

Experimentelle und numerische Untersuchungen von eingetauchten Wärmeübertragern zur Be- und Entladung von Warmwasserspeichern

William Logie, Andreas Reber, Elimar Frank, Michel Haller

SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil, Schweiz

william.logie@solarenergy.ch, +41 55 222 4834

Einleitung

Die Wahl der richtigen Konstruktions- und Dimensionierungsparameter für eingetauchte Wärmeüberträger (engl. Immersed Heat Exchanger - IHX) ist von zentraler Bedeutung für die Be- und Entladung von Warmwasserspeichern (engl. Thermal Energy Storages - TES). Vor allem bei der Beladung mittels solarthermischen Kollektoren treten stark variierende Beladezustände auf, welche die Bestimmung der optimalen Geometrie und Dimensionierung des IHX zu einem komplexen Problem machen. Üblicherweise werden hierzu semi-empirische Auslegungsformeln verwendet, die auf ältere Untersuchungen an horizontal gewickelten IHX zurückgehen[1]. Die hier vorgestellten Arbeiten bieten die Grundlage zu Untersuchungen welche zeigen sollen, inwiefern diese Faustformeln auf die inzwischen weiterentwickelten Modelle und Betriebsbedingungen von Warmwasserspeichern noch zutreffen.

Für eine effiziente Nutzung der im Kollektor umgewandelten Solarenergie sind einerseits ein gutes Wärmeübertragungsvermögen des IHX und andererseits eine gute Einschichtung in den Speicher entscheidend. Beide Effekte werden sowohl von der Übertragungsfläche, dem IHX-Material wie auch von den geometrischen Parametern der eingetauchten Wärmeübertrager beeinflusst. Messerschmid [2] zeigt, dass bei ungünstiger Wahl der geometrischen Parameter die Übertragungsfläche nicht mehr optimal genutzt wird. Hier liegt ein noch zu quantifizierendes Optimierungspotenzial. Ferner hängt die Bestimmung der geeigneten Übertragungsfläche vom Systemkonzept und der Systemdimensionierung ab. Die verbreiteten Faustformeln [3] für die Bestimmung der Wärmeübertragungsfläche in Abhängigkeit der Kollektorfläche bedürfen angesichts der Entwicklungen und Veränderungen vieler solarthermischer Systemkonzepte in den letzten zehn Jahren einer erneuten Überprüfung. Anhand moderner optischer Messmethoden (Particle Imaging Velocimetry - PIV und Laser Induzierte Fluoreszenz - LIV) können heute die Strömungsvorgänge in Wasserspeichern auch besser quantifiziert werden.

Marktrecherche und Referenzsystem

In der ersten Phase der hier präsentierten Untersuchungen standen marktübliche Trinkwasserspeicher für solarthermische Systeme im Vordergrund. Zunächst wurde eine Marktrecherche durchgeführt, im Rahmen derer die Geometrieparameter für etwa 50 Speicher mit Volumina (V_{TES}) zwischen 350 und 450 Litern zusammengefasst wurden [4]. Daraus ließ sich unter anderem das Verhältnis von Kollektor- und IHX-Fläche bestimmen (siehe **Abbildung 1**).

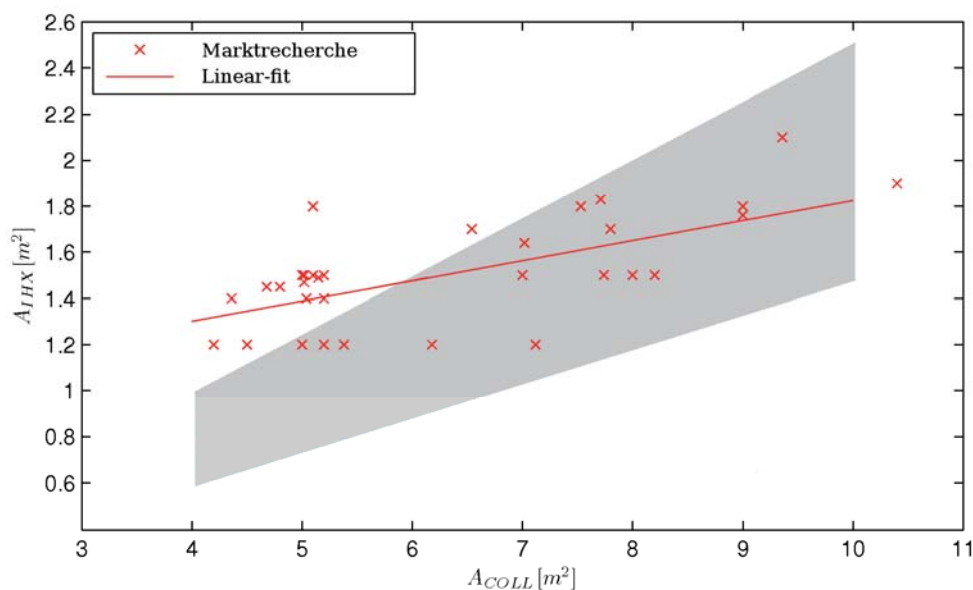


Abbildung 1: IHX-Oberfläche (A_{IHx}) über Kollektorfläche (A_{Coll}) aus der Marktrecherche (grau hinterlegt sind die A_{IHx} -Dimensionierungs-Empfehlungen von DGS [5] und BFE [3] bei 700 W/m^2 und IHX-Temperaturspannung von 10 bis 15K).

Um die für eine Optimierung der IHX-Geometrieparameter entscheidenden Betriebszustände des Systems zu identifizieren, wurden mit einem TRNSYS-Referenzsystem Jahressimulationen (zunächst für ein Solares Warmwasser-System mit nicht spezifizierte Zusatzheizung) mit zwei unterschiedlichen Kollektordurchflussraten durchgeführt (High Flow $50 \text{ kg/m}^2_{\text{Koll/h}}$ und Low Flow $10 \text{ kg/m}^2_{\text{Koll/h}}$). Die Resultierende Häufigkeitsverteilung der Belade-Leistungen und –Temperaturen wurde in [4] präsentiert. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Definition der in dieser Arbeit untersuchten Beladevorgänge über den eingetauchten Solar-Wärmetauscher.

Experimente

Die grosse Bandbreite an Beladungs-Leistungen wurde für die Versuchsreihen auf zwei charakteristische Betriebssituationen mit Beladungs-Solleistungen von 1000

und 2000 W reduziert. Für die Auswahl dieser Betriebsbedingungen war deren Bedeutung für den jährlichen solaren Energieeintrag entscheidend [4]. Die beiden Betriebskonzepte mit einem Massenstrom von 350 kg/h (HighFlow) bzw. 70 kg/h (LowFlow) wurden mit einem mittleren Wert von 200 kg/h ergänzt, um allfällige Tendenzen in Abhängigkeit des Durchflusses besser aufzeigen zu können.

Analog zur Grösse des Referenzsystems aus den TRNSYS-Jahressimulationen wurde ein zylindrischer Wärmespeicher aus Edelstahl mit einem Volumen von 400 Litern und optischen Zugängen für die PIV- und LIF-Aufnahmen sowie umfangreichen Variationsmöglichkeiten für Anschlüsse und kalorimetrische Messungen gefertigt und im Prüfstand aufgebaut. Die Messreihen wurden vollautomatisch durchgeführt, um gleichbleibende Bedingungen (Beladungsleistung, Durchfluss, Beladungs-Start und –Ende) gewährleisten zu können. Für den Beladungsstart wurde der TES-Inhalt auf homogene 20 °C vorkonditioniert. Die Beladung des Wärmespeichers erfolgte mit konstanter Beladeleistung und wurde in festgelegten, regelmässigen Abständen unterbrochen, um auch instationäre Beladungsbedingungen beobachten zu können. Abgeschlossen war die Messreihe dann, wenn das Ausschaltkriterium von 55 °C, gemessen auf der Höhe des TES-Temperaturfühlers $T_{TES,7}$ erreicht wurde (siehe **Abbildung 3**).

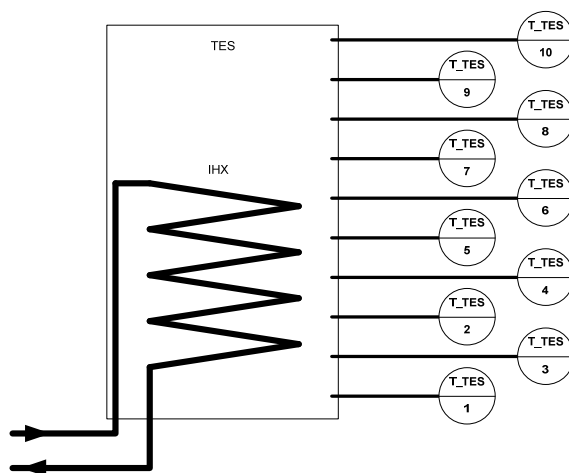


Abbildung 2: IHX in TES mit TES-Temperaturfühlern 1 bis 10

Ausgewählte Resultate

Vorerst wurden die Messreihen an einem ersten IHX-Probanden durchgeführt. Dabei wurden anhand von kalorimetrischen Messungen der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des IHX sowie die Schichtungseffizienz im TES während des Beladungsvorgangs bestimmt. Bei höheren Massenströmen wurde bei gleicher Beladungsleistung ein grösserer U-Wert beobachtet. Während der U-Wert mit zunehmendem

Durchfluss steigt, war bei gleichbleibender Beladungsleistung eine weniger ausgeprägte Schichtung auszumachen, was im TES-Temperaturprofil in **Abbildung 3** visualisiert ist.

Um die Schichtungseffizienz des Beladevorgangs bewerten zu können wurde die in [7] beschriebene Schichtungseffizienz berechnet, welche auf der relativen Entropieproduktion des Beladevorgangs im Vergleich zu einem vollständig durchmischten, direkt beladenen Speicher basiert. **Tabelle 1** zeigt, dass im Falle des hier untersuchten IHX mit dieser Methode negative Schichtungseffizienten resultieren können. Dies bedeutet, dass die Entropieproduktion in diesen Fällen höher ausfällt als im Falle eines vollständig durchmischten, jedoch direkt beladenen Speichers. Man kann hier also eher von einem Durchmischungsfaktor > 1 sprechen als von einer Schichtungseffizienz. Erklärt werden können diese Resultate mit der bei der Wärmeübertragung im IHX zwangsläufig produzierten Entropie, welche zusätzlich zur anschliessenden Durchmischung von Fluid im Speicher mit bilanziert wird.

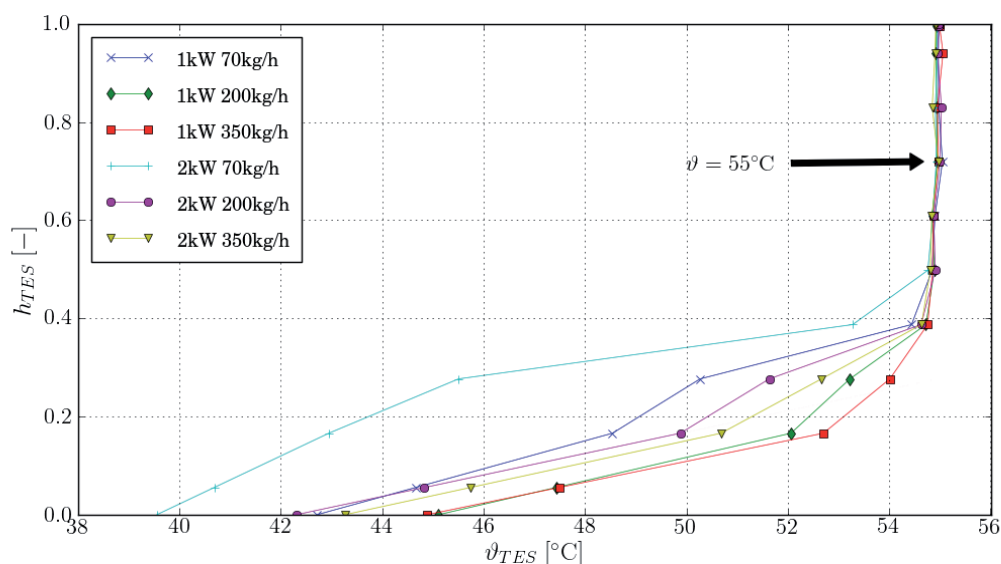


Abbildung 3: TES-Temperaturprofil mit Ausschaltkriterium (55°C) der Messreihen (h_{TES} = relative TES-Höhe)

Abbildung 4 zeigt, dass bei der Beladung eines TES mit LowFlow mehr Entropie erzeugt wird als bei HighFlow, was vermutlich auf die höhere Eintrittstemperatur in den Speicher, respektive die grössere Temperaturdifferenz über den IHX zurückzuführen ist. Im Vergleich zu einem vollständig durchmischten Speicher, der mit gleicher Eintrittstemperatur beladen wird, findet jedoch im TES weniger Durchmischung statt, was insgesamt zu einer besseren Schichtungseffizienz führt (**Tabelle 1**). Dies hat zur Folge, dass weniger Beladungsenergie (Beladungs-Enthalpie) benötigt wird, um das Ausschaltkriterium zu erreichen.

Tabelle 1: Energiebilanz, Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) bezogen auf die IHX-Rohraussenfläche und TES-Schichtungseffizienz des untersuchten IHX für drei Massenströme mit je zwei Beladeleistungen

Mittlerer Beladungs-Massenstrom [kg/h]	70.2	70.9	200.1	200.0	345.4	350.2
Mittlere Beladungsleistung IHX [W]	989	2009	1011	2059	1039	2096
Beladungs-Enthalpie IHX [kJ]	80'000	63'700	84'700	69'000	83'900	70'200
Enthalpie-Änderung TES [kJ]	57'800	56'300	60'100	59'800	60'100	61'000
Verluste TES [kJ]	22'200	7'400	24'600	9'200	23'800	9'200
Beladungszeit [h]	22.7	9.2	23.4	9.5	22.6	9.5
U-Wert IHX [W/m ² /K]	89.7	104.9	113.3	132.0	129.5	153.2
Schichtungseffizienz [-]	0.16	0.10	-0.36	-0.27	-0.96	-0.67

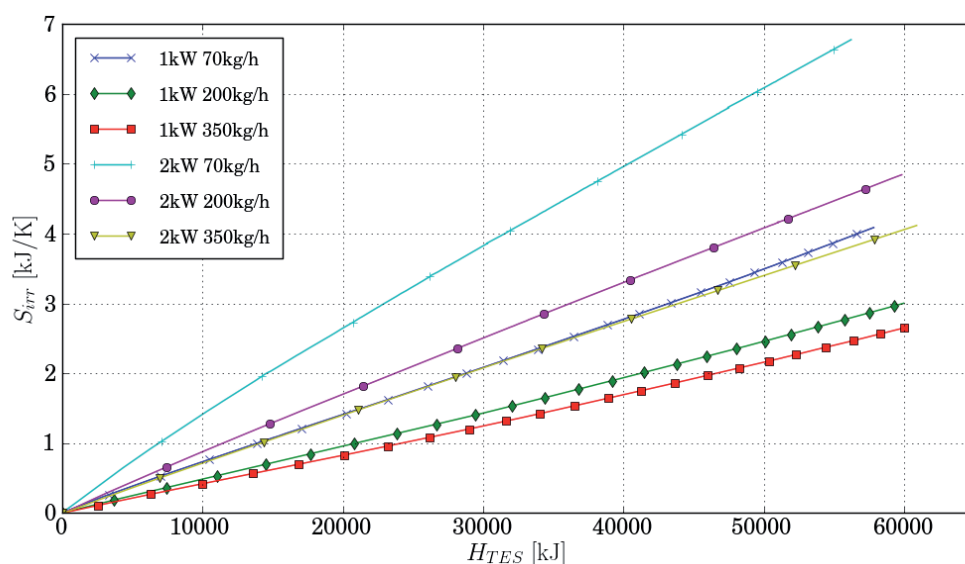


Abbildung 4: Entropie-Erzeugung über Enthalpie des TES (Markierungsintervall entspricht Zeitdifferenz von 1h)

Ein Durchschnitt aller PIV Bilder (siehe **Abbildung 5**), die während einer jeweiligen Messung genommen wurden bestätigt, dass bei LowFlow infolge kleinerer Strömungsgeschwindigkeiten (weniger konvektive Wärmeübertragung) weniger Durchmischung im Speicher stattfindet.

Ausblick

Nach weiteren experimentellen Untersuchungen an unterschiedlichen IHX-Probanden im Labor werden anhand der PIV- und LIF-Bilder sowie den kalorimetrischen Messdaten Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulationen validiert, die im

Anschluss eine rechnerische Optimierung der Geometrieparameter und der Auslegung ermöglichen sollen.

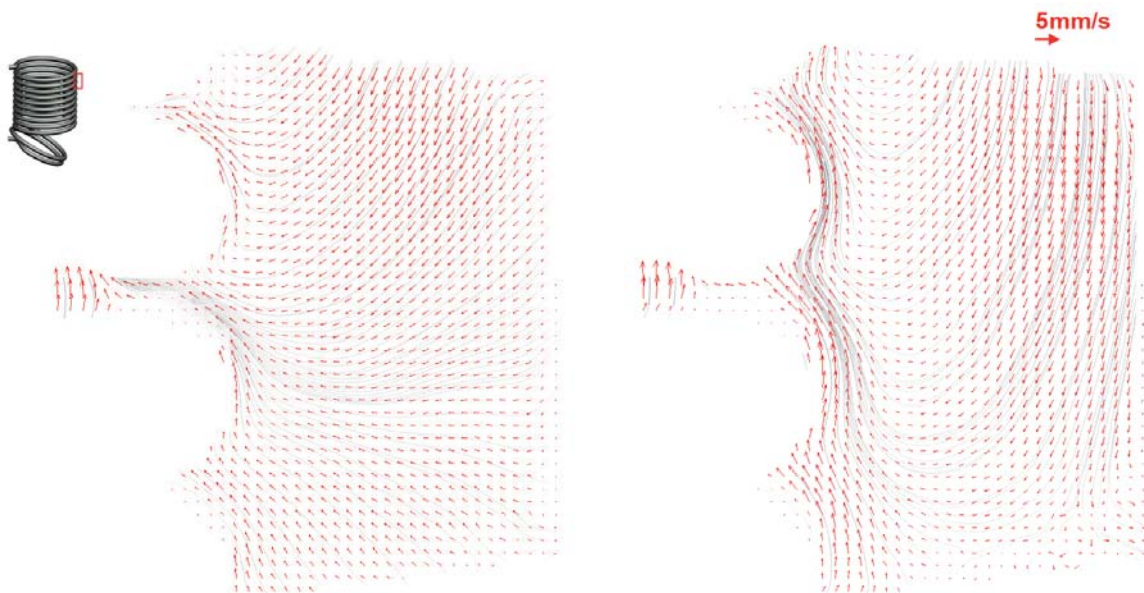


Abbildung 5: Mittlere PIV-Strömungsvektoren von LowFlow (70kg/h - links) und HighFlow (350kg/h - rechts) über den gesamten Beladungsvorgang (jeweils 2kW) an einer ausgewählten IHX-Position

Bibliographie

- [1] R. Kübler, "Warmwasserspeicher - Wärmezufuhr und Gütekriterien," Uni Stuttgart, Abschlußbericht 1988.
- [2] H. Messerschmid, "Entwicklung und Validation eines numerischen Verfahrens zur Beurteilung von Trinkwasserspeichern," PhD Thesis 2002.
- [3] Bundesamt für Energie, Dimensionierung von Sonnenkollektoranlagen, 2001.
- [4] W. R. Logie and E. Frank, "Potential improvement in the design of immersed coil heat exchangers," in *ISES Solar World Congress*, Johannesburg, 2009, pp. 717-716.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, "Dimensionierung von Anlagen zur Warmwasserbereitung," in *Solarthermische Anlagen*. Berlin: Landesverband Berlin e. V.; Landesverband Hamburg e. V., 2004, pp. Abschnitt 5 - p23.
- [7] M. Y. Haller et al., "A method to determine stratification efficiency of thermal storage process independently from storage heat losses," *Solar Energy*, Accepted for publication.