



STRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN AN SCHICHTSPEICHERN UND WÄRMETAUSCHERN

Jahresbericht 2007

Autor und Koautoren	E. Frank, W. Logie, A. Luzzi
beauftragte Institution	SPF Institut für Solartechnik HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Adresse	Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Telefon, E-mail, Internetadresse	+41552224823, info@solarenergy.ch, www.solarenergy.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	102340/152949
BFE-Projektleiter	Jean-Christophe Hadorn
Dauer des Projekts (von – bis)	01.10.2007 – 01.07.2008
Datum	15.12.2007

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Projektes ist es, *particle image velocimetry* (PIV) bei der Untersuchung von Schichtspeichern und Wärmetauschern so zu adaptieren und einzusetzen, dass Strömungsfelder aufgenommen werden können, die eine (zunächst) qualitative Bewertung der Schichtung und Wärmeeinspeisung bei Be- und Entladevorgängen von Solarspeichern ermöglicht. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Betrachtung eingetauchter Wärmeübertrager und von Tank in Tank-Systemen, wie sie in handelsüblichen Kombispeichern angeboten werden.

Weltweit wird eine Vielzahl unterschiedlicher Designs von Warmwasserspeichern angeboten, die sich insbesondere betreffend der Integration von eingetauchten Wärmeübertragern (eWT) teilweise erheblich unterscheiden. Der Einfluss der geometrischen Parameter von eWT auf die tankinterne Strömung ist jedoch weitgehend unklar und soll anhand von PIV eingehend untersucht werden.

Die Untersuchung von Tank in Tank-Systemen soll die Bewertung möglicher Schichtzerstörungen bei Be- und Entladevorgängen des Speichers erlauben. Dazu wurden bisher der experimentelle Aufbau vorbereitet sowie eine Literaturübersicht und eine Marktrecherche zu Tank in Tank-Kombispeichern erstellt. Die Messungen an ausgewählten Einbauten sollen Mitte Februar beginnen, wenn die PIV-Messungen am Parallelprojekt mit eingetauchten Wärmeübertragern abgeschlossen sind.

Projektziele

Die Mehrheit der Warmwasserspeicher im Ein- und Mehrfamilienhausbereich ist mit einem eingetauchten Wärmetauscher (eWT) für die Ankopplung des Kollektors versehen, vgl. [10] und [19]. Dabei handelt es sich im Bereich von Trinkwasserspeichern überwiegend um Glattwendelrohre. Das thermische Verhalten wurde bislang überwiegend wenig detailliert und experimentell jeweils nur an einzelnen Modellen mit festgelegtem Design untersucht, vgl. z.B. [1]. Vor diesem Hintergrund sollen im vorliegenden Projekt die für die Strömungsverhältnisse und den resultierenden Wärmeübergang entscheidenden Designparameter ermittelt und anhand systematischer Experimente variiert werden.

Im Solarthermie-Bereich werden bei Kombispeichern zur Trinkwassererwärmung Tank in Tank-Systeme verwendet. Dabei werden kommerziell erhältliche Tank in Tank-Kombispeicher häufig von den Herstellern als spezielle und besonders effiziente Entwicklung gelobt. Eine wissenschaftliche Basis, um den Vorteil des einzelnen Produktes zu belegen, fehlt jedoch meist. Vor allem bei grösseren Zapfungen ist jedoch zu erwarten, dass abhängig vom speziellen Design durch auftretende Wirbelbildung der Speicherinhalt teilweise oder vollständig durchmischt wird, was sich nachteilig auf den Solarertrag auswirkt. Die Einflüsse der thermischen Leitfähigkeit des Innentanks sowie der Zapfleistungen auf die thermische Schichtung im Speicher sind bislang mangels geeigneter Methoden noch nicht eingehend untersucht worden. Ganz allgemein scheint relativ wenig belegtes Wissen zu den Vor- oder Nachteilen der unterschiedlichen Ausgestaltungen der Tank in Tank-Systeme vorhanden zu sein (vgl. Abschnitt Literaturüberblick).

„Particle Image Velocimetry“ (PIV) erlaubt die berührungslose optische Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern. Ziel des Projektes ist es, PIV bei der Untersuchung von Tank in Tank-Speichern so zu adaptieren und einzusetzen, dass Strömungsfelder aufgenommen werden können, die eine (zunächst) qualitative Bewertung möglicher Schichtzerstörungen bei Be- und Entladevorgängen des Speichers erlauben. Dadurch soll ein wichtiger Beitrag zur Optimierung von Design und Betrieb heutiger Wasserspeichertechnologien geleistet werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Installation und Inbetriebnahme des PIV Systems sowie experimenteller Aufbau

Per Anfang 2007 wurde ein PIV-System angeschafft (Particle Image Velocimetry), das aus einem doppelt gepulsten NdYAG-Laser und zwei CCD-Kameras für stereo-PIV sowie dem entsprechenden Zubehör (Kalibriereinrichtung, Software für pre- und postprocessing, Schienensystem für 3-dimensionale Aufnahmen etc.) besteht. Für 2007 waren erste Versuche mit dem PIV System geplant. Vorwiegend sollte die Methode nach ausgiebiger Einarbeitung zunächst dazu genutzt werden, Strömungsvorgänge bei in Wasserspeichern eingebauten Objekten (eingetauchte Wärmetauscher und Tank in Tank-Systeme) zu erfassen und daraus entsprechende Empfehlungen abzuleiten. Die PIV-Methode eignet sich darüber hinaus zur Anwendung in Kombination mit Computational Fluid Dynamics (CFD). Mittels PIV werden Messungen durchgeführt, die beispielsweise dazu dienen, CFD-Simulationen zu validieren.

Die Einarbeitung erfolgte anhand von Einführungen des Herstellers am SPF (Februar und Oktober 2007) sowie eines Intensivkurses des Herstellers in Göttingen (November 2007). Zusätzlich wurden von einem Projektmitarbeiter spezielle Vorlesungen an der ETH Zürich belegt.

Für das hier dokumentierte Projekt wird ein speziell dafür konstruierter, bis zu 300 Litern fassender Vollglas-Speicher mit teilweise oder komplett aufsetzbarer Wärmedämmung eingesetzt. Da PIV-Untersuchungen an derart grossen Objekten mit mehreren optischen Übergängen eher unüblich sind, mussten verschiedene Adaptionen der Methode vorgenommen werden, die detaillierter in [22] beschrieben werden. Dort wird auch näher auf die Kalibrierung sowie erste Vergleichsuntersuchungen an einem horizontalen, in einen gefüllten Speicher eingetauchten und heiss durchströmten Rohr dargestellt.

Die Auswahl der zu untersuchenden Tank in Tank-Designs erfolgt auf Basis einer Marktrecherche (s.u.). Die Planung des genauen Aufbaus und der Durchführung der Experimente sind noch nicht abgeschlossen, da derzeit noch Experimente mit eingetauchten

Wärmeübertragern durchgeführt werden. Die dort aufgetretenen Schwierigkeiten und Einschränkungen der Methode (Reflexionen und Lichtbrechungen, Geometrie etc.) können jedoch auf das hier beschriebene Projekt übertragen und die jeweiligen Lösungsansätze verwendet werden. Grundsätzlich muss noch entschieden werden, ob eher handelsübliche Tank in Tank von Schweizer Herstellern bestellt oder eigene Versuchsobjekte eigens hergestellt werden. Die Messungen sollen etwa ab Mitte Februar 2008 durchgeführt werden, da vorher die Messungen mit eingetauchten Wärmeübertragern (s.o.) abgeschlossen werden sollen.

Literaturstudien und Marktrecherchen

In einer umfangreichen Literaturstudie zu eWT (z.B. [1] bis [7]) wurden sowohl die thermodynamischen Vorgänge am eWT wie auch bisherige Experimente eingehend studiert. Hierzu gehört auch der Einbezug von Kenngrössen, die eine Bewertung der *performance* von Speichern und eine Charakterisierung der Speicherschichtung erlauben (Be- und Entladeeffizienz, exergetische Effizienz, etc.) Als für die vorliegenden Untersuchungen entscheidender Designparameter hat sich dabei das Verhältnis von dem Abstand der Rohrwendelebenen p zum Rohrdurchmesser d erwiesen, vgl. Abb. 1.

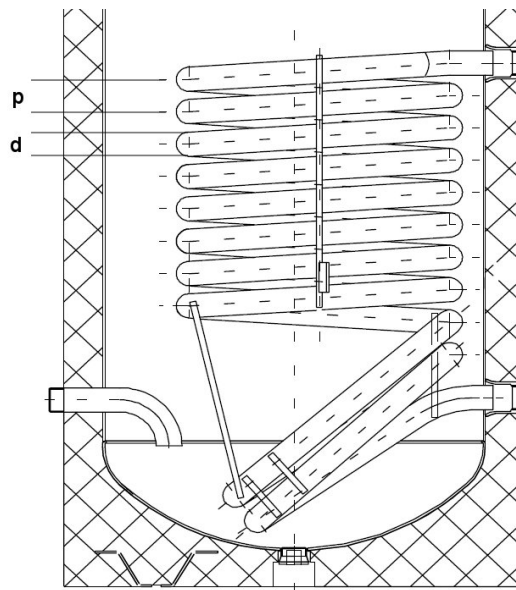


Abbildung 1: Eingetauchter Wärmetauscher und die für die Strömungsverhältnisse entscheidenden Designparameter p (Abstand der Rohrwendelebenen) und d (Rohrdurchmesser)

Anhand einer stichprobenartigen Marktrecherche zu Trinkwarmwasserspeichern für Solaranlagen wurde festgestellt, dass das Verhältnis p/d in einem verhältnismässig grossen Bereich variiert (etwa zwischen 0.5 und 1.5), so dass nach den Aussagen in der genannten Literatur davon ausgegangen werden muss, dass sich hier sehr unterschiedliche Strömungsverhältnisse und demzufolge auch (bei gleicher Oberfläche) unterschiedliche (über den gesamten Wärmeübertrager gemittelte) Wärmeübergangskoeffizienten einstellen. Anhand der Experimente soll dies nun belegt werden.

In [8] werden die aktuellen prinzipiellen Wasserspeicherkonzepte für Solaranlagen aufgezeigt, die sowohl für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser wie auch zur Raumheizungsunterstützung eingesetzt werden und entweder neu installiert oder in bereits existierende Systeme integriert werden. Dabei gibt es im Wesentlichen drei Möglichkeiten:

- Pufferspeicher für Heizungswasser, der durch einen Trinkwarmwasserspeicher ergänzt wird
- Pufferspeicher für Heizungswasser, der durch ein Frischwassermodule ergänzt wird
- Kombispeicher

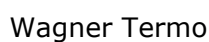
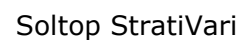
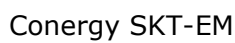
In [9] werden vier unterschiedliche Kombispeicherkonzepte vorgestellt, welche die Marktsituation 1998 widerspiegeln. Die Brauchwassererwärmung erfolgt dabei entweder über Rohrwendel-Wärmeübertrager, die sich in der Regel über die gesamte Speicherhöhe erstrecken, externe Plattenwärmeübertrager oder Tank in Tank-Konzepte (kleinerer Trinkwasserspeicher im Heizungswasserspeicher, oft auch „Trinkwasserblase“ genannt). Der Überblick in [10] und die aktuelle Marktrecherche (s.u.) zeigt, dass inzwischen etwa die Hälfte der neu installierten Systeme mit einem Tank in Tank-Kombispeicher ausgestattet ist. Dabei variieren die verwendeten Bauformen beträchtlich. Entscheidend ist dabei die richtige Dimensionierung des Bereitschaftsteils für die Trinkwassererwärmung.

Aufbauend auf dieser grundlegenden Einordnung wurde die relevante aktuelle Literatur zu Wasserspeichern speziell hinsichtlich von Informationen auf die Zerstörung der Speicherschichtung bei Be- und Entladevorgängen mit Tank in Tank-Speichern gesichtet. Die Literaturübersicht (vgl. [11] bis [19]) bestätigt dabei die bereits genannten Einschätzungen.

Gemäss einer Studie der Zeitschrift „Sonne, Wind & Wärme“ vom Dezember 2006 [10] haben Absatz und Anzahl unterschiedlicher Kombispeichermodule 2006 stark zugenommen, wobei die Mehrheit der befragten Hersteller (die einen guten Querschnitt des deutschsprachigen Marktes abbilden) einen Tank in Tank-Kombispeicher anbieten. Einen eindeutigen Trend zu Tank in Tank-Systemen oder Rohrwendel-Wärmeübertragern stellten die Hersteller mehrheitlich jedoch nicht fest.

In [20] wird ausgehend von einer Internetrecherche für typische Kombisysteme auf dem deutschen Markt ein ähnliches Ergebnis bestimmt: Für Kombianlagen mit 8..15m² Kollektorfläche und Speicher zwischen 650 und 1050 l liegt der Anteil der Tank in Tank-Systeme bei 50%, der Anteil innenliegender Wärmeübertrager bei 33% und der Anteil externer Wärmeübertrager bei 17%. Die Anlagenkonfiguration orientiert sich dabei an der in [21] definierten Referenzanlage.

Abbildung 2 zeigt einen Überblick verschiedener Bauformen von Tank in Tank-Kombispeichern, der aus einer eigenen Internetrecherche abgeleitet wurde (Stand: Dezember 2007).



Nationale Zusammenarbeit

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgt ebenfalls auf informeller Ebene anhand vielfältiger Kontakte der Projektleitung. Zu nennen sind hier vor allem die Technische Universität Dänemark (Prof. Furbo), die Fachhochschule Esslingen (Prof. Messerschmid), das Institut für Wärmetechnik Stuttgart (M. Hampel) und die Universität Kassel (Prof. Jordan). Darüber hinaus stehen die Bearbeiter des Projektes auch mit einigen deutschen Firmen in Kontakt.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Der experimentelle Auf- bzw. Umbau konnte nach intensiver Einarbeitung in die komplexe Methode und verschiedenen nötigen Anpassungen erfolgreich in Betrieb genommen und anhand erster Versuche getestet werden, vgl. auch [22]. Anhand intensiver Literaturstudien konnten die für die Untersuchungen von eWT entscheidenden Parameter eruiert werden, so dass im Weiteren systematische Messungen durchgeführt werden können. Mit der Literaturübersicht und der Marktrecherche zu Tank in Tank-Systemen wurden die theoretischen Grundlagen und eine Einordnung der Problemstellung geschaffen. Aufgrund der Komplexität der Untersuchungsmethode werden jedoch zunächst die Experimente mit eingetauchten Wärmeübertragern abgeschlossen, bevor (geplant für Mitte Februar) die Untersuchungen an Tank in Tank-Systemen aufgenommen werden können. Dafür sollen repräsentative Modelle erworben bzw. hergestellt werden. Aufgrund des Budgets und des grossen experimentellen Aufwandes wird jedoch voraussichtlich eine Auswahl nötig (maximal zwei Einbauten).

Referenzen

- [1] S. Arora, J. H. Davidson, J. Burch and S. Mantell: Thermal penalty of an immersed heat exchanger storage system. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 123, 3 (2001), 180-186.
- [2] R. B. Farrington and C. E. Bingham: Testing and analysis of immersed heat exchangers. Tech. rep., Solar Energy Research Institute (now National Renewable Energy Laboratory), 1986.
- [3] H. Messerschmid: *Entwicklung und validation eines numerischen Verfahrens zur Beurteilung von Trinkwasserspeichern*. PhD thesis, Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufttechnik, 2002.
- [4] V. T. Morgan: The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. In *Advances in heat transfer* (New York, 1975), vol. 11, Academic Press Inc., pp. 199-264.
- [5] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, 2006.
- [6] S. Østergaard Jensen: *Varmeovergang for varmevekslerspiraler neddykket i vand*. Thermal Insulation Laboratory (now Department of civil engineering, Technische Universität Dänemark), Rapport nr. 84-10. 1984.
- [7] S. Furbo: *Heat storage for solar heating systems*. Department of Civil Engineering, Denmark Technical University, 2005, Educational Note.
- [8] W. Rogatty: Solare Heizungsunterstützung – Heizwasser-Pufferspeicher oder Kombispeicher? In: *Moderne Gebäudetechnik* 06/2007.
- [9] H. Drück, E. Hahne: Kombispeicher auf dem Prüfstand. Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 1998.
- [10] J. Meyer.: Solarspeichermarkt – Kaum einer kommt nach. In: *Sonne, Wind & Wärme* 12/2006.
- [11] R. Huhn: Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. TUDpress Dresden, 2007.
- [12] S. Knudsen: Heat transfer in a tank in tank combi store. Rapport BYG_DTU R-025, Danmarks Tekniske Universitet, 2002.
- [13] M.A. Rosen: The Exergy of Stratified Thermal Energy Storages. In: *Solar Energy* Vol.71 No.3, pp. 173-185, 2001.
- [14] J.-C. Hadorn (Ed.): *Thermal Energy Storage for Solar and Low Energy Buildings*. IEA Solar Heating and Cooling Task 32 Publication, 2005.
- [15] W. Weiss (Ed.): *Solar Heating Systems for Houses*. IEA Solar Heating and Cooling Task 26 Publication, James&James, 2003.
- [16] U. Jordan: Untersuchung eines Solarspeichers zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung. VDI-Verlag Reihe 19 Nr. 138, Düsseldorf 2002.
- [17] H. Kerskes, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: „Kombianlagen“ – Ein nationales Projekt für Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Raumheizung. Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2001.
- [18] S. Bachmann, H. Drück, H. Müller-Steinhagen: Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Speichern bei der Trinkwassererwärmung in Anlehnung an prEN 15332. Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2006.
- [19] W. Weiss, J.-M. Suter, T. Letz: Solare Kombianlagen im europäischen Vergleich. Tagungsband Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2002.
- [20] R. Shahbazfar: Untersuchungen zum Einfluss des Trinkwarmwasserprofils auf den Systemertrag von solarthermischen Kombianlagen. Diplomarbeit, Universität Kassel, Oktober 2007.
- [21] W. Weiss, I. Bergmann, G. Faninger: *Solar Heat Worldwide – Markets and Energy Supply 2005*. International Energy Agency IEA SHC, April 2007.
- [22] E. Frank, S. Laipple, L. Konersmann, R. Haberl, P. Gantenbein, S. Brunold, P. Vogelsanger, A. Luzzi: SPF Forschungsaufgaben – B: Thermische Solarsysteme. BfE Jahresbericht, Dezember 2007.