Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse

Thorsten Urbaneck, Stefan Göppert, Rolf Lohse, Hagen Rauh, Ulrich Schirmer, Bernd Platzer
Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Maschinenbau
Professur Technische Thermodynamik
09107 Chemnitz
Tel.: 0371 / 531-32463, Fax: 0371 / 531-800075
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de
stefan.goeppert@mb.tu-chemnitz.de
rolf.lohse@mb.tu-chemnitz.de
hagen.rauh@mb.tu-chemnitz.de
ulrich.schirmer@hrz.tu-chemnitz.de
bernd.platzer@mb.tu-chemnitz.de

Jürgen Bühl, Andreas Nilius
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Thermo- und Fluiddynamik
Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau
Tel. / Fax: 0 36 77 / 69 18 27
juergen.buehl@tu-ilmenau.de
andreas.nilius@tu-ilmenau.de

Einleitung

Bei der Nutzung von regenerativen Energiequellen, hier Solarthermie [1], nimmt die Speicherung der Energie eine entscheidende Rolle ein, da in den meisten Fällen der Anfall von Energie nicht mit dem Bedarf übereinstimmt. Anlagenseitig müssen die Missverhältnisse im täglichen Zyklus (Kurzzeit-Speicher, z.B. zur Brauchwassererwärmung) und im jährlichen Zyklus (Langzeit-Speicher, z.B. zur teilsolaren Raumheizung, z.B. Abb. 1) ausgeglichen werden. Die solare Wärmeversorgung erscheint nur sinnvoll, wenn die gewonnene Solarenergie mit geringen Verlusten gespeichert, verteilt und zur Anwendung gebracht wird.

Betrachtet man die Speicherung, zeigen sich zwei Kategorien von Verlusten, die es zu verringern gilt: die äußeren Verluste über die Systemgrenze des Speichers (z.B. Wand eines Tankspeichers) und die inneren Verluste innerhalb der Systemgrenze (z.B. Abbau von Temperaturunterschieden durch Mischung). Die äußeren Verluste besitzen den höchsten Einfluss gefolgt von den inneren Verlusten. Diese inneren Verluste sind bei den hier betrachteten Tank- und Erdbeckenspeichern mit einem unerwünschten Temperaturabbau bzw. -ausgleich verbunden. Dieser Temperaturabbau in der heißen Zone kann z.B. das Sinken des solaren Ertrages und den Anstieg des konventionellen Energieverbrauchs zur Nachheizung bewirken. Häufig liegt eine Abweichung vom geplanten Systemkonzept vor, die mit einer ineffizienten Nutzung der Speicherkapazität bzw. einer ungünstigen Betriebsweise (z.B. Nichteinhaltung von geplanten Temperaturniveaus bei der Speicherentladung) einhergeht. Deswegen ist in vielen Fällen der Schichtungsbetrieb von hoher Bedeutung. Beim thermisch geschichteten Speicher wird die Dichtedifferenz des Wassers genutzt, um eine möglichst gute Trennung zwischen dem heißen Wasser oben und dem kalten Wasser unten zu erreichen. Das heißt, die Be- und Entladeeinrichtung des Speichers (Konstruktionen siehe [2]) muss diese Schichtung erzeugen. Der Erhalt dieser Schichtung ist über die Speicherkonstruktion und den Speicherbetrieb sicherzustellen.

Diese Methode ist relativ kostengünstig. Aber die zunächst einfach erscheinende Nutzung der Dichtedifferenz ist mit verschiedenen Problemen verbunden. Ein grundlegendes Problem besteht darin, dass die Funktionsweisen der vielen Be- und Entladevorrichtungen noch nicht vollständig bzw. genügend

Urbaneck, T.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse. 19. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2009, Tagungsband, S. 252-257. ISBN 978-3-934681-94-1

genau bekannt sind. Ohne das Vorliegen von grundlegenden Erkenntnissen können derartige Einrichtungen nicht geplant und weiterentwickelt werden[1]. Deswegen sollen in diesem Projekt die relevanten Phänomene der Wärme- und Stoffübertragung mittels CFD und Experiment untersucht werden. Die gewonnenen Ergebnisse müssen dann im Versuchmaßstab getestet bzw. verifiziert werden, bevor diese Lösungen in Pilotanlagen ihre Anwendung finden. Das Projekt ist in das Förderkonzept Solarthermie2000plus des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) integriert. Das Projektmanagement hat der Projektträger Jülich (PTJ) übernommen. Weitere Informationen sind unter [1] zu finden.

Abb. 1: Kies-Wasser-Speicher, 8000 m³, Erdbeckenbauweise, solar unterstütztes Nahwärmesystem solarisPark Chemnitz, Befüllung mit Kies, Einbau der Be- und Entladeeinrichtung (hier mittlere Ebene), Rohrverteiler in drei Ebenen

Arbeiten und Ergebnisse

Auf Grund der vielschichtigen Aufgabenstellung werden verschiedene Aufgabenkomplexe bearbeitet, die mit einander verzahnt sind. Im Folgenden sind einige Beispiele dargestellt, die zum Erreichen der Projektziele notwendig sind.

Anlagensimulation

Die hier verwendeten Speichermodelle (eindimensionale Schichtenmodelle) sind im Vergleich zur Modellierung mittels CFD (s.u.) wesentlich einfacher und können deswegen das Speicherverhalten nicht so detailliert wiedergeben. Mit Hilfe der Anlagensimulation (TRNSYS) kann aber der Parametereinfluss auf den solaren Ertrag oder auf den zusätzlichen Energiebedarf (z.B. Nachheizung) untersucht werden, was aus praktischer Sicht von hohem Interesse ist.

Abb. 2 zeigt beispielhaft Ergebnisse für eine große Solaranlage mit 114 m² Kollektorfläche und 10 m³ Speicher zur Brauchwassererwärmung und Raumheizung (siehe [3]). Bei einer sinkenden Dämmstärke des Speichers geht der solare Ertrag gegen Null. Die unterschiedlichen Kurven stellen den Einfluss der Beladeeinrichtung dar. Dieser liegt im Bereich von 10 %, was als signifikanter Einfluss zu bewerten ist. Das beste Ergebnis erzielt eine sog. Beladelanze (vgl. mit Abb. 3), die das solar erwärmte Wasser über der Höhe entsprechend der Eintrittstemperatur einschichtet.

[1] Kleine Speicher konstruieren in den meisten Fällen die Hersteller selbst. Des Weiteren unterliegen die Kleinanlagen dem Systemtest, wo die Effizienz bestimmt wird. Große Speicher bzw. große Systeme sind immer an eine objektbezogene Planung gebunden. Die Entwicklung leistungsfähiger Be- und Entladeeinrichtungen unter Beachtung der Systemintegration können z.Z. nur wenige Spezialisten bewerkstelligen.

Urbaneck, T.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse. 19. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2009, Tagungsband, S. 252-257. ISBN 978-3-934681-94-1

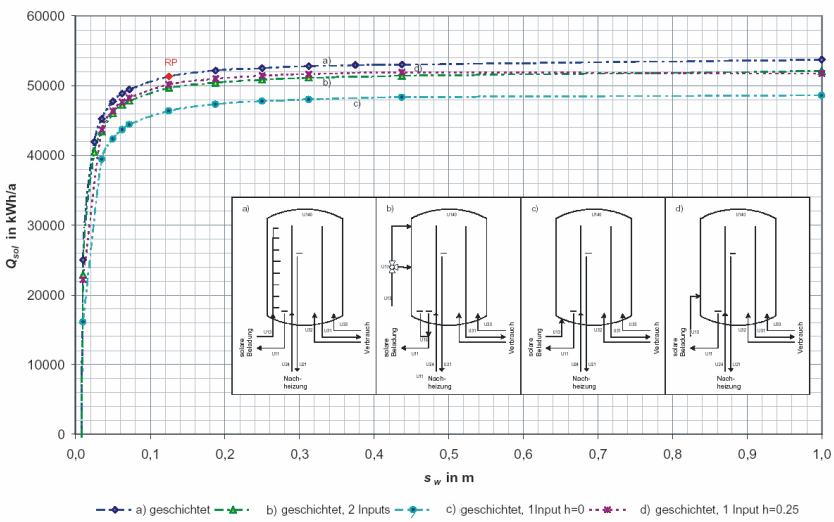

Abb. 2: Einfluss des Wärmedurchgangskoeffizienten an der Speicherwand in Abhängigkeit verschiedener Speicher-Beladesysteme auf den solaren Ertrag

Nutzung von Computational Fluid Dynamics (CFD)

Parallel zum Experiment (s.u.) werden mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (CFD) die physikalischen Effekte in thermischen Speicher untersucht (Abb. 3, dreidimensionale Speichermodelle, siehe [4]). Auf diesem Wege ist es gelungen, die wesentlichen Strömungseffekte, die zur Vermischung von kaltem und warmem Wasser im Speicher führen, herauszuarbeiten. Anhand von Designstudien konnte so das Schichtungsverhalten eines Beladesystems wesentlich verbessert werden. Die Strömungssimulation liefert einen wichtigen Beitrag zur Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien für die praktische Umsetzung solcher Schichtenbeladesysteme.

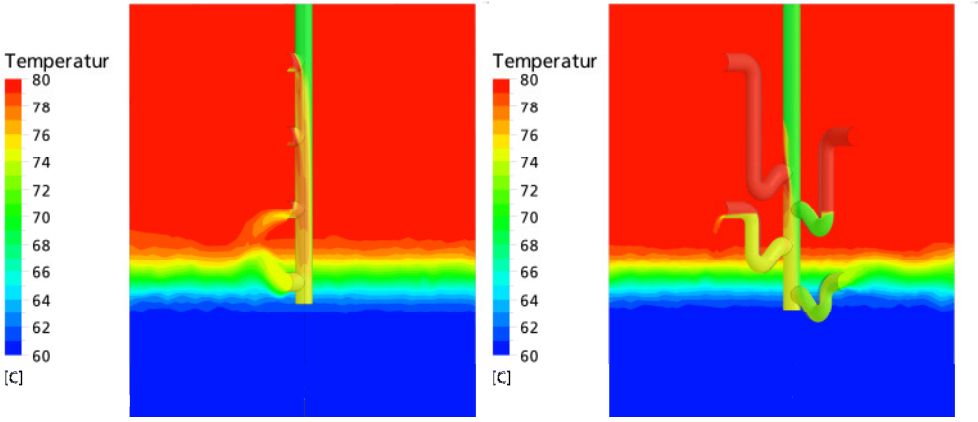

Abb. 3: Temperaturverteilung im Beladesystem bei der Einleitung von Wasser mittlerer Temperatur in eine bestehende Schichtung im Speicher, einfaches Beladesystem (links) und weiterentwickelte Variante (rechts)

Experimentelle Untersuchungen

Zur experimentellen Untersuchung des Beladeverhaltens wurden zwei Versuchsstände mit transparenten Modellspeichern errichtet. An der TU Ilmenau werden an einem runden Modellspeicher mit 0,9 m Durchmesser und 1,0 m Höhe Versuche zu den Strömungsvorgängen im gesamten Speicher durchgeführt. Dabei kommen Strömungsmarkierung mit Tinte verbunden mit einer Videoaufzeichnung sowie PIV-Messtechnik (Particle-Image-Velocimetry, Abb. 4) zum Einsatz. Die Messung der vertikalen Temperaturverteilung erfolgt mit in verschiedenen Höhen angeordneten Thermoelementen.

An der TU Chemnitz werden an einem quaderförmigen Modellspeicher mit einer Breite und Höhe von jeweils 1 m und einer Tiefe von 0,2 m Versuche durchgeführt (siehe [5]). Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Strömungsvorgängen im und am Beladesystem selbst (Abb. 5). Zur Abbildung der Strömung wird das zentral projizierende Schattenverfahren angewandt. Zusätzlich kann an ausgewählten Stellen

Urbaneck, T.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse. 19. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2009, Tagungsband, S. 252-257. ISBN 978-3-934681-94-1

die Strömung mit Tinte markiert werden. Die Messung der vertikalen Temperaturverteilung erfolgt in gleicher Weise wie an der TU Ilmenau. Ein wichtiges Ergebnis der bisher durchgeführten Versuche ist der Nachweis der verschiedenen Formen von Ansaugeffekten (s.u.). Diese Effekte sind mitverantwortlich für die unerwünschte Vermischung von wärmerem und kälterem Wasser. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich nun Strategien zur Vermeidung der Ansaugung ableiten. Weiterhin konnten Simulationsrechnungen erfolgreich validiert werden. Dadurch erhöht sich wesentlich die Aussagekraft und Sicherheit der CFD-Berechnungen.

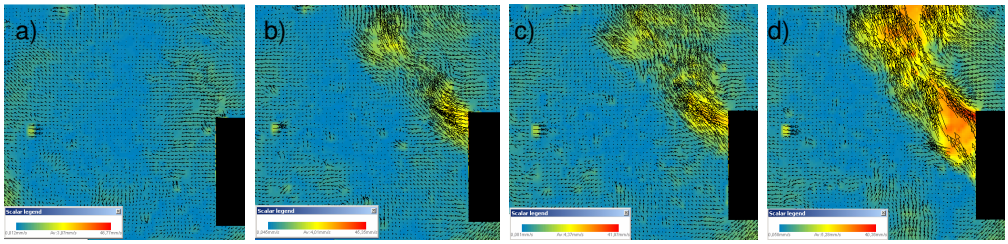

Abb. 4: PIV-Aufnahmen an einem Beladesystem der Firma SOLVIS zu verschiedenen Zeitpunkten nach Versuchsbeginn a) 5 s, b) 10 s, c) 15 s, d) 20 s

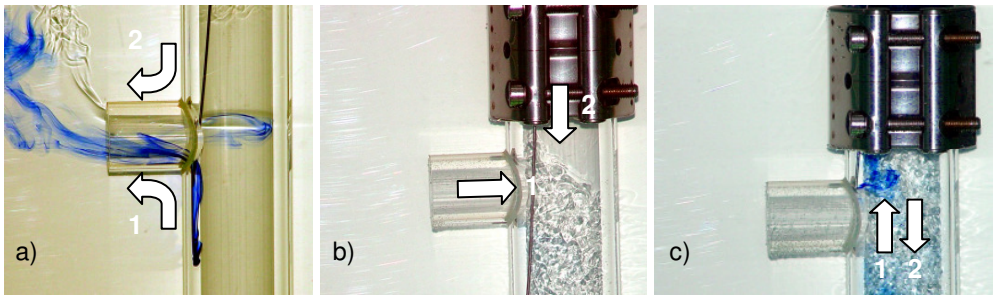

Abb. 5: Verschiedene Ansaugeffekte in einer Schichtenladevorrichtung bei a) kaltem und bei b) bzw. c) halbbeladenem Speicher, Temperatur im Speicher oben = 60 °C, Temperatur im Speicher unten = 20 °C, 1: angesaugter Strom; 2: Beladestrom; a) 6 cm/s, ΔT = 35 K; b) 3 cm/s, ΔT = -25 K; c) 1 cm/s, ΔT = -40 K

Vordimensionierung auf der Basis der Bernoulli-Gleichung

Berechnungen mit Computational Fluid Dynamics sind aufwendig. Das gilt ebenso für experimentelle Untersuchungen. Für die Untersuchung und Auslegung von Be- und Entladesystemen ist ein Werkzeug hilfreich, mit dem relativ einfach und schnell entsprechende Berechnungen durchgeführt werden können (siehe [6], Abb. 6). Der neuen Berechnungsmethode liegt der Satz von Bernoulli ergänzt um die Druckverluste zugrunde.

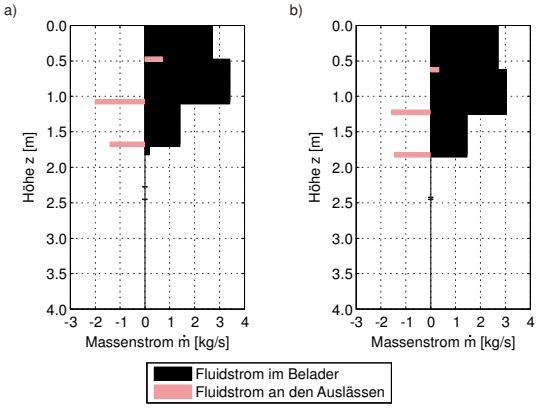

Abb. 6: Berechnete Massenströme für zwei verschiedene Belader bei einer Beladetemperatur von 75 °C und einem Volumenstrom von 10 m^3/h, Temperatur im Speicher oben = 80 °C, Temperatur im Speicher unten = 70 °C, Temperatur im Speicher = 75 °C bei einer Höhe von 1,3 m; a) einfacher Belader, b) Belader der Firma ConSens

Urbaneck, T.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse. 19. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2009, Tagungsband, S. 252-257. ISBN 978-3-934681-94-1

Praxistest mit Versuchsspeicheranlage

Abb. 7: Versuchseinrichtung zum praxisnahen Test von Be- und Entladeeinrichtungen

Um die Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen zu überprüfen, müssen die Be- und Entladeeinrichtungen unter praxisnahen Bedingungen getestet werden. Aus diesem Grund wurde ein spezieller Versuchstand (Abb. 7) aufgebaut, mit dem es möglich ist, Beladezyklen zu fahren, die der Leistung einer bis zu 36 m² großen Solaranlage entsprechen. Des Weiteren kann der 2,1 m³ große Testspeicher mit bis zu 50 kW (z.B. Simulation extrem hoher Zapfraten bei der Trinkwassererwärmung) entladen werden. Die Testprozedur, die mehrere Tage dauert, kann programmiert werden. Der Test läuft dann automatisch ab.

Schlussbemerkungen

Be- und Entladesysteme sollen einen effizienten Systembetrieb gewährleisten. Einfache Konstruktionen, die Langzeitbeständigkeit der Bauteile und ein sicherer Betrieb sind dabei wichtige Teilaspekte. Die vorgestellten Arbeiten sollen einen Beitrag zum besseren Verständnis, zur besseren Auslegung und zum besseren Betrieb (z.B. Planungs- und Gestaltungsrichtlinien) liefern. Ergebnisse, die in diesem Projekt erarbeitet wurden, fließen in die Planung von verschiedenen Solarspeichern ein. Der 2008 erscheinende Abschlussbericht und weitere Veröffentlichungen werden den Speicherentwicklern, Planern und Betreibern die dazu notwendigen Informationen liefern. Trotz der bisher erreichten Fortschritte ist die Notwendigkeit weiterführender Arbeiten absehbar.

Quellen

[1] Projektträger Jülich: http://www.solarthermie2000plus.de, 2008

[2] Göppert, S.; Urbaneck, T.; Schirmer, T.; Lohse, R.; Platzer, B.: Be- und Entladesysteme für thermische Schichtenspeicher: Teil 1 – Überblick: Chemie Ingenieur Technik, 80. Jg. (2008) Heft 3, S. 287-293 - ISSN 1522-2640. http://dx.doi.org/10.1002 /cite.200700162

[3] Urbaneck, T.; Fritzsch, S.; Schirmer, U.; Bocklisch, S.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Platzer, B.: Der gestalterische Einfluss bei großen Tankspeichern auf den solaren Ertrag. 18. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2008, Tagungsband, S. 278-283 (Kurzfassung, 12 Seiten Langfassung auf CD), ISBN 978-3-934681-69-9

[4] Lohse, R.; Urbaneck, T.; Göppert, S.; Schirmer, U.; Rauh, H.; Platzer, B.: Gestaltungsrichtlinien für Schichtenbeladesysteme für thermische Energiespeicher. 18. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2008, Tagungsband, S. 452-457 (Kurzfassung, 12 Seiten Langfassung auf CD), ISBN 978-3-934681-69-9

[5] Göppert, S.; Rauh, H.; Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Lohse, R.; Platzer, B.; Kunis, C.: Untersuchungen zum Schichtungsverhalten verschiedener Be- und Entladesysteme. 17. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2007, Tagungsband, S. 51-53 (Kurzfassung,12 Seiten Langfassung auf CD), ISBN 978-3-934681-55-2

[6] Göppert, S.; Lohse, R.; Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Platzer, B.: Neue Berechnungsmethode für strömungsmechaniche Be- und Entladesysteme. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Hrsg.): 17. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, 2007, Tagungsband, S. 268-270, 11 S. auf CD-Rom. - ISBN 978-3-934681-55-2

Dank

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0329271A gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger PTJ für die Unterstützung des Vorhabens. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Urbaneck, T.; Göppert, S.; Lohse, R.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher – Methodik und Projektergebnisse. 19. Symposium „Thermische Solarenergie“, Staffelstein, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2009, Tagungsband, S. 252-257. ISBN 978-3-934681-94-1