

## Strömungsverhalten in einem einfachen Schichtenlader

### Flow behavior in a simple stratification device

**Marcus Buhl, Bernd Platzer**

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

Beladung thermischer Speicher, Schichtenlader, Dichtesprung  
charging of thermal storages, stratification device, sharp density gradient

### Zusammenfassung

Für die Optimierung thermischer Energiespeicher muss ein besseres Verständnis der im Beladesystem vorkommenden Strömungsvorgänge entwickelt werden. Mit Hilfe von experimentellen Versuchen (PIV/PLIF) konnten hydrodynamische Effekte in einem einfachen Schichtenlader über einen längeren Beladezeitraum untersucht werden. Die nicht-isothermen Strömungsvorgänge zeigen dabei ein komplexes Verhalten. Die Ergebnisse weisen sprungartige Instabilitäten der untersuchten Größen nach.

### Einleitung

Die Speicherung thermischer Energie gewinnt mit zunehmender Nutzung der solaren Einstrahlung als Energiequelle immer mehr an Bedeutung. Häufig werden dafür Warmwasserspeicher eingesetzt. Im Speicher bildet sich aufgrund der temperaturabhängigen Dichte des Wassers eine thermische Schichtung aus (Abbildung 1). Die Qualität der Schichtung, also eine möglichst geringe Vermischung von kaltem und warmem Fluid (schmale Übergangszone), ist ein wichtiger Faktor für die Effizienz der Speicherung. Die Be- und Entladung erfolgt häufig über einen sogenannten Schichtenlader, welcher im einfachsten Fall aus einem vertikalen Rohr mit mehreren über die Höhe verteilten horizontalen Öffnungen besteht. In den vergangenen Jahren gab es große Anstrengungen, die Effizienz solcher thermischer Speicher zu erhöhen (z. B. [Göppert et al. 2008], [Lohse et al. 2008], [Göppert et al. 2010]). Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei vorrangig auf die Optimierung des Strömungsverhaltens im Speicher, d. h. auf eine möglichst geringe Vermischung von einströmendem Beladefluid mit dem im Speicher befindlichen Fluid. Dem Einströmverhalten, welches von den Betriebsparametern (Beladetemperatur  $\vartheta_{Be}$ , Speicheranfangstemperatur  $\vartheta_{Sp}$ , zugeführtem Volumenstrom  $\dot{V}_{Be}$ ) sowie der Beladegerometrie abhängig ist, konnte dabei eine wesentliche Bedeutung zugeordnet werden. Kenntnisse über die komplexen Strömungsverhältnisse im Schichtenlader, vor allem an den Auslassöffnungen und am Dichtesprung, sind hingegen rudimentär (Abbildung 2). Für weitere Optimierungsansätze bzw. eine Verbesserung der Speichereffizienz ist das Verstehen der hydrodynamischen Prozesse im Schichtenlader unabdingbar. Dieser Beitrag nimmt das experimentell ermittelte Strömungsverhalten in einem einfachen Schichtenlader in den Fokus und baut auf den Beitrag von [Buhl und Platzer 2016] auf.

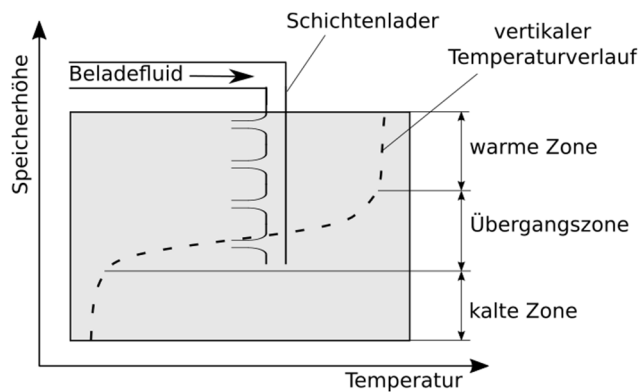


Abbildung 1: Warmwasserspeicher mit einem einfachen Schichtenlader und vertikalem Temperaturverlauf

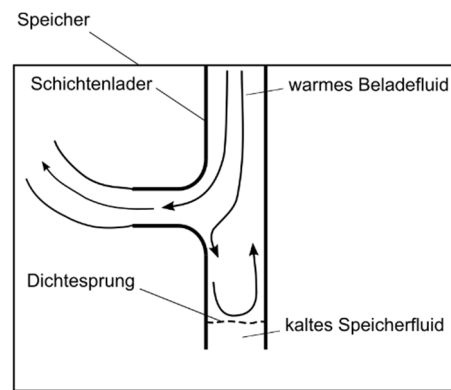


Abbildung 2: Charakteristischer Strömungsverlauf im Schichtenlader

## Versuchsaufbau

Die Experimente erfolgten in einem Modellspeicher mit einer PIV/PLIF-Einheit der Firma TSI (Abbildung 3). Der Plexiglasspeicher ( $1,0 \times 0,2 \times 1,0 \text{ m}^3$ ) besitzt ein Fassungsvermögen von  $V_{Sp} = 200 \text{ l}$  und arbeitet nach dem Verdrängungsprinzip. Der einzustellende Volumenstrom wird über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) ermittelt. Als Schichtenlader fungiert ein Quarzglasrohr mit einem Innendurchmesser von 54 mm, welches vertikal im Speicher angeordnet ist. Das Fluid strömt von oben in den Schichtenlader und kann unten sowie

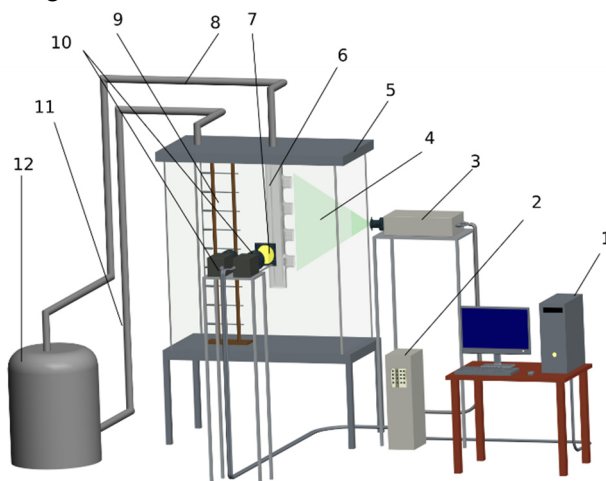


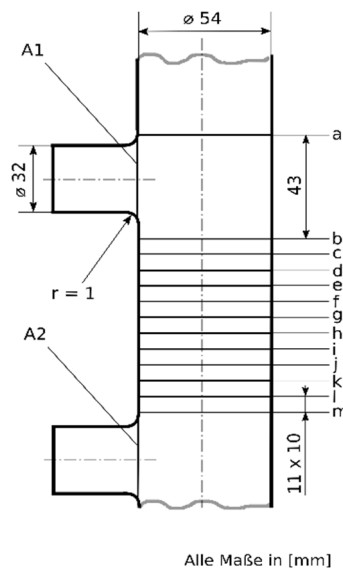
Abbildung 3: Versuchsaufbau mit 1-Rechner, 2-Synchronizer, 3-Lasereinheit, 4-Laserfächer, 5-Plexiglasspeicher, 6-Belader, 7-Dichroitischer Spiegel, 8-Zulaufleitung, 9-Thermoelemente, 10-PIV/PLIF-Kameras, 11-Rücklaufleitung, 12-Heizkessel

durch vier horizontale, kreisrunde Öffnungen, deren Innendurchmesser 32 mm beträgt, in den Speicher strömen (Abbildung 1). Der vertikal ausgerichtete Lichtschnitt (Nd:YAG-Laser mit  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) ist mittig an den Beladerauslässen positioniert. Als PIV-Tracer werden unbeschichtete Hohlglaskugeln verwendet. Die Temperaturmessung erfolgt durch den im Wasser aufgelösten fluoreszierenden Farbstoff Rhodamin B. Der zusätzlich verwendete pyroelektrische Laserenergie-Sensor ermöglicht eine fortlaufende Messung der fluktuierenden Laserenergie, sodass eine nachträgliche Korrektur der PLIF-Aufnahmen durchgeführt werden kann.

## Versuchsdurchführung und Methodik

Die Untersuchungen erfolgten an den beiden oberen Auslässen des Schichtenladers mit den konstanten Betriebsparametern  $\dot{V}_{Be} = 270 \text{ l/h}$  und  $\vartheta_{Be} = 70 \text{ °C}$ . Vor den Messungen wurde das im Speicher befindliche Fluid isotherm auf  $\vartheta_{Sp} = 40 \text{ °C}$  konditioniert. Die PIV- und PLIF-Messungen fanden getrennt statt. Für die PIV-Messung beträgt die Bildpaarfrequenz 1,45 Hz ( $\Delta t = 0,69 \text{ s}$ ), sodass ca. 1100 s (1600 Bildpaare) vom Beginn des Beladevorganges aufgenommen werden konnten. Für die betrachtete Strömung ist ein Bildzeitabstand (Frame A zu B) von 2 ms festgelegt. Die Messdauer der PLIF-Aufnahmen beträgt ebenfalls ca. 1100 s (2,9 Hz). Im Belader werden zunächst 15 Messlinien (ML) positioniert (Abbildung 4). Dabei

sind die vertikalen ML (A1 und A2) 34 mm und die horizontalen ML (a bis m) 54 mm lang. Jede ML wird mit 100 auf die Länge gleichmäßig verteilten Messpunkten mit *Tecplot 360 EX* ausgelesen und anschließend mit *Matlab* ausgewertet. An den ML können Massenströme in Strömungsrichtung (*iSR*) bzw. entgegen der Strömungsrichtung (*eSR*) fließen. Die 2-dimensionale Messtechnik ermöglicht keine direkte Messung der Massenströme über einen Flächenquerschnitt, sodass ein messlinienbezogener Massenstrom eingeführt wird. Die Bildung der Massenströme erfolgt aus den Teilflächen  $A_i$  eines Querschnitts (Abbildung 5), deren interpolierter Geschwindigkeitskomponente  $\bar{u}_i$  bzw.  $\bar{v}_i$  (Mittelwert aus den begrenzenden Stützstellen entlang der Messlinie) sowie der temperaturabhängigen Dichte. Die somit ermittelten Massenströme basieren zwar auf einem nicht vorhandenen einheitlichen Fluidstrom über die jeweilige Teilfläche, dennoch eignen sie sich für eine Analyse der Strömungsdynamik im Belader, da sie ebenfalls Effekte der Hydrodynamik darstellen. Nachfolgend besitzt der *iSR* an den vertikalen ML eine negative Geschwindigkeitskomponente  $\bar{u}_i$ , wenn das Fluid nach links strömt (aus den Belader), und an den horizontalen ML eine negative Geschwindigkeitskomponente  $\bar{v}_i$ , wenn Fluid senkrecht nach unten strömt. Aus der getrennten Summierung von negativen und positiven Teilmassenströmen folgen der querschnittsbezogene *iSR* und *eSR*.



Alle Maße in [mm]

Abbildung 4: Positionierung der Messlinien im Schichtenlader

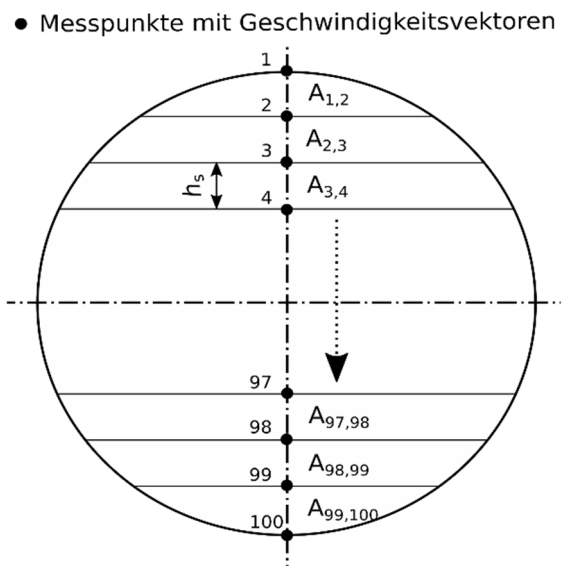


Abbildung 5: Rohrquerschnitt mit Teilflächen und Messpunkten

## Ergebnisse der PIV-Untersuchungen

Bis zur Messzeit von ca. 700 s strömt das warme Beladefluid nahezu vollständig aus dem obersten Auslass (Abbildung 6). Der berechnete *iSR* am A1 weicht dem vom MID ermittelten Massenstrom um ca.  $\pm 15$  kg/h ab ( $\approx 5\%$ ). Die zum Startzeitpunkt (bis ca. 50 s) relativ hohen Messwerte am Auslass 2 können mit dem zunächst kälteren Wasser in der Zulaufleitung (ca. 5 l), welches vom heißen Beladefluid verdrängt in den Belader strömt, begründet werden und werden nachfolgend nicht berücksichtigt. Am A1 wird über den gesamten Messzeitraum kein *eSR* ermittelt, d. h., es findet keine Rückströmung von Fluid aus dem Speicher in den Belader statt. Durch den zweiten Auslass strömt im Messzeitraum zwischen 120 s und 800 s Speicherfluid in den Belader, wobei der ermittelte *eSR* vereinzelt Maxima von ca. 20 kg/h erreicht. Gleichzeitig strömt jedoch ab ca. 650 s Fluid aus A2, sodass zwischen 650 s und 800 s zwei entgegengesetzte Massenströme am A2 vorliegen. Aufgrund dessen, dass A2 nur im oberen Querschnitt vom Beladefluid durchströmt wird, kann im unteren Bereich weiterhin kaltes Speicherfluid in das Beladesystem einströmen, wodurch es zu einer unerwünschten Durchmischung von kaltem und warmem Fluid kommt.

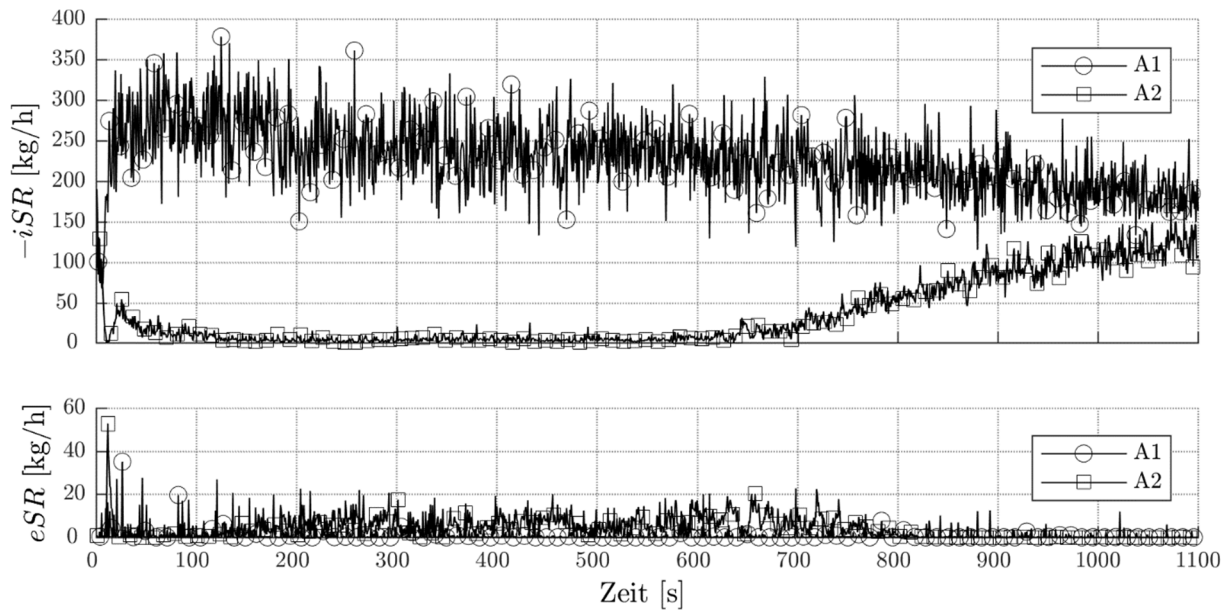


Abbildung 6:  $-iSR$  und  $eSR$  an den Auslässen 1 und 2 über den gesamten Messzeitraum

Im Beladerohr dringt ein Teil des Beladefluids aufgrund seiner hohen kinetischen Energie entgegen der Schwerkraft in den Belader ein, erfährt eine Richtungsumlenkung und wird schließlich vom zuströmenden Beladefluid wieder in Richtung A1 mitgerissen (Abbildung 7). Anhand der in Abbildung 8 dargestellten Massenströme ( $iSR$  und  $eSR$ ) ist zu erkennen, dass bis zur ML-c von Beginn an starke Fluidbewegungen stattfinden. An den darunterliegenden ML können im weiteren zeitlichen Verlauf ebenfalls zunehmende Fluidbewegungen identifiziert werden. Erreicht die Eindringtiefe des Beladefluids eine Messlinie, so kommt es zunächst zu starken Rückströmungen, d. h. der  $eSR$  ist größer als der  $iSR$ . Es wird jedoch kein Fluid aus dem unteren Bereich des Beladers angesaugt, sodass aufgrund der Massenkonservierung ein asymmetrisches Strömungsprofil angenommen werden muss. Ein weiteres Indiz für die Strömungsasymmetrie ist, dass der ermittelte  $iSR$  an der ML-m zum Ende der Messreihe geringer ist als der gleichzeitig gemessene  $iSR$  für A2 (ersichtlich durch den Vergleich der Abbildungen 6 und 8). Ab der ML-d abwärts betragen der  $iSR$  und der  $eSR$  zu Beginn der Messung jeweils  $\approx 15 \text{ kg/h}$ , sodass sich ein resultierender Gesamtmassenstrom von  $0 \text{ kg/h}$  ergibt. Diese Fluidbewegung ist auf die Speicherkonditionierung (Austausch des kälteren Speicherwassers mit  $40^\circ\text{C}$  warmem Wasser) zurückzuführen, welche kurz vor dem Versuch stattfindet. Kontrollmessungen ergaben auch nach einer Ruhephase über mehrerer Stunden eine Fluidbewegung im Speicher. Der  $iSR$  an den horizontalen Messlinien wird als Indikator für die Eindringtiefe des Beladefluids im Beladerohr verwendet. Als Grenzwert für ein Eindringen des Beladefluids an einer Messlinie wird nachfolgend ein  $iSR_{\text{grenz}} = 20 \text{ kg/h}$  festgelegt. Damit vereinzelte Massenstrommaxima zu keiner Verfälschung der Eindringtiefe führen, werden zunächst fünf aufeinander folgende  $iSR$ -Messwerte arithmetisch zu  $iSR^*$  gemittelt. Übersteigt dieser Mittelwert den festgelegten Grenzwert, hat die Eindringtiefe die entsprechende Messlinie erreicht. In Abbildung 9 wird der  $iSR$  für alle horizontalen Messlinien unterhalb des ersten Auslasses (b bis m) für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Die

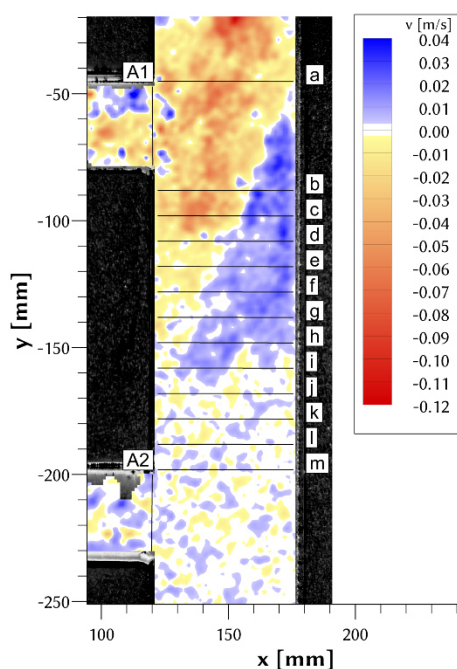


Abbildung 7:  $v$ -Geschwindigkeitskomponente zum Messzeitpunkt  $t = 484 \text{ s}$

Übersteigt dieser Mittelwert den festgelegten Grenzwert, hat die Eindringtiefe die entsprechende Messlinie erreicht. In Abbildung 9 wird der  $iSR$  für alle horizontalen Messlinien unterhalb des ersten Auslasses (b bis m) für den gesamten Messzeitraum dargestellt. Die

gestrichelte Linie stellt den Zeitpunkt dar, an dem der gemittelte  $iSR^*$  erstmals den Grenzwert überschreitet, d. h.  $iSR^* \geq iSR_{\text{grenz}}$ . Demnach bewegt sich die Eindringtiefe bis zur Messzeit  $t \approx 450$  s bzw. bis zum Erreichen der ML-g nahezu linear mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,1 mm/s. Es folgt ein Sprung der Eindringtiefe auf ML-h und eine weitere Strömungsinstabilität zum Zeitpunkt  $t \approx 600$  s (ML-j). Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Eindringtiefe zwischen dem Zeitpunkt  $t \approx 450$  s bzw. der ML-g bis zum Erreichen der untersten Messlinie m bei  $t \approx 750$  s verdoppelt sich auf ca. 0,2 mm/s.

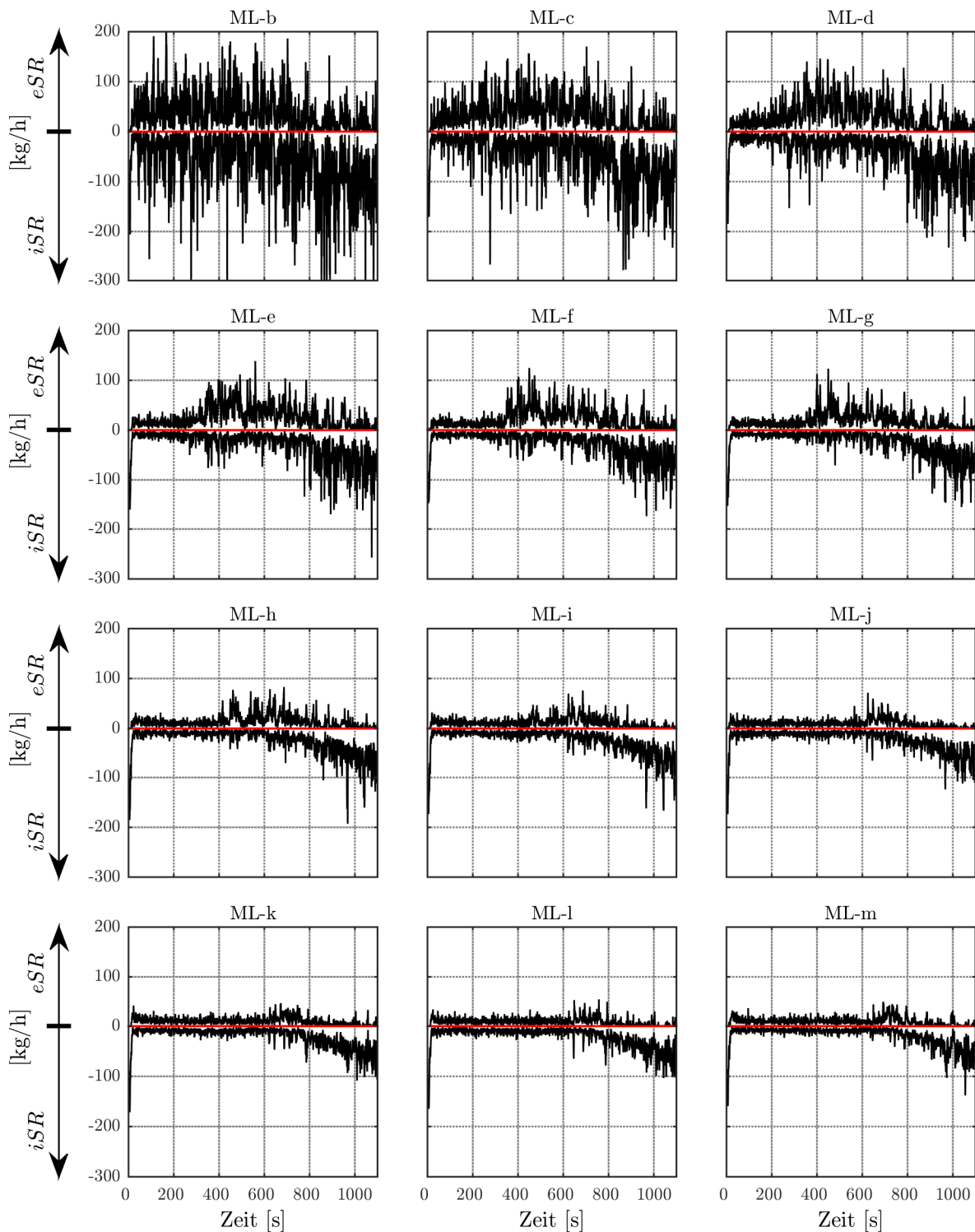


Abbildung 8: Massenströme ( $iSR$  und  $eSR$ ) an den horizontalen Messlinien b bis m im Belader

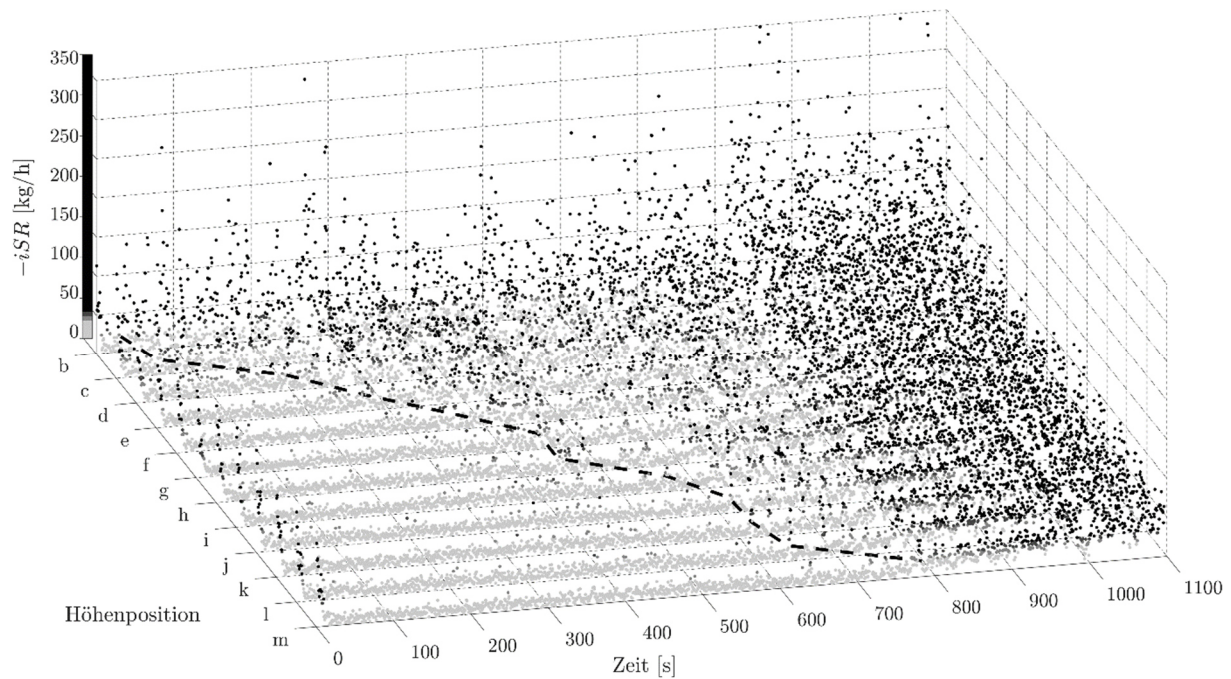


Abbildung 9:  $-iSR$  über den gesamten Messzeitraum für alle horizontalen Messlinien unterhalb des ersten Auslasses (b bis m) sowie zeitliche und örtliche Darstellung der Eindringtiefe (gestrichelte Linie) mit einem Grenzwert von 20 kg/h

Abbildung 10 stellt die Häufigkeit von  $iSR^* \geq iSR_{\text{grenz}}$  an den horizontalen Messlinien b bis m dar. Das eindringende Beladefluid erreicht zeitlich verzögert mit ML-b von oben beginnend alle Messlinien. Nachdem der  $iSR_{\text{grenz}}$  erstmals überschritten wurde, steigt  $iSR^*$  an fast allen Messlinien nahezu linear. Zum Zeitpunkt  $t \approx 450$  s flacht der Anstieg von  $iSR^*$  an ML-c und ML-d jedoch sprunghaft ab bzw. an den Messlinien e und f bleibt die Häufigkeit von  $iSR^*$  über einen Zeitraum von ca. 100 s nahezu konstant. Danach findet wieder eine ansteigende Zunahme von  $iSR^*$  statt. Gleichzeitig dringt zu  $t \approx 450$  s erstmals Fluid bis zu den Messlinien g und h vor, wobei dann über ca. 150 s keine weitere Überschreitung von  $iSR_{\text{grenz}}$  eintritt. Schließlich können zu  $t \approx 750$  s alle Messlinien vom eindringenden Beladefluid erreicht werden. Der Anstieg ist ab diesem Zeitpunkt für alle Messlinien identisch. Die relativ eng zusammenliegenden Messwerte von ML-e bis ML-m deuten auf das bereits erwähnte beschleunigte Vordringen der Eindringtiefe hin. Eine Untersuchung des  $iSR$  auf Periodizität mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) ergibt einen hohen Nullanteil, sodass keine dominierende Frequenz an den horizontalen und vertikalen Messlinien existiert. Die spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density) beschreibt die Energieverteilung eines beliebigen, nicht zwingend periodischen Signals über sein Frequenzspektrum. Die Analyse des  $iSR$  an den horizontalen Messlinien b bis m ergibt zunächst eine relativ hohe Leistungsdichte im niederfrequenten Bereich, welche bis ca. 0,4 Hz an allen Messlinien abfällt und dann ein konstantes Niveau hält (Abbildung

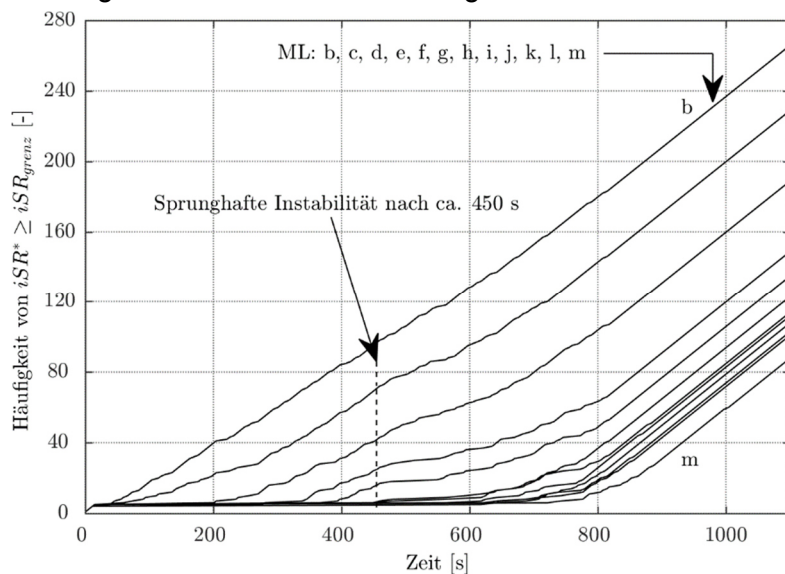


Abbildung 10: Häufigkeit der Grenzwertüberschreitungen von  $iSR^*$  an den horizontalen Messlinien b bis m über den gesamten Messzeitraum

11 links). Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt die Leistungsdichte ab. Die rechte Seite in Abbildung 11 stellt die kubisch interpolierten relativen spektralen Leistungsdichten dar (Division aller Funktionswerte durch maximalen Funktionswert). Die Abbildung verdeutlicht, dass ab ML-f abwärts eine Konzentration der Leistungsdichte im niederfrequenten Bereich besteht und dass zwischen 0 Hz und 0,1 Hz nur geringe Abweichungen bestehen.

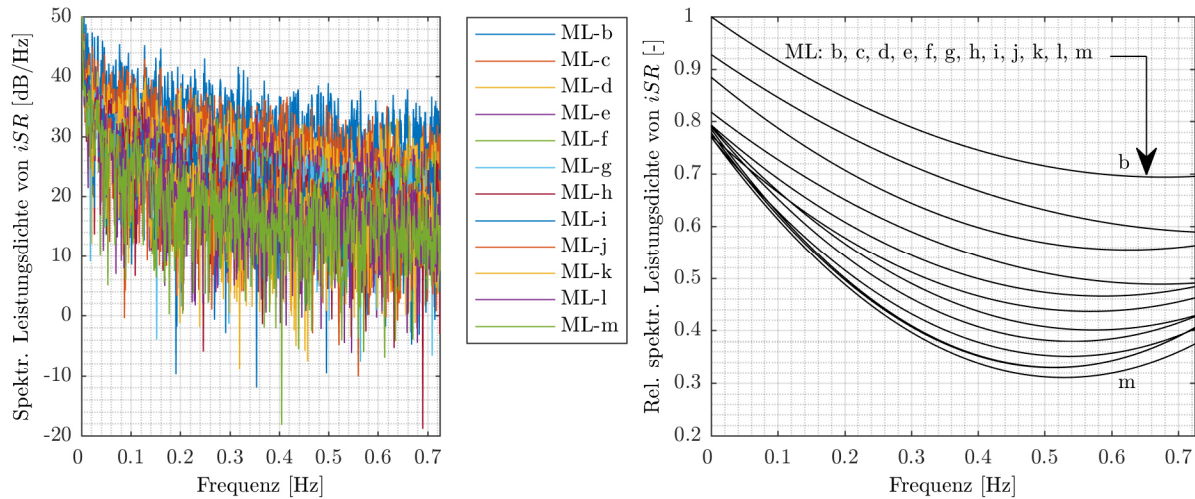


Abbildung 11: Darstellung der spektralen Leistungsdichte von  $iSR$  an den horizontalen Messlinien b bis m links und der kubisch interpolierten relativen spektralen Leistungsdichte rechts

## Ergebnisse der PLIF-Untersuchungen

Anhand der PLIF-Untersuchung kann der Dichtesprung zwischen dem zuströmenden warmen Beladefluid und dem kälteren, bereits im Speicher befindlichen Fluid direkt identifiziert werden. Danach ist vor allem zu Beladungsbeginn die Dynamik des Dichtesprungs nahezu identisch mit der Dynamik der Strömungsfront (Abbildung 12). Die Form und Lage des Dichtesprungs verändert sich dabei stochastisch, wobei dieser gleichzeitig konstant schmal bleibt. Aufgrund konvektiver Vorgänge und Wärmediffusion baut sich mit zunehmender Zeit vor der Strömungsfront eine Übergangszone im Belader auf (Abbildungen 13 und 14).

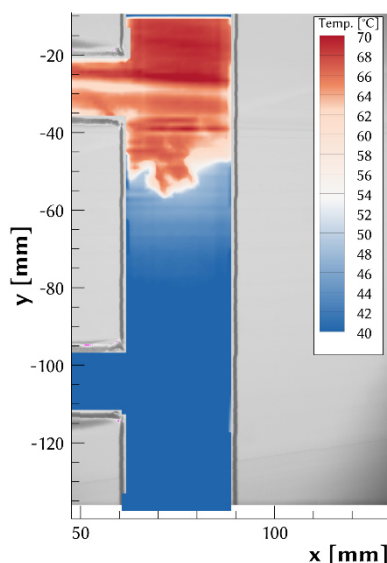


Abbildung 12: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader nach ca. 125 s

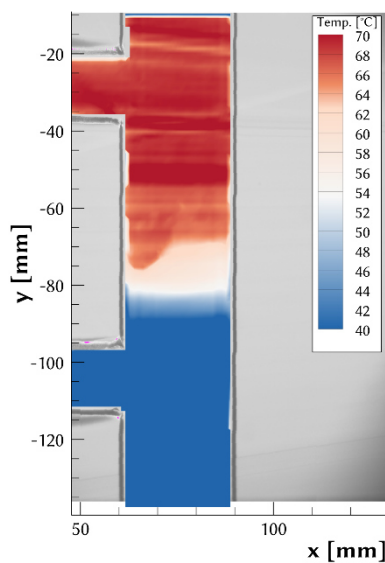


Abbildung 13: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader nach ca. 440 s

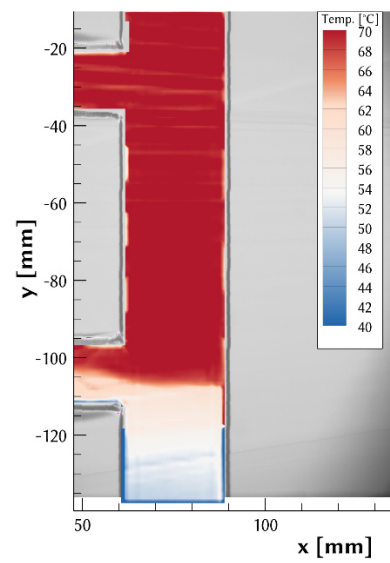


Abbildung 14: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader nach ca. 750 s

Dem eindringenden Beladefluid wirken somit abgeschwächte Auftriebskräfte entgegen. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass das Beladefluid ausschließlich aus dem ersten Auslass in den Speicher strömt. Die Abbildungen 15 bis 18 stellen den vertikalen Temperaturverlauf im Belader sowie im Speicher zu unterschiedlichen Messzeiten qualitativ dar. Die Übergangszone im Belader ist zu jedem Messzeitpunkt im Bereich 500 s bis 800 s schmaler als die Übergangszone im Speicher. Ab  $t \approx 620$  s erreicht die Übergangszone den Auslass 2. Zu dieser Beladezeit konnten die PIV-Messungen geringe Instabilitäten des *iSR* am Auslass 2 darstellen (Abbildung 6). Diese sind auf die bereits erwähnte etwas über dem Dichtesprung positionierte Eindringtiefe des Beladefluids zurückzuführen. Zu  $t \approx 700$  s wird ca. der halbe Querschnitt von A2 mit warmem Beladefluid durchströmt. Die Fluidtemperatur im Speicher ist zu diesem Zeitpunkt auf gleicher Höhe kälter, wodurch Auftriebskräfte eine Beschleunigung des austretenden warmen Fluids bewirken und es dadurch zu einer Einschnürung des *iSR* im Auslass kommt. Ab ca. 800 s ist der gesamte Querschnitt von A2 vom Beladefluid durchströmt, wobei weiterhin eine leichte Einschnürung des *iSR* im Auslass beobachtet werden kann. Im weiteren Verlauf dringt der Dichtesprung bzw. die Strömungsfront immer tiefer. Die Einschnürung im Auslass nimmt mit zunehmenden *iSR* und gleichzeitig sinkender Temperaturdifferenz zwischen dem austretenden Fluid und dem auf gleicher Höhe befindlichen Speicherfluid ab.

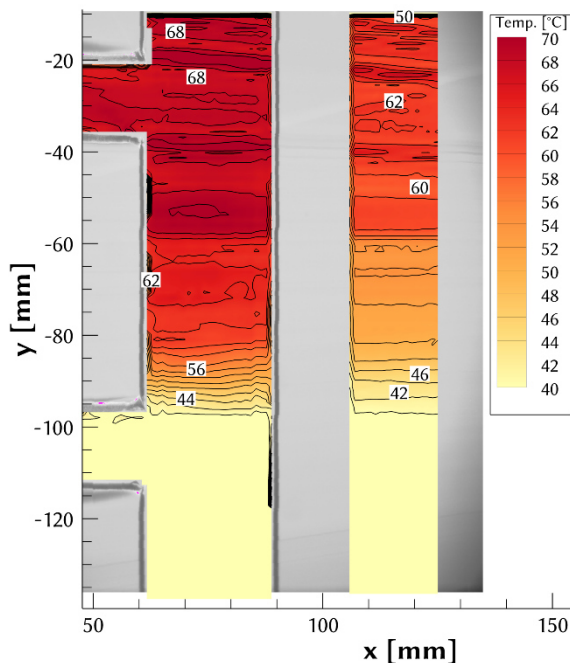


Abbildung 15: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader (links) und Speicher (rechts) nach ca. 500 s

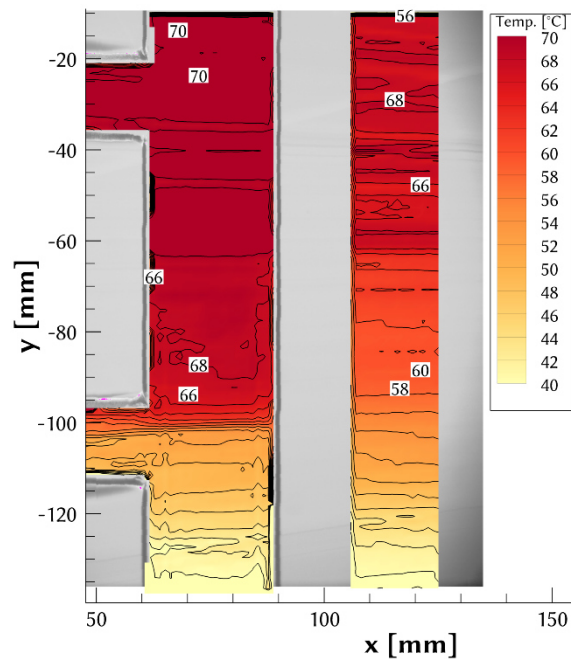


Abbildung 16: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader (links) und Speicher (rechts) nach ca. 600 s



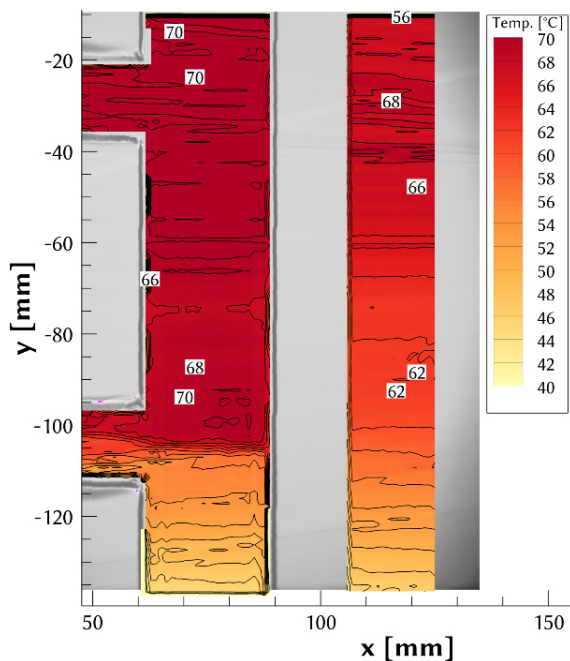


Abbildung 17: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader (links) und Speicher (rechts) nach ca. 700 s

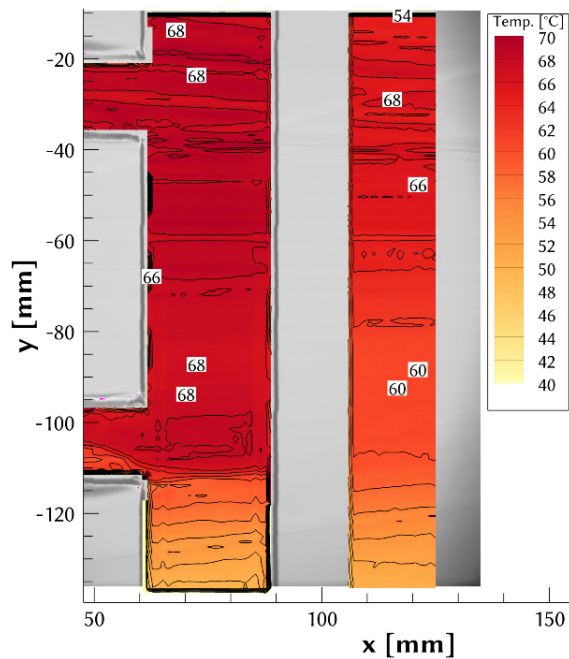


Abbildung 18: Vertikaler Temperaturverlauf im Schichtenlader (links) und Speicher (rechts) nach ca. 800 s

## Fazit

In diesem Beitrag standen Untersuchungen zu Strömungseffekten in Schichtenladern für Warmwasserspeicher im Mittelpunkt. PIV/PLIF-Messungen ermöglichen eine quantitative und qualitative Darstellung der komplexen und stochastischen Hydrodynamik im Belader. Es können sprunghafte Instabilitäten an der Strömungsfront sowie eine ungleichmäßige Eindringgeschwindigkeit festgestellt werden. Des Weiteren dringt die Strömungsfront zunächst nahezu identisch mit dem Dichtesprung in den Belader ein. Mit fortschreitender Zeit bildet sich unterhalb der Eindringtiefe eine thermische Übergangszone aus, sodass warmes Fluid bereits vor der Strömungsfront den zweiten Auslass erreicht. Das Verständnis der hydrodynamischen Vorgänge in einem Warmwasserspeicher kann mit den gewonnenen Erkenntnissen verbessert werden. Für eine detaillierte Analyse der erkannten Effekte müssen weitere experimentelle und simulative Untersuchungen durchgeführt werden.

## Literatur

**Buhl M., Platzer B., 2016:** „Probleme bei der Erfassung des Ausströmverhaltens eines einfachen Schichtenladern mittels PIV/PLIF“, 24. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“ 6. – 8. September 2016, Cottbus

**Göppert S., Urbaneck T., Schirmer U., Lohse R., Platzer B., 2008:** „Be- und Entladesysteme für thermische Schichtenspeicher: Teil 1 – Überblick“, Chem. Ing. Tech. J. 2008, 80 (3), 287 – 293

**Göppert S., Urbaneck T., Schirmer U., Lohse R., Platzer B., Steinert P., 2010:** „Einfache Methode zur Berechnung des Ausströmverhaltens von Schichtenladern thermischer Speicher“, Chem. Ing. Tech. J. 2010, 82 (5), 681 – 691

**Lohse R., Göppert S., Kunis C., Urbaneck T., Schirmer U., Platzer B., 2008:** „Be- und Entladesysteme für thermische Schichtenspeicher: Teil 2 – Untersuchungen des Beladeverhaltens“, Chem. Ing. Tech. J. 2008, 80 (7), 935 – 943