

Probleme bei der Erfassung des Ausströmverhaltens eines einfachen Schichtenladers mittels PIV/PLIF

Problems in detection of effects of an simple stratification device using PIV/PLIF

Marcus Buhl, Bernd Platzer

Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik, Reichenhainer Straße 70, 09107 Chemnitz

Beladung thermischer Speicher, Schichtenlader, Ausströmeffekte am Beladerauslass, nicht-isothermer Freistrah

charging of thermal storages, stratification device, effects at the inlet, non-isothermal free jet

Zusammenfassung

Mittels einer PIV/PLIF-Versuchsanordnung wurden Strömungseffekte am Auslass sowie im Beladerohr eines einfachen Schichtenladers in einem thermischen Speicher untersucht. Als Speichermedium diente hierbei Wasser. Für eine anwendungsnahe Analyse wurden relativ hohe Temperaturdifferenzen von $\Delta T = 30$ K gewählt. Ungleiche Brechungsindizes des nicht-isothermen Fluids sowie Reflexionen vom Schichtenlader führten zu einer Reihe an Problemen, welche zum Teil behoben werden konnten. Die Ergebnisse zeigen einen gerichteten und pulsierenden, nichtisothermen Freistrah an der Auslassmündung. Des Weiteren konnten periodische Schwingungen am Dichtesprung im Beladerohr sowie am Auslass festgestellt werden.

Einleitung

Ein verantwortungsvoller Umgang mit fossilen Energieressourcen im Bereich der Trinkwassererwärmung und der Raumheizung wird durch den Einsatz solarthermischer Anlagen möglich. Aufgrund der fluktuierenden solaren Einstrahlung ist für eine effiziente Anwendung solarthermischer Anlagen die Zwischenspeicherung (Stunden bis Monate) der thermischen Energie notwendig. Dies wird häufig über Warmwasserspeicher realisiert. Im Speicher bildet sich aufgrund der temperaturabhängigen Dichte des Wassers eine thermische Schichtung aus. Die Qualität der Schichtung, also eine möglichst geringe Vermischung von kaltem und warmem Fluid, ist ein wichtiger Faktor für die Effizienz der Speicherung. Für eine geringe Vermischung ist vor allem das Ausströmverhalten aus dem Belader von Bedeutung. Dieses wird entscheidend von den Betriebsparametern (Beladetemperatur ϑ_{Be} , im Speicher vorliegendes Temperaturprofil bzw. bei isothermer Schichtung die Speicheranfangstemperatur ϑ_{Sp} , temperaturabhängiger zugeführter Volumenstrom \dot{V}_{Be}) sowie der Beladergeometrie beeinflusst. Als optimal gilt ein sprunghafter Übergang zwischen dem warmen und kalten Bereich (schmale Übergangszone). Die reale und ideale Temperaturschichtung von Wasser in einem thermischen Speicher wird in Abbildung 1 vereinfacht dargestellt.

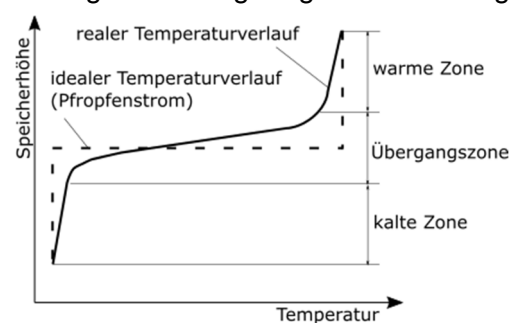


Abbildung 1: Reale und ideale Temperaturschichtung von Wasser mit warmer und kalter Zone sowie der Übergangszone

Versuchsaufbau

Die Untersuchungen erfolgten in einem Modellspeicher mit einer PIV/PLIF-Einheit (siehe Abbildung 2). Der Plexiglasspeicher ($1,0 \times 0,2 \times 1,0 \text{ m}^3$) besitzt ein Fassungsvermögen von $V_{\text{Sp}} = 200 \text{ l}$ und arbeitet nach dem Verdrängungsprinzip. Die Aufheizung des Wassers erfolgt durch einen ebenfalls 200 l fassenden Heizkessel, sodass sich im gesamten System ca. 400 l Wasser befindet. Es können Volumenströme bis zu 1700 l/h sowie Temperaturdifferenzen bis zu 50 K eingestellt werden. Als Schichtenlader fungiert ein Glasrohr ($d_{i,\text{Be}} = 54 \text{ mm}$), welches vertikal im Speicher angeordnet ist. Das Fluid strömt von oben in den Schichtenlader und kann unten sowie durch vier horizontale, kreisrunde Öffnungen ($d_{i,\text{A}} = 32 \text{ mm}$) in den Speicher strömen, an dessen Boden ein gleichgroßer Volumenstrom entnommen wird. Als Laser wird ein doppelt gepulster Nd:YAG Laser (Litron Nano L 200-15 PIV) mit einer maximalen Leistung von 200 mJ und einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ verwendet. Die maximale Wiederholungsrate beträgt 15 Hz . Der Lichtschnitt ist vertikal ausgerichtet und mittig an den Beladerauslässen positioniert. Die größte Aufweitung des Laserfächers ermöglicht an drei Auslässen gleichzeitig eine PIV/PLIF-Messung. Als Tracer für die PIV-Messung werden unbeschichtete Hohlglaskugeln mit einem Partikeldurchmesser von $d_p = 8 \text{ bis } 12 \mu\text{m}$ verwendet. Die Konzentration des fluoreszierenden Farbstoffs Rhodamin B muss bei einem maximal aufgeweiteten Lichtschnitt ca. $6,25 \mu\text{g/l}$ betragen. Bei einer höheren Beimischung tritt eine zu starke Trübung des Wassers ein und die Streulichtintensität der Hohlglaskugeln wird zu gering. Das Streulicht bzw. die Fluoreszenz wird von zwei CCD-Kameras (TSI PowerView™ Plus 4MP) aufgenommen. Die Datenerfassung sowie das Processing erfolgt durch die Software Insight4G der Firma TSI.

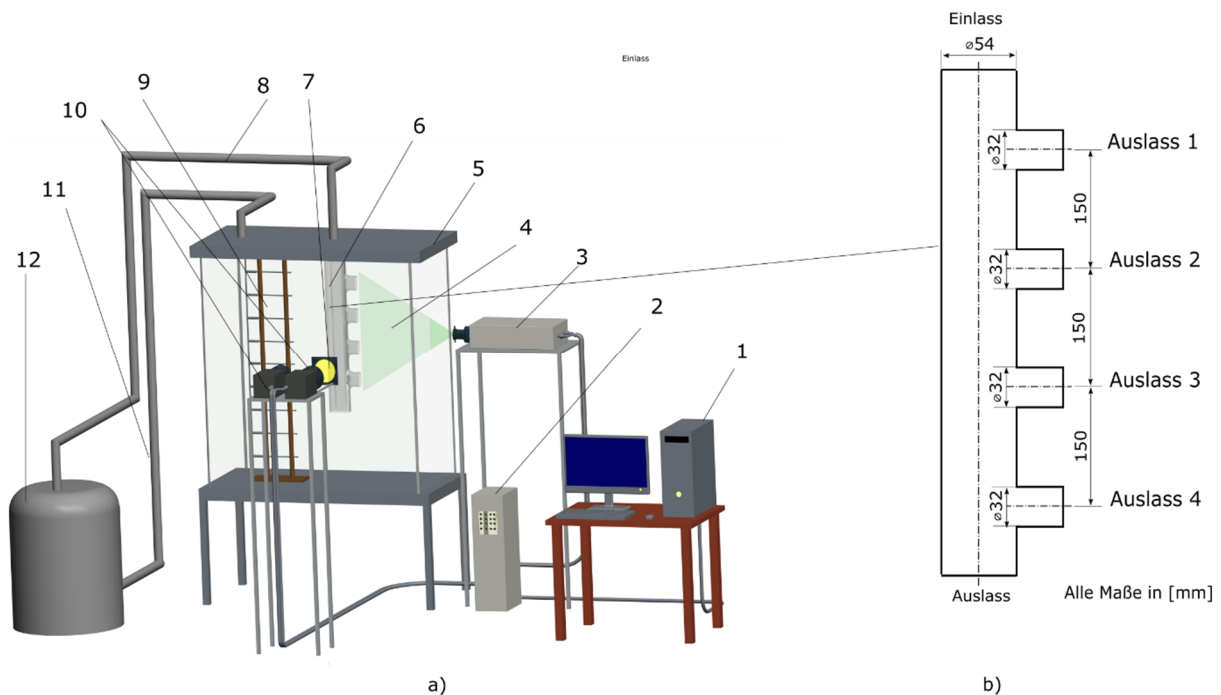


Abbildung 2: a) Aufbau des Versuchsstands mit 1-Rechner, 2-Synchronizer, 3-Lasereinheit, 4-Laserfächer, 5-Plexiglasspeicher, 6-Belader, 7-Dichroitischer Spiegel, 8-Zulaufleitung, 9-Thermoelemente, 10-PIV/PLIF-Kameras, 11-Rücklaufleitung, 12-Heizkessel; b) Eingebauter einfacher Schichtenlader

Versuchsdurchführung und Methodik

In der ersten Versuchsanordnung wird das Ausströmverhalten an den Auslässen 1 bis 3 des Schichtenladers mit den Betriebsparametern $\dot{V}_{\text{Be}} = 270 \text{ l/h}$, $\vartheta_{\text{Be}} = 70 \text{ °C}$ und $\vartheta_{\text{Sp}} = 40 \text{ °C}$ untersucht, wobei der Volumenstrom und die Beladetemperatur über die gesamte Versuchszeit na-

hezu konstant gehalten wurden. Die jeweils 27 s dauernden Messungen fanden zu sechs unterschiedlichen Beladezeiten $t_{\text{Be}}/V_{\text{Sp}}$ statt. Die Bildpaarfrequenz beträgt 7,25 Hz ($\Delta t = 0,14$ s) und der Bildzeitabstand (Frame A zu B) 2000 μs . Die PLIF-Messung erfolgt immer mittig zwischen zwei PIV-Frames, somit besteht für jedes Strömungsfeld exakt ein zugehöriges Temperaturfeld. Aufgrund der zweifachen Belichtung sind die PLIF-Bilder lediglich für eine grobe Einteilung der thermischen Schichtung nutzbar. Die Geschwindigkeitsvektoren an den Auslässen werden arithmetisch für 5 sehr dicht hintereinanderliegenden Messlinien ($\Delta x = 0,5$ mm) bestimmt (siehe Abbildung 3). Reflexionen und eine damit verbundene Überbelichtung erfordern einen Mindestabstand $L = 2$ mm von der Auslassmündung zur ersten Messlinie. Jede Messlinie ist 32 mm lang ($d_{i,A}$) und besitzt 50 auf die Länge gleichmäßig verteilte Messpunkte (Geschwindigkeitsvektoren bzw. Temperaturskalare). Der am Auslass angesaugte (ALM) bzw. der in den Speicher einströmende messlinienbezogene mittlere Massenstrom (ELM) wird aus der Summe der Segmentmassenströme berechnet und über den Messzeitraum von 27 s gemittelt. Die Segmentmassenströme werden aus den Segmentflächen A_i (siehe Abbildung 4), deren interpolierter Geschwindigkeitskomponente \bar{u}_i (Mittelwert aus den begrenzenden Stützstellen entlang der Messlinie) sowie der temperaturabhängigen Dichte gebildet. Die Dichte vom Wasser wird mit den ebenso interpolierten Temperaturskalaren $\bar{\vartheta}_i$ nach Gleichung (1), Gültigkeitsbereich $0^\circ\text{C} \leq \vartheta_i \leq 150^\circ\text{C}$, berechnet [Franke und Platzer 2014].

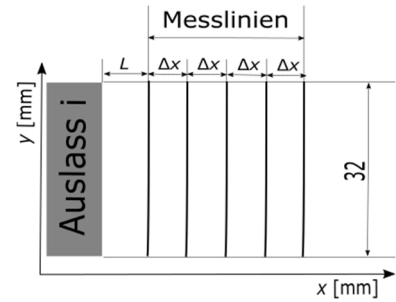


Abbildung 3: Messlinien an den Auslässen mit $\Delta x = 0,5$ mm und $L = 2$ mm

$$\rho_{w,i} = 1000 - \frac{(\vartheta_i - 3,982)^2}{466,7} \cdot \frac{(\vartheta_i + 273)}{(\vartheta_i + 67)} \cdot \frac{(350 - \vartheta_i)}{(365 - \vartheta_i)} \quad (1)$$

Resultierend aus den 50 Messpunkten werden 49 Segmentflächen mit einer einheitlichen Höhe von $h_S = 0,653$ mm definiert, sodass die Abweichungen der gemittelten Geschwindigkeiten und Temperaturen kleingehalten werden können. Ist \bar{u}_i positiv, strömt Fluid aus dem Schichtenlader in den Speicher, bei einem negativen Vorzeichen strömt Fluid aus dem Speicher in den Auslass, d. h., es kommt zu den sogenannten Ansaugeffekten 1 und/oder 2 (siehe Abbildung 5). Wird die Auslassöffnung bei der Beladung des kalten Speichers mit Warmwasser nicht vollständig durchströmt, wird der Ansaugeffekt 1 begünstigt. Die entstandene Scherschicht reißt kaltes Speicherfluid in das Beladesystem, wodurch es zu einer unerwünschten Durchmischung von kaltem und warmem Fluid kommt [Göppert et al. 2008]. Bei der Beladung eines bereits geschichteten Speichers mit kälterem Fluid kommt es zum Ansaugeffekt 2. Aufgrund der Dichte- und Druckdifferenzen strömt warmes Fluid aus dem Speicher in das Beladesystem, wodurch die bereits bestehende Schichtung abgebaut wird [Göppert et al. 2008].

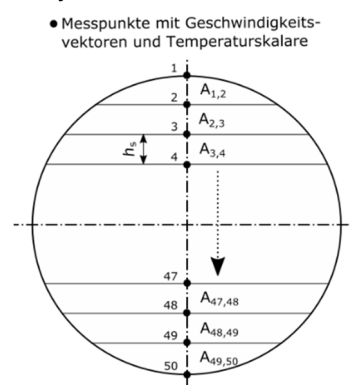


Abbildung 4: Querschnitt Auslassöffnung mit Segmentflächen und Messpunkten

der Versuchsanordnung 2 wurde bei gleichen Betriebsparametern und Beladezeiten das Strömungs- und Temperaturverhalten im Schichtenlader in Höhe des ersten Auslasses untersucht. Damit Störungen aufgrund dichteabhängiger Brechungsindizes minimiert werden, wurde der Schichtenlader axial um 180° gedreht, sodass die Beladerauslässe entgegen Abbildung 2 nach links gerichtet sind. Der Laserfächer wird für diese Untersuchung verkleinert, woraufhin die Energiedichte steigt und die Rhodamin B Konzentration erhöht werden kann (ca. $20 \mu\text{g/l}$). Die PIV/PLIF-Messung findet entkoppelt statt, d. h., die PLIF-Bilder werden 30-fach belichtet. Somit kann kein Strömungsfeld explizit einem Temperaturfeld zugeordnet werden. Die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten (größerer Querschnitt) erfordern einen Bildzeitabstand von 8000 μs . Die restlichen PIV-Aufnahmeparameter

bleiben zum ersten Versuch unverändert. Für die quantitative Auswertung wird zunächst der zu untersuchende Beladerohrabchnitt abgegrenzt. An der oberen und unteren Zonengrenze (ZG) sowie an der Auslassöffnung befindet sich jeweils eine Messlinie (siehe Abbildung 6). Die Messlinien sind 54 mm bzw. 52 mm lang und besitzen jeweils 100 Messpunkte, sodass sich 99 Segmentflächen ergeben.

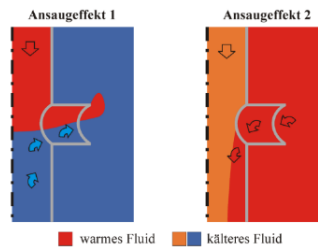


Abbildung 5: Ansaugeffekte 1 und 2 bei der Beladung von oben [Lohse 2009]

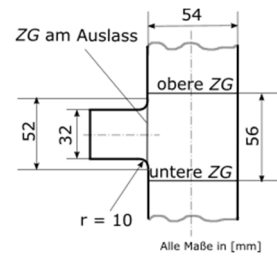


Abbildung 6: Zonengrenzen (Messlinien) im Beladerohr am Auslass 1

Ergebnisse für die Versuchsanordnung 1

Zu Beginn der Beladung strömt aufgrund hoher Auftriebskräfte nahezu der gesamte Massenstrom aus dem Auslass 1 in den Speicher. Erst nach der Bildung einer bis zum oberen Auslass reichenden thermischen Schichtung ($t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$) und somit der deutlichen Veränderung der Auftriebskräfte strömt ein Teil des Fluidstroms in den unteren Bereich des Schichtenladers (siehe Abbildung 7). Die Abbildung 8 stellt 6 aufeinanderfolgende Geschwindigkeitsprofile ($\Delta t = 0,14$ s) am Auslass 1 zur dimensionslosen Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$ dar. Obwohl zu diesem Zeitpunkt in dieser Höhe eine nahezu isotherme Fluidschicht von ca. 65 °C existiert, ist das Geschwindigkeitsprofil an der Auslassöffnung stark instationär. Als Folge des stochastischen Ausströmverhaltens bilden sich örtliche Geschwindigkeitsmaxima, welche die thermische Schichtung beeinflussen werden. Zusätzlich werden in Abbildung 9 zu 6 Beladezeiten

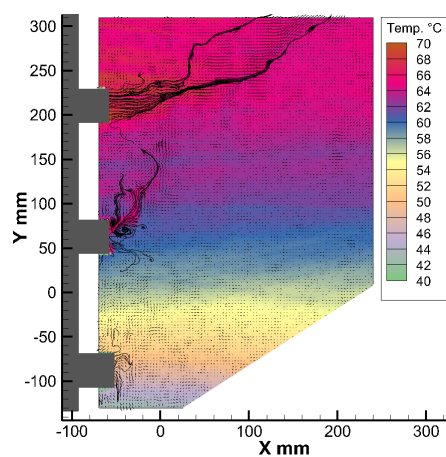


Abbildung 7: Strömungs- u. Temperaturfeld bei $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$

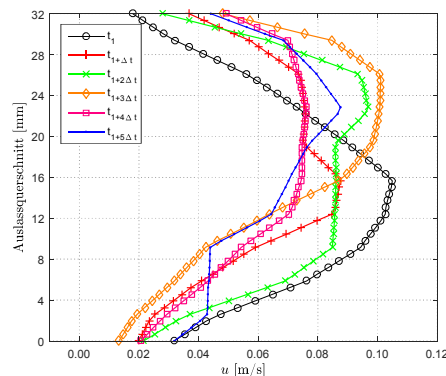


Abbildung 8: Strömungsprofil am Auslass 1 bei $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$ zum Bildpaarzeitpunkt t_i mit $\Delta t = 0,14$ s

jeweils 200 aufeinanderfolgende u -Geschwindigkeitsprofile (resultierend aus der Messdauer und der Bildpaarfrequenz) vom Auslass 1 dargestellt. Die Messung startete kurz bevor die Pumpen angeschaltet wurden, daher ergeben sich zur Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0$ anfänglich sehr geringe Geschwindigkeiten. Das gemittelte Geschwindigkeitsprofil (rot gestrichelt) bleibt bis $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,3$ relativ konstant. Ab dem Beladezeitpunkt $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$ nimmt dieses ab. Zu allen Beladezeiten schwanken die Geschwindigkeitsprofile mit annähernd gleicher Intensität. Ab $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$ sinkt ELM am Auslass 1 bei gleichzeitiger Zunahme am Auslass 2 (siehe Abbildung 10). Dies korreliert mit der bereits erwähnten Änderung des Geschwindigkeitsprofils bzw. der Auftriebskräfte. Die Summe von ELM ergibt ab diesem Zeitpunkt nicht mehr den zugeführten Massenstrom (mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser MID ermittelt). Dies kann auf den Messlinienabstand zur Auslassmündung zurückgeführt werden. Am Auslass 2 ist zu diesem Zeitpunkt die vertikale Strömungsgeschwindigkeit vom austretenden Fluid relativ hoch, sodass ggf. nicht der gesamte Massenstrom erfasst wird. Des Weiteren wird der Auslass 2 nur teilweise vom Beladefluid durchströmt, dennoch ist der angesaugte bzw. einströmende Massenstrom marginal. Ansaugeffekte können zwar messtechnisch erfasst werden, allerdings ist das maximale Verhältnis von ALM zum zugeführten Massenstrom zu jeder Beladezeit sehr klein (maximal 1,5 %). Die Instationarität der Strömungen wird mit der Standardabweichung dargestellt. Die anfänglich sehr hohe Standardabweichung ($t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0$) kann auf das Anfahrverhalten der Pumpen zurückgeführt werden.

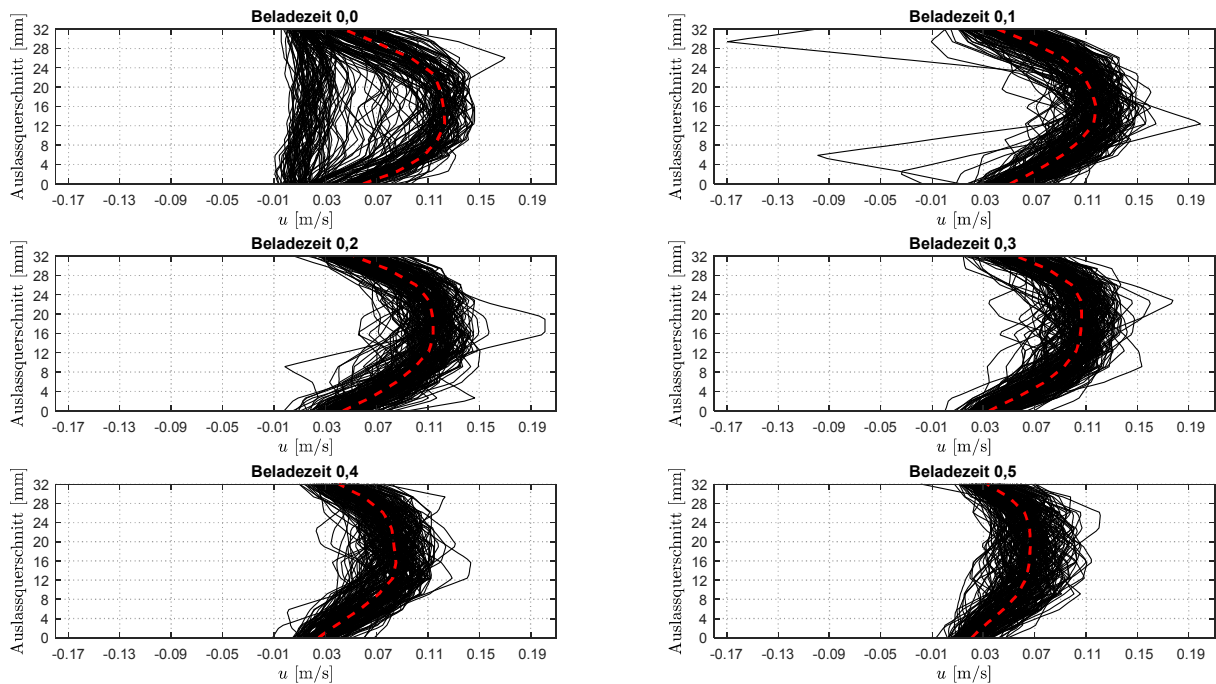


Abbildung 9: Horizontale Geschwindigkeitsprofile am Auslass 1 über den gesamten Messzeitraum von 27 s zu unterschiedlichen Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5), gemittelt Geschwindigkeitsprofil ist rot gestrichelt

Das Ausströmverhalten am Auslass 1 ist nahezu wirbelfrei bzw. stark gerichtet (siehe Abbildung 11). Zur quantitativen Beurteilung der Turbulenz am Austritt wird der 2D-Turbulenzgrad Tu in Strömungsrichtung (u) nach

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})}}{\bar{u}} \quad (2)$$

berechnet, wobei für

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n u_i \quad (3)$$

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{u} - u_i)^2 \quad (4)$$

$$\overline{v'^2} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^2 \quad (5)$$

gilt.

Zu Beginn der Beladung (bis $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,3$) strömt das Beladefluid nahezu ausschließlich durch den Auslass 1 in den Speicher, wodurch an der Auslassmündung eine hohe Geschwindigkeitskomponente u erreicht wird. Die durch Auftriebskräfte hervorgerufene Ablenkung bzw. die

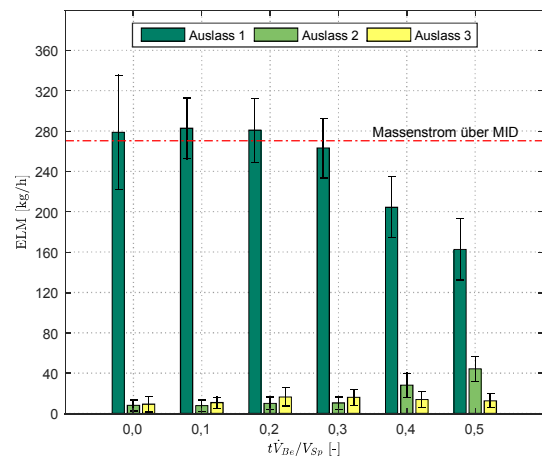


Abbildung 10: ELM an den Auslässen 1, 2 und 3 zu den Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5) mit STD

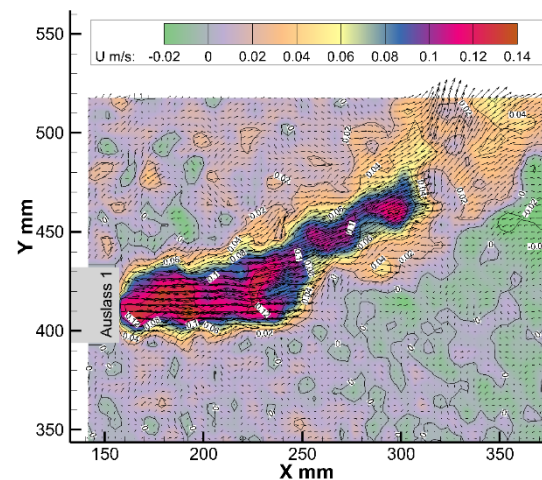


Abbildung 11: Strömungsfeld zum Beladezeitpunkt $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,3$

Geschwindigkeitskomponente v ist zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise klein (siehe Abbildung 12). Obwohl im Verlauf der Beladung die Auftriebskräfte am Auslass 1 sinken, steigt der relative Anteil der Geschwindigkeitskomponente v (Tu) erst mit Abnahme des ausströmenden Volumenstroms zur Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$. Die qualitative Auswertung zeigte zu keiner Beladezeit eine Wirbelbildung innerhalb des nichtisothermen Freistrahls.

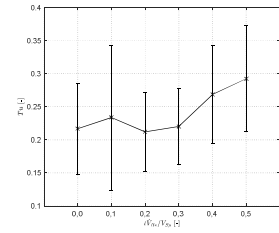


Abbildung 12: Tu zu den Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5) am Auslass 1

Ergebnisse für die Versuchsanordnung 2

Der Schichtenlader besteht aus nichtentspiegeltem Glas, wodurch es bei einer Lichtzufuhr von außen (Lichtschnitt tritt von rechts in den Belader ein) zu Reflexionen bzw. sektionell zu Überbelichtungen kommt (siehe Abbildung 13). Die untere ZG wird von einem überbelichteten Gebiet gekreuzt, sodass keine Partikel erkannt werden und dies in der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden muss. Die Zulaufleitung ist zu Beginn des Versuchs noch mit kälterem Wasser gefüllt (ca. 1 l), welches zunächst vom heißen Beladefluid verdrängt in den Belader strömt. Aufgrund der höheren Dichte strömt zu diesem Zeitpunkt das kältere Beladefluid vorwiegend in den unteren Bereich des Beladers. Ein kleiner Massenstrom wird direkt am Auslass 1 abgezweigt (siehe Abbildung 14) und an der oberen ZG existiert ein gleichmäßiges Strömungsprofil. Im weiteren Verlauf der Beladung (Beladefluid besitzt eine Temperatur von 70 °C) kann eine vorzeitige Ablenkung des zugeführten Massenstroms in Richtung Auslass 1 qualitativ beobachtet werden. Zur quantitativen Bewertung stellt die Abbildung 15 den Massenstrom über die jeweilige ZG dar, wobei eine Unterscheidung in Massenstrom-in-Strömungsrichtung (*ISR*) und Massenstrom-entgegen-Strömungsrichtung (*ESR*) erfolgt. An der oberen und unteren ZG ist die Hauptströmungsrichtung nach unten gerichtet. Am Auslass strömt das Fluid nach links in Richtung Auslassmündung. Die Summe der Massenströme am Auslass und der unteren ZG entsprechen zu jeder Beladezeit dem zugeführten Massenstrom (obere ZG). Der relativ hohe *ISR* an der unteren ZG zur Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0$ lässt sich auf das zunächst kältere Beladefluid zurückführen. Zu den Beladezeiten $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,1$ bis 0,3 strömt nahezu der gesamte Massenstrom durch den Auslass 1 in den Speicher. Gleichzeitig findet an der unteren ZG, welche auch als Dichtesprung agiert, eine kontinuierliche Richtungsänderung des Massenstroms statt. Ab der Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,4$ sinkt an der unteren ZG der *ESR* bei gleichzeitigen Anstieg vom *ISR*. Resultierend wird ein Massenstrom an den unteren Bereich abgeführt. In Abbildung 16 werden die vertikalen Geschwindigkeitsprofile an der oberen ZG äquivalent zu Abbildung 9 abgebildet. Wie bereits erwähnt, ist zu Beginn der Beladung ($t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0$) das Geschwindigkeitsprofil gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Zu allen nachfolgenden Beladezeiten ist eine konstante Verschiebung zu erkennen. D. h., in der linken

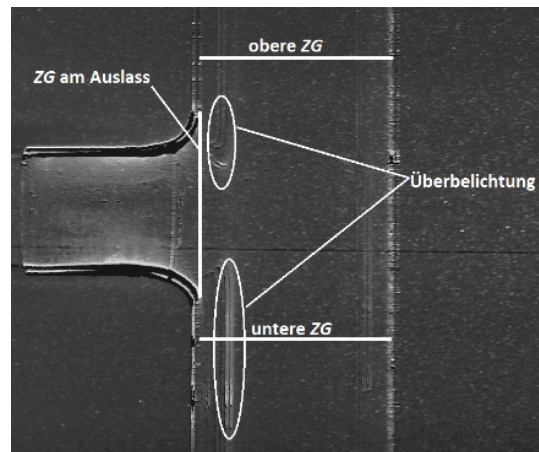


Abbildung 13: Rohbild vom Inneren des Beladers mit ZG und Überbelichtungen

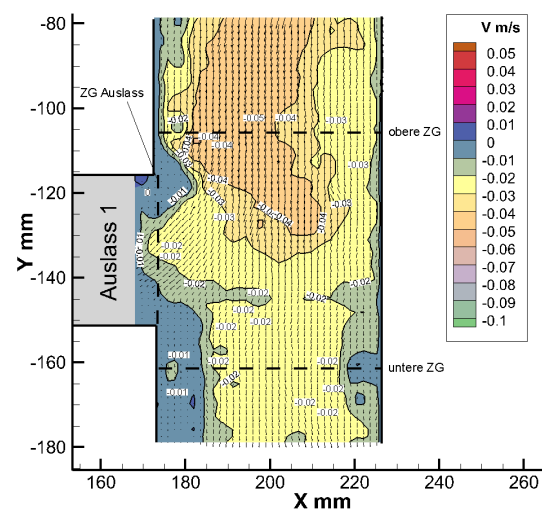


Abbildung 14: Strömungsprofil und v -Geschwindigkeitskomponente zur Beladezeit $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,0$

Querschnittshälfte herrschen in Strömungsrichtung höhere vertikale Geschwindigkeiten als im restlichen Bereich. Das am Auslass austretende Fluid begünstigt sogenannte Mitreißeffekte, wodurch das Strömungsprofil abgelenkt wird. Im rechten Abschnitt kommt es dadurch teilweise zu Gegenströmungen. Die linksseitige, relativ hohe kinetische Energie bewirkt an der unteren ZG eine Penetration vom heißen Beladefluid in den kälteren Beladerohrabschnitt (siehe Abbildung 17). Die tendenzielle Verschiebung des Geschwindigkeitsprofils korreliert mit den Messwerten von der oberen ZG. Es wird jedoch deutlich, dass zu allen Beladezeiten an jeder Querschnittsstelle auch Rückströmungen existieren (ESR). Dabei vermischt sich zunächst das eindringende warme Beladefluid mit dem kälteren Beladerohrwasser. Die Dichtedifferenz und das Kontinuitätsgesetz bewirken ein Aufsteigen des vermischten Wassers im Beladerohr. Dies erfolgt vorrangig im rechten Bereich des Beladers, da hier keine bzw. eine geringere kinetische Energie des Beladefluids entgegenwirkt (siehe Abbildung 18). Schließlich wird das Mischwasser vom Beladestrom mitgerissen. Ab einer Beladezeit von $t\dot{V}_{Be}/V_{Sp} = 0,3$ sind an der unteren ZG langwellige Wiederholungsraten ($T_{Periode} \approx 14$ s) des pulsierenden Massenstroms innerhalb des Messzeitraumes von ca. 27 s erkennbar (siehe Abbildung 19). Zu den vorangegangenen Beladezeiten bestehen stark turbulente Strömungsverhältnisse, sodass keine stationären oder periodischen Strukturen zugeordnet werden können.

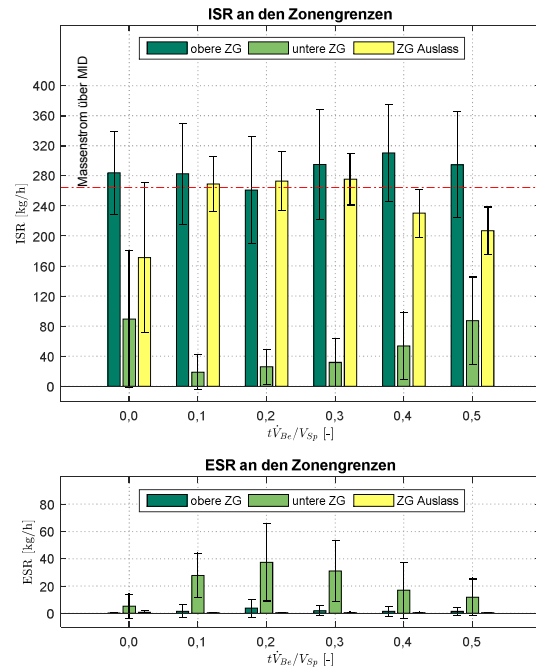


Abbildung 15: ESR und ISR an den Zonengrenzen oben, unten und am Auslass zu den Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5) mit STD

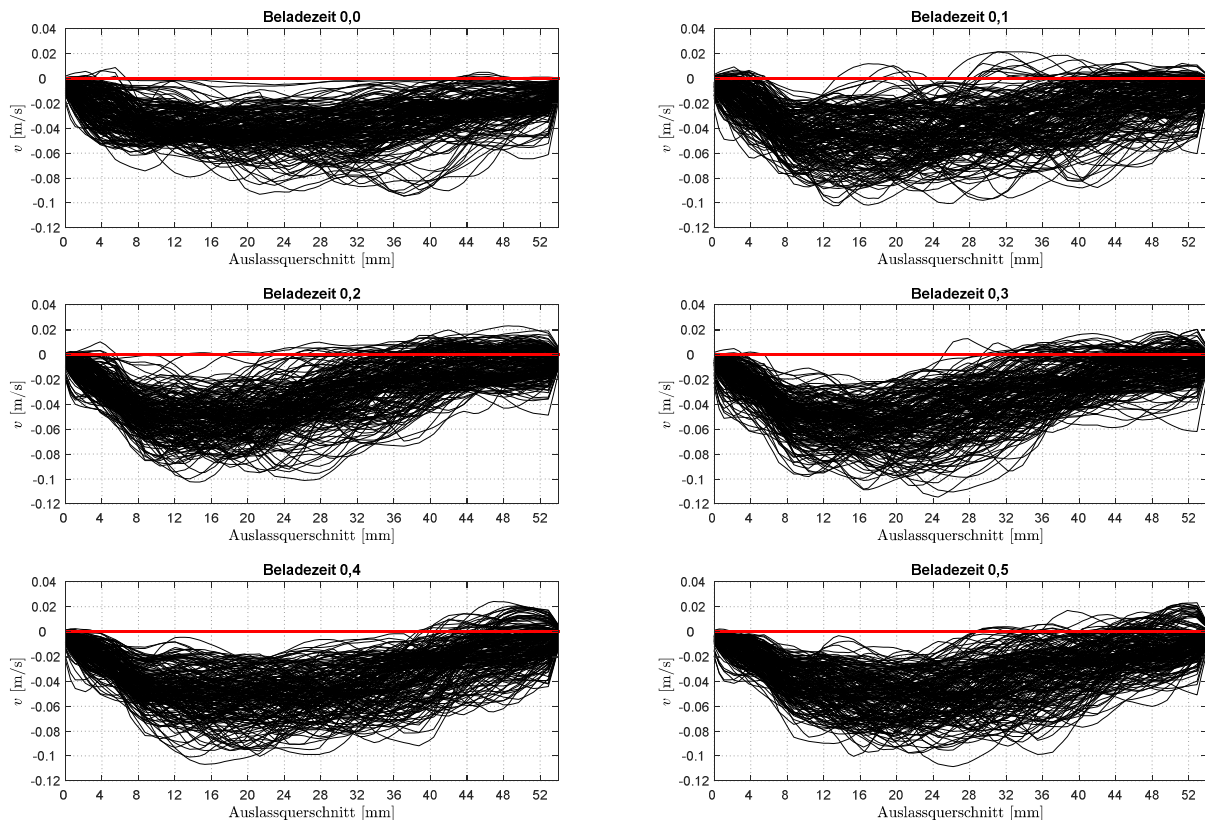


Abbildung 16: Vertikale Geschwindigkeitsprofile an der oberen ZG über den gesamten Messzeitraum von 27 s zu unterschiedlichen Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5), zur besseren Darstellung wird die Nulllinie rot gekennzeichnet

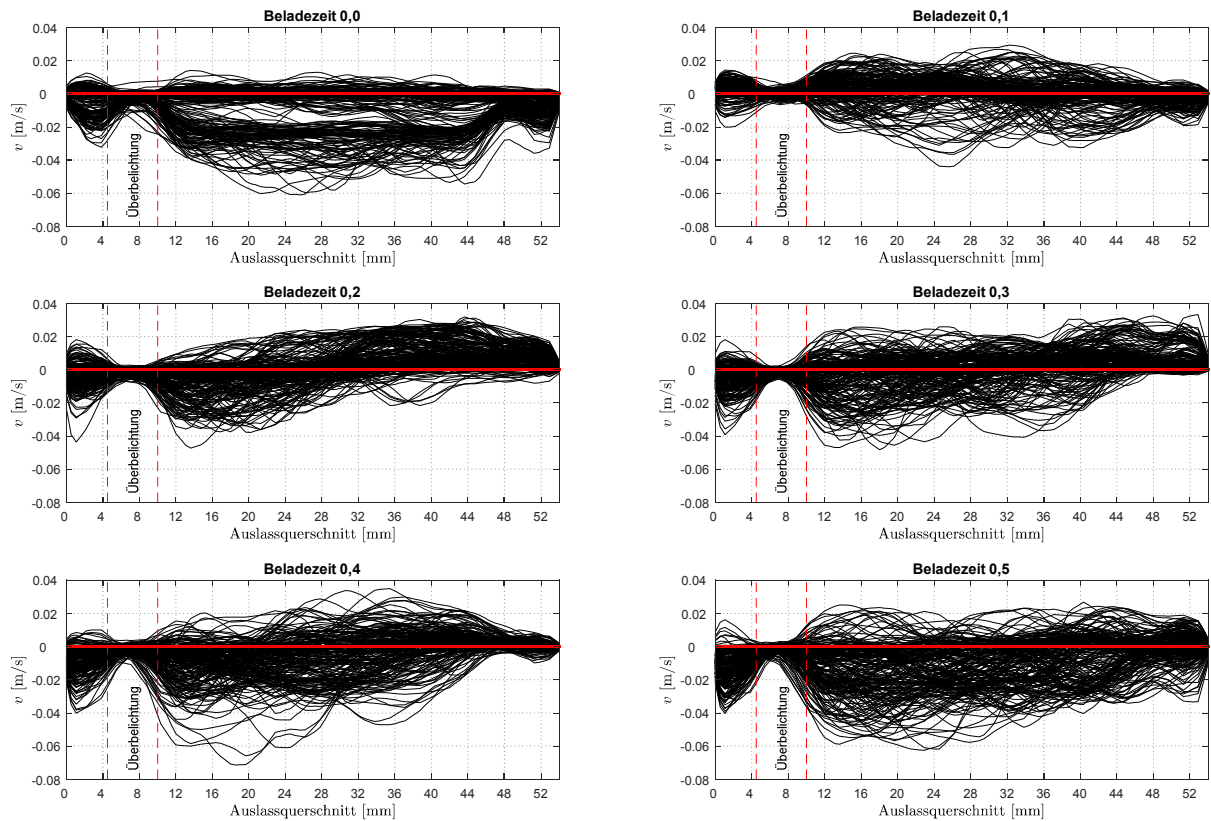


Abbildung 17: Vertikale Geschwindigkeitsprofile an der unteren ZG über den gesamten Messzeitraum von 27 s zu unterschiedlichen Beladezeiten (0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5) unter Berücksichtigung des überbelichteten Bereichs (siehe Abbildung 13), zur besseren Darstellung wird die Nulllinie rot gekennzeichnet

Eine ähnliche Frequenz wird auch am ZG Auslass beobachtet, wobei eine zeitliche Verschiebung über wenige Sekunden zur Massenstromfrequenz an der unteren ZG besteht. Die Analogie beider Schwingungsperioden beruht auf Einsaugeffekten, welche vom rückströmenden Mischwasser und dem zugeführten Beladefluid begünstigt werden. Die Messung der Temperaturen mittels LIF konnte lediglich zu Beginn der Untersuchung befriedigende Ergebnisse liefern. Das heiße Beladefluid vermischt sich mit dem kälteren Speicherwasser, strömt bis zur Speicherwand und wird schließlich um 180° umgelenkt, sodass es mit einer Mischtemperatur am Belader wieder vorbeiströmt. Die Fokussierung der Kamera und die LIF-Kalibrierfunktion werden schließlich vom andersgearteten Brechungsindex gestört bzw. die Ergebnisse werden verfälscht.

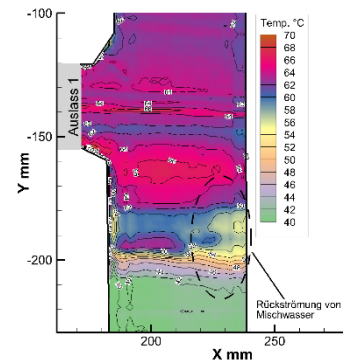


Abbildung 18: Temperaturprofil im Beladerohr nach ca. 300 s

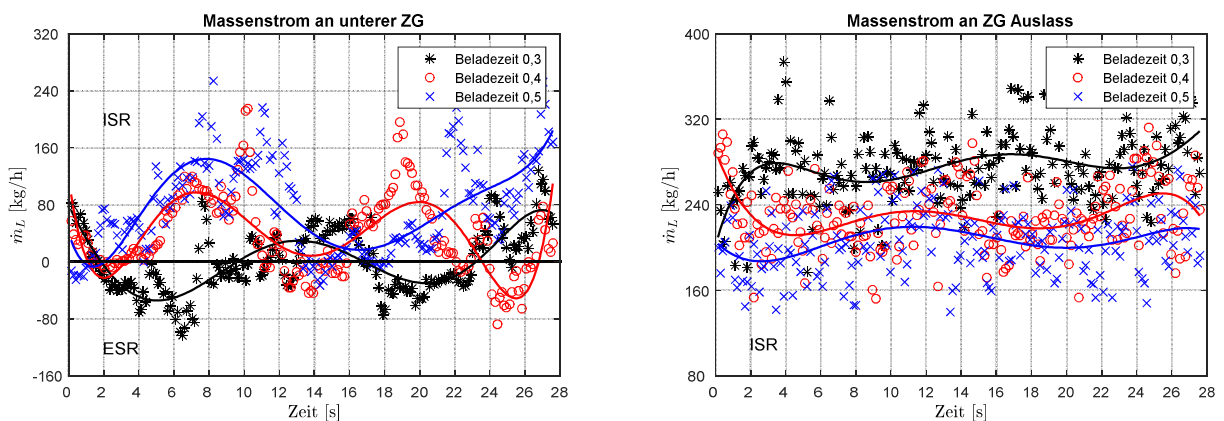


Abbildung 19: Pulsierende Massenströme an der unteren ZG (links) und am ZG Auslass (rechts) über den gesamten Messzeitraum (ca. 27 s) zu den Beladezeiten $t_{Be}/V_{Sp} = 0,3, 0,4$ und $0,5$ mit zugehörigem Polyfit (6-ten Grades)

Literatur

Franke, W., Platzner, B., 2014: "Rohrleitungen Grundlagen – Planung – Montage", Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-42450-0

Göppert, S., Lohse, R., Urbaneck, T., Schirmer, U., Platzner, B., Bühl, J., Nilius, A., 2008: „Forschungsbericht – Solarthermie 2000plus – Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entlade-systemen für Tank- und Erdbeckenspeicher“, TU Chemnitz, TU Ilmenau

Lohse, R., 2009: „Einfluss von Beladeeinrichtungen auf die thermische Schichtung in Warmwasserspei-chern“, Dissertation, TU Chemnitz