie alle Pumpen und Wärmeübertrager eingezeichnet. Die zur Regelung des Systems verwendeten Temperaturfühler werden mit Angabe zur Position (Höhe) und den Sollwerten (Ein- und Ausschaltbedingungen) beschrieben.

Als Ergebnis der Messungen wird nur die Schichtungseffizienz mit den Bilanzierungsgrenzen Speicher und System unter den geprüften Rahmenbedingungen gezeigt. Die ausschlaggebende Grösse ist die System-Schichtungseffizienz. Deshalb wird das Ergebnis nach dieser Grösse in einem Farbschema von Grün (Systemschichtungseffizienz $\geq 80\%$) bis Rot (Systemschichtungseffizienz $< 55\%$) dargestellt (vgl. Abbildung 5). Pro Speicher werden meist mehrere Messungen durchgeführt. Im Factsheet werden immer alle Resultate gezeigt, wobei in der Beschreibung der Rahmenbedingungen auch der Massenstrom der Wärmepumpe deklariert wird. Damit kann die Eignung des Speichers für verschiedene Massenströme beurteilt werden.

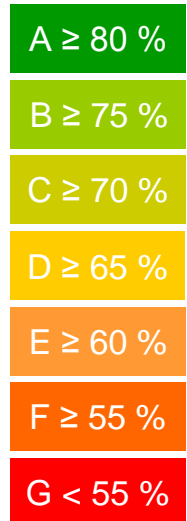


Abbildung 5:
Einteilung der
Ergebnisse.

Energieverbrauchende und energieverbrauchsrelevante Produkte (ErP)

Innerhalb der Europäischen Union müssen Wärmeerzeuger und Speicher ab September 2015 bestimmte Anforderungen an die Energieeffizienz erfüllen – das verlangt eine Umsetzung der sogenannten Ökodesign-Richtlinie für energieverbrauchende und energieverbrauchsrelevante Produkte (ErP, EU 2013).

Die europaweite Verordnung gilt für Öl- und Gas-Heizkessel, Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke und Speicher. Darüber hinaus müssen Produkte und Systeme mit einer Leistung bis 70 kW mit einem Energieeffizienzlabel gekennzeichnet werden, das man von Elektrogeräten wie Waschmaschinen, Kühlschränken, Wäschetrocknern oder Fernsehgeräten kennt. So können Verbraucher anhand der unterschiedlichen Farben und Buchstaben auf einen Blick die Energieeffizienz der Produkte erkennen.

Der Kombispeicher ist ein zentrales Element von Heizsystemen und wird insbesondere bei der Verwendung von solarthermischen Anlagen gerne eingesetzt. Gemäss heute vorliegenden ErP-Richtlinien werden für die Beurteilung der Effizienz des Speichers allerdings nur dessen Wärmeverluste verwendet, die Schichtungseffizienz wird nicht berücksichtigt. Unsere Arbeiten zeigen, dass die Speicherschichtung für wichtige Systeme und Anwendungen die System-Effizienz weit entscheidender beeinflusst als die Wärmeverluste.

Zertifizierung

Auf Grund der grossen Bedeutung der Schichtungseffizienz für die Systemeffizienz schlägt das SPF vor, dass Methoden zur Messung der Schichtungseffizienz auch Eingang finden in die Europäische Normierung.

Die Beschreibung der hier präsentierten Prüfmethode erfolgte innerhalb des Abschlussberichtes im Projekt StorEx (Haller et al. 2014). Dieser Bericht, und damit alle nötigen Informationen zur Umsetzung der Prüfmethode sind allgemein zugänglich. Entsprechend könnten bereits jetzt verschiedene Institute die Prüfmethode mit identischen Ergebnissen anwenden. Eine Publikation in Englisch ist in Vorbereitung.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt StorEx wurde eine Methode entwickelt um die Schichtungseffizienz von Kombispeichern zu ermitteln. Die Ergebnisse, die durch den Einsatz dieser Methode erhalten werden, zeigen eine in der Praxis relevante Kennzahl die bis dato noch nie mit dynamischen und realitätsnahen Testprofilen ermittelt werden konnte. Die Methode erreichte mit relativ einfachen Mitteln eine sehr gute Wiederholbarkeit.

Bei den Mess-Ergebnissen zeigt sich unter anderem:

- Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zw. der Schichtungseffizienz des Speichersystems und dem (simulierten) el. Bedarf der im Teststand emulierten Wärmepumpe.
- Die Schichtungseffizienz ist bei den untersuchten Systemen deutlich entscheidender für die Gesamt-Energieeffizienz als die Wärmeverluste.
- Ein Speicher, der unter Standardbedingungen eine gute Schichtung zeigt, tut dies nicht zwangsläufig unter anderen Rahmenbedingungen (zum Beispiel ohne Zeitfenster / mit grösserer Wärmepumpe).

Wegen der grossen Bedeutung der Schichtungseffizienz für die Systemeffizienz wäre es zu begrüessen, wenn die Schichtungseffizienz auch in die Europäische Normierung mit aufgenommen werden könnte, so dass der entsprechende „key performance indicator“ bei einer Überarbeitung der ErP-Richtlinien mit einbezogen werden kann.

Referenzen

- van Berkel, J., 1997. Thermocline Entrainment in Stratified Energy Stores. PhD Thesis, Technical University Eindhoven.
- Commission Delegated Regulation (EU) No 812/2013 of 18 February 2013 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labelling of water heaters, hot water storage tanks and packages of water heater and solar device - OJ L 239, 06.09.2013, p. 83–135.
- Haberl, R., Reber, A., Persdorf, P., Haller, M.Y., 2015. Experimentelle Untersuchung der Schichtungseffizienz - Kombispeicher auf dem Prüfstand. In: 25. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 6.–8. Mai 2015, 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.Y., Haberl, R., Carbonell, D., Philippen, D. & Frank, E., 2014. SOL-HEAP - Solar and Heat Pump Combisystems. Report Contract number SI/500494-02, Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil, Schweiz.
- Haller, M.Y., Haberl, R., Persdorf, P., Reber, A., 2015. StorEx - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern. Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE, Bern, Schweiz.
- Huhn, R., 2007. Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. PhD Thesis, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.
- Persdorf, P., Haberl, R., Reber, A., Haller, M.Y., 2015. Experimentelle Untersuchung der Schichtungseffizienz - Entwicklung einer Testmethode. In: 25. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 6.-8. Mai 2015, Bad Staffelstein, Germany.