

Kombinierte Geschwindigkeits- und Temperaturfeldmessungen in thermischen Schichtenspeichern

Combined velocity and temperature field measurements in stratified hot water storage tanks

Henning Otto, Christian Resagk und Christian Cierpka

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau
Am Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau

Schlagworte: Thermischer Energiespeicher, Background-Oriented Schlieren (BOS), PIV
Key words: Thermal energy storage (TES), Synthetic schlieren, PIV,

Zusammenfassung

Thermische Energiespeicher (TES) sind ein wesentlicher Bestandteil von Systemen zur Nutzung solarer Energie oder industrieller Abwärme. In Form einer Carnot Batterie können sie zudem über eine Strom-Wärme-Strom Kopplung großindustriell als Speichersystem für erneuerbare Energien verwendet werden. Moderne geschichtete TES nutzen den thermischen Dichtegradienten des Speichermediums, um eine stabile Schichtung von heißem über kaltem Fluid zu erzeugen. Wasser ist eines der am häufigsten verwendeten Speichermedien und ermöglicht in der Regel einen hohen thermischen Wirkungsgrad und damit eine langfristige Speicherung der Energie in geschichteten TES. Die Wände der meisten TES bestehen aus Materialien, deren Temperaturleitfähigkeit deutlich höher ist als die von Wasser. Daher bildet die Speicherwand eine Wärmebrücke zwischen der heißen und kalten Wasserschicht, die zu thermischer Konvektion im Inneren des TES führt. Dieser Effekt hat das Potenzial, die Schichtung durch unerwünschte Vermischung der beiden Schichten zu stören und damit die Speicherzeit und die Gesamteffizienz des Speichersystems zu verringern. Zur Untersuchung dieser Strömungen wurde ein Modellexperiment eines geschichteten TES mit einer eingesetzten, stark wärmeleitenden Wand entwickelt. Darin wurden *Particle Image Velocimetry* (PIV) Messungen nahe dieser Wand durchgeführt, die zwei vertikale Konvektionsströmungen gezeigt haben. Eine fließt vom oberen Bereich an der Wand entlang nach unten, während die andere aus dem unteren Bereich nach oben strömt. In der mittleren Übergangszone zwischen heißer und kalter Schicht treffen diese beiden Strömungen aufeinander, werden seitlich abgelenkt und erzeugen dabei Instabilitäten, welche die Schichtung negativ beeinflussen. Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können wurde die *Background-Oriented Schlieren* Methode in den bestehenden PIV Aufbau implementiert. Diese Methode nutzt Änderungen im Brechungsindex eines Fluides, die durch Dichtegradienten verursacht werden, um optische Verzeichnungen eines Hintergrundbildes hervorzurufen. Mit Hilfe eines typischen PIV Algorithmus kann diese Verschiebung ausgewertet und anschließend in eine Dichte und somit bei inkompressiblen Medien direkt in die Temperatur umgerechnet werden. Somit gibt dieses Messverfahren Rückschlüsse auf das Temperaturfeld in der geschichteten Speicherzelle und ermöglicht dessen Einfluss auf die Strömung zu bestimmen. Erste Messungen haben gezeigt, dass die Methode geeignet ist, die Dichtegradienten in thermisch geschichteten Speichern zu untersuchen.

Einleitung

Mit der Entscheidung der deutschen Regierung, eine Energiewende zu vollziehen, ist die Notwendigkeit für neue und effiziente Energiespeichertechnologien in Deutschland stark angestiegen. Kohle- und Atomkraftwerke sollen vom Stromnetz genommen werden, sodass diese Lücke in der Energieversorgung durch erneuerbare Energien geschlossen werden muss. Vor allem Windräder und Photovoltaikanlagen zählen zu den meist genutzten Energiequellen. Bislang ist es jedoch nur begrenzt möglich die Energieversorgung mit diesen Anlagen durchzuführen, da sie nicht auf Abruf Energie bereitstellen können.

Energiespeicher können diesen Mangel ausgleichen und darüber hinaus zur Speicherung der überschüssigen Energie die Kraftwerke genutzt werden. Thermische Energiespeicher haben im Vergleich zu Batteriespeichern oder chemischen Speichern eine geringe Energiedichte, zeichnen sich jedoch dadurch aus, dass sie aus leicht verfügbaren und ungiftigen Rohstoffen bestehen und nahezu überall errichtet werden können [Thess et al. 2015]. Der effektivste Weg sie zu betreiben liegt in der Erzeugung einer thermischen Schichtung. Dabei wird der thermische Dichtegradient des Speichermediums genutzt um heißes Fluid über dichterem, kalten Fluid in den Speicher einzuleiten. Dies erzeugt eine prinzipiell stabile Schichtung. Durch den Einsatz von Wasser als Speichermedium, das eine niedrige thermische Diffusivität von $a_W = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ bei gleichzeitig hoher Wärmekapazität von $c_W = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ hat, ist es generell möglich die thermische Schichtung ohne Durchmischungen lange aufrecht zu erhalten.

Allerdings treten in realen thermischen Schichtenspeichern Wärmeübergangsprozesse auf, die das Speichermedium in einigen Bereichen abkühlen oder aufheizen. Dadurch verursachte thermische Konvektion kann zu einer ungewollten Durchmischung der Schichtung führen und damit die Effizienz des Speichers stark beeinträchtigen. Abb. 1 zeigt zwei wesentliche Wärmeübertragungsprozesse in thermischen Schichtenspeichern.

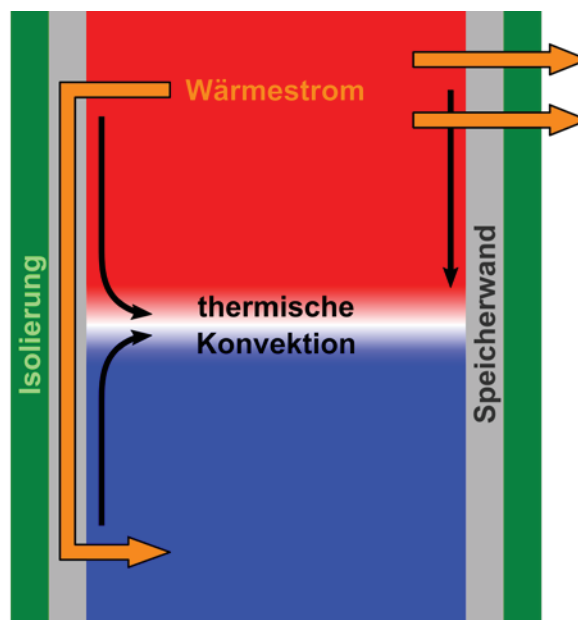


Abb. 1 Wärmeübergangsprozesse in thermischen Schichtenspeichern und dadurch verursachte thermische Konvektion.

Auf der rechten Seite ist der Wärmestrom gezeigt, der von dem heißen Bereich der Schichtung (rot) durch die Speicherwand und die Speicherisolierung zur Umgebung strömt. Dieser stellt die unvermeidlichen Energieverluste von Speichern für sensible Wärme dar. Der Wärmestrom kühlt das Speicherfluid in den wandnahen Bereichen der heißen Schicht ab. Dieses beginnt

aufgrund seiner gesteigerten Dichte nach unten zu sinken (schwarzer Pfeil). Diese Konvektionsströmung trifft auf den Grenzbereich der heißen und kalten Schicht und kann dort Instabilitäten in der Schichtung verursachen, die zur Durchmischung führen. Mit Hilfe moderne Wärmeisolationskonzepte können diese hier gezeigten Wärmeverluste bereits heute weitestgehend unterbunden werden. Dadurch treten nicht nur weniger Energieverluste auf, sondern auch die damit einhergehende thermische Konvektion wird deutlich verringert. Ein Beispiel eines solchen Isolationskonzepts sind Vakuum-Isolations-Paneele, die zur Dämmung von thermischen Energiespeichern eingesetzt werden können.

Auf der linken Seite der Abbildung wird ein zweiter Wärmestrom gezeigt, der ebenfalls thermische Konvektion innerhalb eines Schichtenspeichers verursachen kann. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der thermischen Speicher aus Metall gebaut werden. Die thermische Diffusivität der Wände ist damit deutlich höher als die von Wasser. Somit bilden die Seitenwände des Speichers eine Wärmebrücke zwischen der oberen, heißen und unteren, kalten Fluidschicht. Der daraus resultierende Wärmestrom durch die Speicherwand kühlt das wandnahe Fluid im oberen Bereich ab und erwärmt das kalte Fluid im unteren Bereich. Dies verursacht ebenfalls thermische Konvektion, die die Schichtung beeinträchtigt jedoch nicht von einer besseren Außenisolierung verhindert werden kann [Otto et al. 2018].

Aus diesem Grund ist es notwendig diese parasitären Strömungen und ihre Auswirkungen genauer zu charakterisieren, um anschließend daraus Lösungsansätze zur Unterbindung der negativen Effekte ableiten zu können.

Modellexperiment und Messaufbau zur Geschwindigkeitsmessung

Aufgrund ihrer Größe und ihrer eingeschränkten optischen Zugänglichkeit sind konventionelle thermische Schichtenspeicher nur schlecht dazu geeignet diese parasitären Konvektionsströmungen zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde ein Modellexperiment entworfen, das die Strömungsvorgänge eines thermischen Schichtenspeichers in einem verkleinerten Volumen und bei guter optischer Zugänglichkeit nachbildet. Dazu wurde eine rechteckige Speicherzelle aus Polycarbonat mit einer Höhe von 750 mm und einer Grundfläche von $375 \times 375\text{ mm}^2$ gebaut. Optional kann in diese Zelle an einer Seite eine Aluminiumplatte eingesetzt werden, die als Speicherseitenwand mit hoher thermischer Diffusivität dient. Das Polycarbonat hat mit $a_{PC} = 0,13 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ annähernd die gleiche thermische Diffusivität wie Wasser, während die von Aluminium mit $a_{Al} = 99 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ etwa zwei Größenordnungen höher ist. Dadurch findet der Temperaturengleich der eingebrachten thermischen Schichtung in der Speicherzelle in den Polycarbonatwänden etwa so schnell wie im Wasser selbst statt und induziert keine parasitären Strömungen. Die Aluminiumwand wirkt hingegen als Wärmebrücke zwischen den beiden Temperaturschichten, über die der Temperaturengleich deutlich schneller voranschreiten kann als im Wasser. Die dadurch hervorgerufenen Konvektionsströmungen können somit durch die transparenten Seitenwände mit bildgebenden Messverfahren untersucht werden.

Abb. 2(a) zeigt den dafür verwendeten Messaufbau zur Messung der Konvektionsströmungen in direkter Nähe zur Aluminiumwand mittels *Particle Image Velocimetry* (PIV). Abb. 2(b) zeigt ein Foto der Speicherzelle inklusive der mittig positionierten Messlanze zur Überwachung der thermischen Schichtung im Speichermedium. An ihr sind 15 Thermoelemente vom Typ K im Abstand von jeweils 50 mm angebracht. In der Aluminiumplatte sind jeweils in der gleichen Höhe 15 PT100-Elemente in eine Nut eingelassen. Mit ihnen wird das Temperaturprofil in der Aluminiumplatte gemessen.

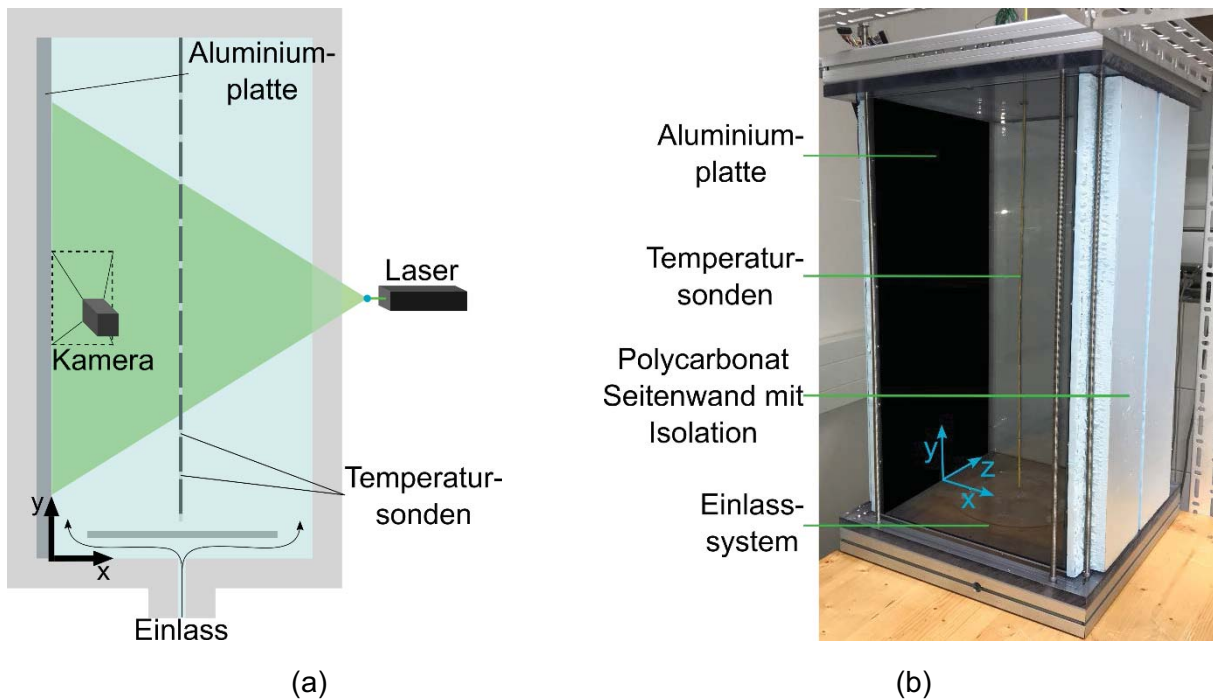


Abb. 2 (a) Schematische Darstellung des PIV Messaufbaus inklusive Speicherzelle, Kamera und Laser. (b) Foto der Speicherzelle mit eingesetzter Aluminiumplatte und isolierten Seitenwänden.

Zur Befüllung der Speicherzelle befindet sich ein Einlasssystem in der Mitte der Bodenplatte. Dieses besteht aus einem Zulauf mit darüber angeordneter Prallplatte. Diese bremst das einfließende Wasser und verhindert so, dass der Schichtungsprozess gestört wird. Vor dem Beginn einer Messung kann somit zunächst das heiße Wasser bis zur Hälfte der Speicherzelle eingefüllt werden. Anschließend wird das kalte Wasser in die Zelle gefüllt, das aufgrund seiner höheren Dichte unter dem heißen Wasser die kalte Schicht bildet.

Geschwindigkeitsmessungen mittels PIV

Abb. 3 zeigt die gemittelten Ergebnisse der PIV Messungen nahe der Aluminiumwand ($x = 0 \text{ mm}$) in drei verschiedenen Höhen. Abb. 3(b) zeigt die Grenzschichtmessung auf halber Zellhöhe ($y = 375 \text{ mm}$) im Übergangsbereich von kalter zu heißer Schicht. Zusätzlich wurde eine Messung 120 mm unterhalb (Abb. 3(a)) und 120 mm oberhalb (Abb. 3(c)) dieses Bereichs durchgeführt.

Bei der Erzeugung der Schichtung dieser drei Messungen lagen die gemessenen Einlasstemperaturen für die heißen Schichten zwischen 58 und 60°C und für die kalten Schichten zwischen 6 und 7°C . Da sich die Wände der Speicherzelle diesen Temperaturen angleichen und bereits während des Befüllvorgangs thermische Diffusion stattfindet, lagen die Temperaturen des geschichteten Wassers nach Abschluss der Befüllung schließlich zwischen 52 und 53°C im heißen Bereich und zwischen 9 und 11°C in der kalten Schicht.

Zur Aufnahme der PIV Bilder wurde eine sCMOS Kamera mit einer Auflösung von $2560 \times 2160 \text{ px}$ und einer Pixelgröße von $6,5 \times 6,5 \mu\text{m}^2$ in Verbindung mit einem Objektiv der Brennweite 100 mm und einer minimalen Blendenzahl von $f/1,4$ verwendet. Daraus ergibt sich ein Messbereich von $41 \times 35 \text{ mm}^2$ bei einer Auflösung von 62 px mm^{-1} . Zur Beleuchtung der Partikel wurde ein Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsenergie von ca. 20 mJ zur Erzeugung des Lichtschnitts eingesetzt.

Alle Aufnahmen wurden bei einer konstanten Bildwiederholfrequenz von 5 Hz durchgeführt. Die Ergebnisse in Abb. 3(a) und Abb. 3(b) ergeben sich aus der Vektormittelung von jeweils

499 Vektorfeldern. Zur Auswertung wurden die Daten mehrfach mit kleiner werdender Größe der Auswertefenster prozessiert. Die finale Fenstergröße beträgt hierbei $12 \times 12 \text{ px}$ und ergibt eine Auflösung von $0,19 \times 0,19 \text{ mm}^2$.

Da das Geschwindigkeitsfeld, im Messbereich von Abb. 3(c) deutlich stärkeren Fluktuationen unterlag, musste hier eine andere Auswertemethode herangezogen werden. Die Abbildung zeigt ein Mittelwertbild von insgesamt 9000 Aufnahmen. Bevor die Mittelung durchgeführt wurde, wurden dazu zunächst quasiinstantane Vektorfelder mit Hilfe des *Pyramid Sum of Correlation* Algorithmus mit einer gaußschen Gewichtung berechnet. Dabei werden wie auch beim *Sum of Correlation* Algorithmus die Korrelationsebenen mehrerer Bildpaare aufsummiert. Zusätzlich werden hierbei jedoch nicht nur direkt aufeinanderfolgende Bilder korreliert, sondern beispielsweise auch das erste mit dem dritten Bild. Dadurch können gleichzeitig langsame und schnellere Strömungen ausgewertet werden [Raffel et al. 2018].

Im hier vorliegenden Fall wurde diese Auswertungsmethode auf jeweils 5 Bilder angewendet, sodass die zeitliche Mittelung dieser Methode im Verhältnis zu der Zeit, in der sich die Strömung geändert hat, klein war. Die örtliche Auflösung der Ergebnisse konnte durch die zeitliche Mittelung auf $8 \times 8 \text{ px}$ oder $0,13 \times 0,13 \text{ mm}^2$ gesteigert werden.

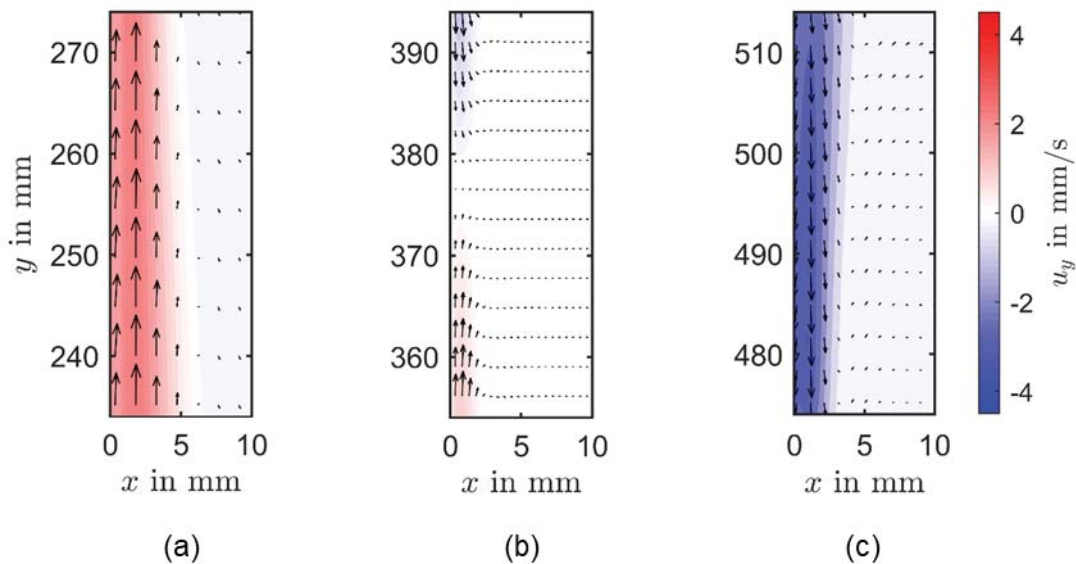


Abb. 3 Gemittelte Geschwindigkeitsfelder der PIV Messungen nahe der Aluminiumwand ($x = 0$). Für jede der drei Messposition (a), (b) und (c) wurde die Zelle neu befüllt und die Messung wurde jeweils fünf Minuten nach dem Beenden des Befüllvorgangs gestartet.

Die Ergebnisse aus Abb. 3 zeigen zwei vertikale Strömungen, die entlang der der Aluminiumwand verlaufen. Aus dem unteren, kalten Bereich steigt das von der Aluminiumwand erwärmte Wasser auf, während das im heißen, oberen Bereich abgekühlte Wasser an der Wand herabsinkt. In der Mitte, wo sich thermische Übergangszone befindet, treffen diese beiden Konvektionsströmungen aufeinander. Dabei werden sie seitlich in horizontale Richtung umgelenkt und fließen mit deutlich verminderter Geschwindigkeit zur Mitte der Speicherzelle.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die aufsteigende vertikale Strömung im unteren Bereich mit 4 bis 5 mm s^{-1} etwas breiter ist als die ca. 3 bis 4 mm dicke Strömung im oberen Bereich. Die Gemittelten Geschwindigkeiten zeigen, dass die Konvektion im heißen Teil der Schichtung mit bis zu 4 mm s^{-1} deutlich schneller als die maximal 2,5 mm s^{-1} schnelle Strömung im unteren Bereich ist.

Beide Effekte, die dickere Konvektionsschicht im kalten Wasser und die schnellere Strömung im warmen Wasser, sind unter anderem auf die temperaturabhängigen Stoffeigenschaften von

Wasser zurückzuführen. Dessen Viskosität nimmt bei steigender Temperatur ab, was in diesem Fall eine Änderung der kinematischen Viskosität um den Faktor $v_{\text{heiß}}/v_{\text{kalt}} = 0,42$ bewirkt. Die verringerte Scherspannung im heißen Bereich bewirkt einen dünneren Wandstrahl und begünstigt gleichzeitig höhere Strömungsgeschwindigkeiten.

Implementierung der Background-Oriented Schlieren Methode

Um die genauen Vorgänge der wandnahen Strömungen besser verstehen zu können, ist die Kenntnis des Temperaturfeldes in der Speicherzelle von großem Vorteil. Aus diesem Grund soll die Implementierung der *Background-Oriented Schlieren* Methode (BOS) genutzt werden, um das Dichtefeld in der Speicherzelle zu bestimmen und daraus auf die Temperaturverteilung zurückzuschließen. Diese Messtechnik bietet den Vorteil, dass sie an einem bestehenden PIV Messaufbau relativ schnell implementiert werden kann, da sie kaum zusätzliche Messinstrumente benötigt. BOS basiert auf dem Effekt, dass Dichtegradienten in einem Fluid dessen Brechungsindex ändern. Sieht ein Betrachter durch dieses Fluid auf einen Hintergrund, so wird dieser durch den leicht veränderten Weg des Lichts scheinbar verschoben. Diese scheinbare Verschiebung kann mit Hilfe eines vordefinierten Hintergrundbildes und eines typischen PIV Algorithmus ausgewertet werden. Die so gemessenen Dichtegradienten sind bei natürlicher Konvektion direkt mit dem Temperaturgradienten verknüpft [Raffel 2015].

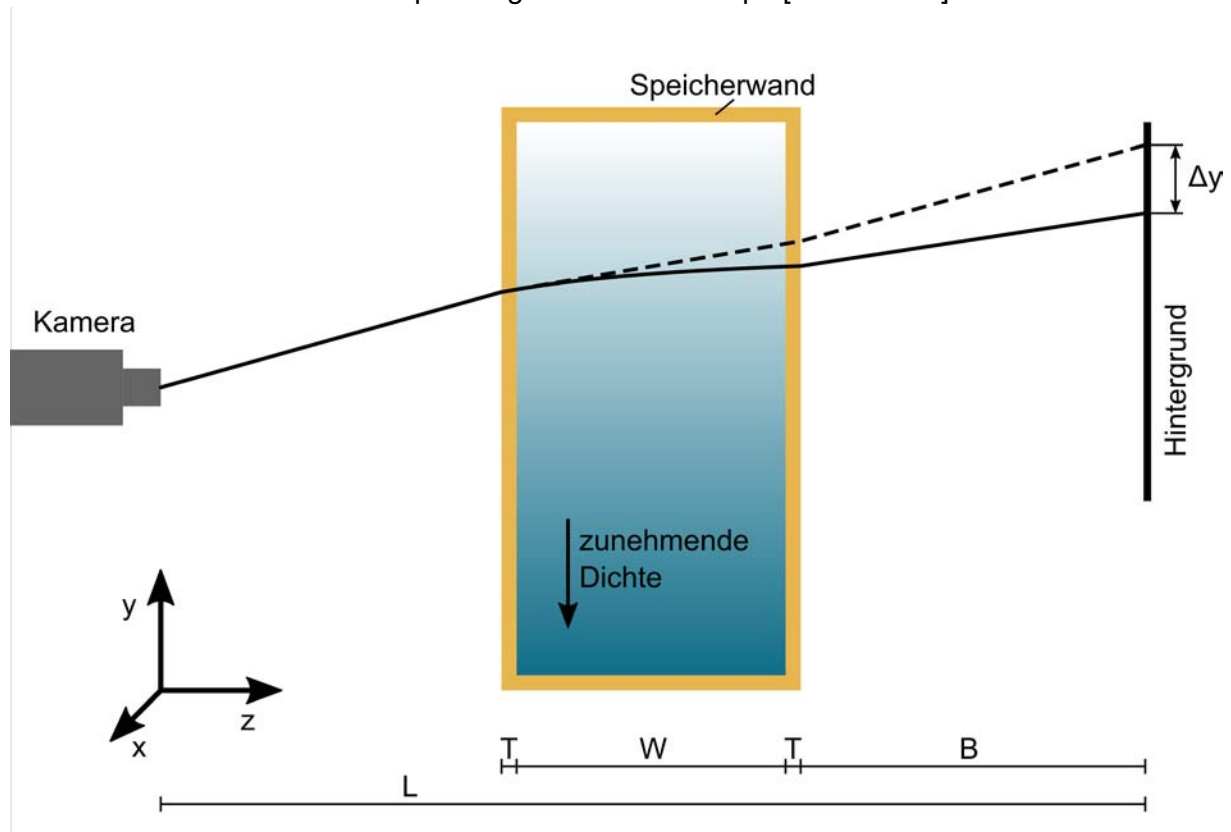


Abb. 4 Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus zur Messung des Dichtefeldes mit Hilfe der Background Oriented Schlieren Methode. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf eines Lichtstrahls von der Kamera, durch die Speicherzelle hin zum Hintergrundbild für den Fall, dass keine Schichtung in der Zelle vorliegt. Die durchgezogene Linie zeigt, wie der Gradient des Brechungsindex im Wasser bei einer thermischen Schichtung den Lichtstrahl ablenkt und so zu einer scheinbaren Verschiebung des Hintergrundbildes führt (siehe auch: [Dalziel et al. 2000]; [Dalziel et al. 2007]).

Abb. 4 zeigt schematisch die Anwendung der BOS Methode für die Speicherzelle mit thermisch geschichtetem Wasser. Durch den veränderten Brechungsindex des Wassers bei vorhande-

ner thermischer Schichtung wird ein Lichtstrahl, der von der Kamera aus durch die Speicherzelle auf den Hintergrund scheint (durchgezogene Linie) in der Speicherzelle nach unten abgelenkt. Der gestrichelt dargestellte Verlauf dieses Strahls ohne vorhandene thermische Schichtung verdeutlicht, dass auf dem Kamerabild ein scheinbarer Versatz des Hintergrundes aus der Schichtung resultiert. Dieser Versatz Δy zeigt dabei in die Richtung der niedrigeren Dichte und damit in diesem Fall nach oben.

Da das Verfahren die Dichtegradien über die Tiefe aufsummiert, sollten der Brechungsindex nicht von der z -Richtung abhängen, wovon bei thermischen Schichtungen ausgegangen werden kann. Zudem sollte der Öffnungswinkel der Kamera möglichst klein sein, um den Einfluss des Betrachtungswinkels minimal zu halten.

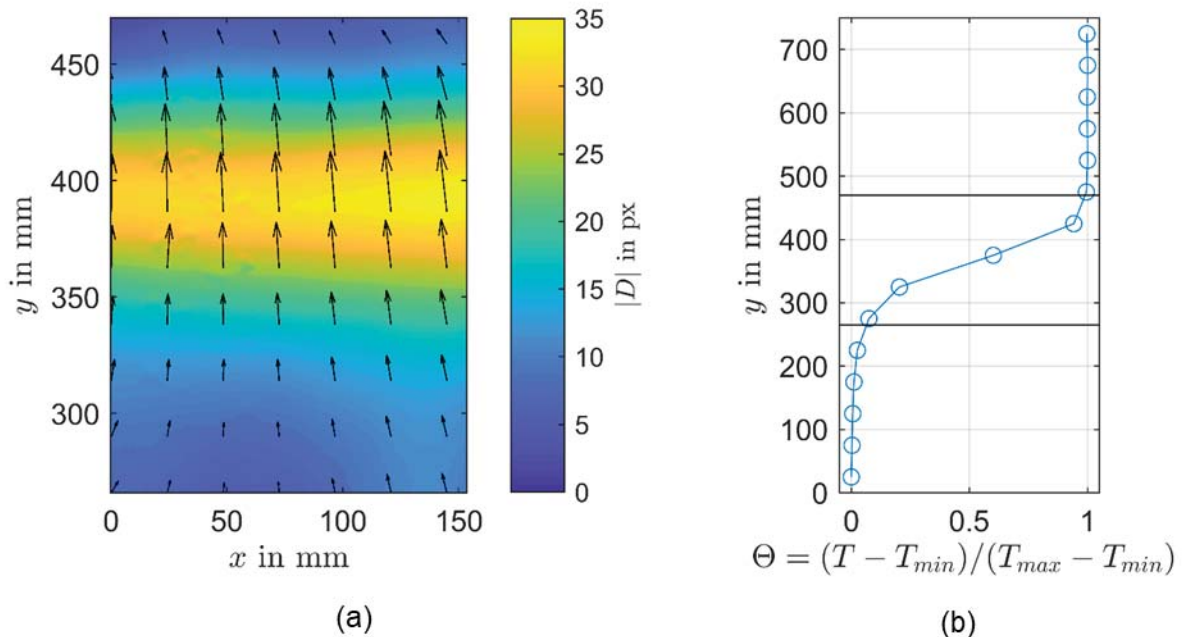


Abb. 5 (a) Verschiebung der optischen Abbildung auf dem Kamerasensor aufgrund einer thermischen Schichtung in Wasser. Der Konturplot zeigt den Betrag $|D|$ der Verschiebungsvektoren. (b) Temperaturprofil einer thermischen Schichtung in der Speicherzelle. Der Bereich zwischen den horizontalen Strichen zeigt den Messbereich der BOS Messung an. Dargestellt ist die Speicherzellenhöhe y über der normierten Temperatur Θ .

Abb. 5(a) zeigt eine erste Testmessung zur qualitativen Untersuchung des Dichteverlaufs in der thermischen Übergangszone der Schichtung. Die Messung wurde mit der gleichen Kamera wie die PIV Messungen durchgeführt. Es wurde ein Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm eingesetzt. Als Hintergrund wurde ein Muster zufällig angeordneter Punkte verwendet, das ausgedruckt und auf der Rückseite der Speicherzelle fixiert wurde. Damit der Hintergrund von der Kamera gut aufgenommen werden konnte, wurde es mit einer Lichtquelle von hinten beleuchtet. Die Abstände zwischen Kamera, Messvolumen und Hintergrund betragen $L = 755\text{ mm}$, $B = 0\text{ mm}$, $W = 375\text{ mm}$ und $T = 10\text{ mm}$ (entsprechend Abb. 4).

Für die Messung wurde zunächst ein Referenzbild aufgenommen. Dazu wurde die Speicherzelle mit Wasser bei Raumtemperatur befüllt, sodass möglichst keine thermische Konvektion in der Speicherzelle während dieser Aufnahme stattfinden konnte. Nach der Aufnahme des Referenzbildes wurde die Zelle entleert und erneut befüllt, um eine thermische Schichtung zu erzeugen. Nach Abschluss dieser Befüllung wurde dann das Messbild aufgenommen. In der Auswertung wurde der Versatz des Hintergrundes vom Referenzbild zum Messbild mittels eines PIV Algorithmus berechnet.

Das Ergebnis der Testmessung zeigt die Verschiebung $|D|$ des Hintergrundbildes aufgrund der thermischen Schichtung in der Speicherzelle. Wie bereits angeführt, zeigen die Verschiebungsvektoren in die Richtung niedrigerer Dichte, sodass im Falle einer stabilen thermischen Schichtung alle Vektoren nach oben zeigen müssen. Dies ist in der hier gezeigten Darstellung deutlich zu erkennen. Der Betrag der Verschiebung hängt von dem Dichtegradienten an der entsprechenden Stelle ab. Je größer der Gradient ist, umso stärker wird das Hintergrundbild dort verzerrt und umso größer fällt die Verschiebung aus. Daher ist in der Grafik der helle, ca. 50 mm hohe Bereich mit Verschiebungen von bis zu 35 px als die thermische Übergangszone auszumachen. In diesem Bereich steigen die Werte der Verschiebung sehr stark an und grenzen sich von der Umgebung ab, wo die Verschiebungen lediglich zwischen 5 und 10 px liegen. Abb. 5(b) zeigt zum Vergleich den Verlauf der dimensionslosen Temperatur θ über die Speicherhöhe y einer vergleichbaren Schichtung. Der Bereich zwischen den horizontalen Linien, der dem Messbereich der BOS Messung entspricht, stimmt mit den Ergebnissen aus Abb. 5(a) sehr gut überein. Auch hier geht die Temperatur langsam von einer homogenen kalten Schicht in einen starken Temperaturgradienten über, der dann wieder langsam abnimmt. Wie auch in der BOS Messung ist diese Zone ca. 50 mm hoch. Zudem ist zu erkennen, dass der Messbereich der BOS Messung etwas kleiner als die gesamte thermische Übergangszone ist. Wäre der Messbereich größer als diese Zone, müssten am oberen und unteren Ende Bereiche ohne Hintergrundverzerrung sein. Dies ist hier jedoch nicht der Fall.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Modellexperiment für die Untersuchung parasitärer Strömungen an stark wärmeleitenden Wänden in thermischen Schichtenspeichern entwickelt und gebaut. Geschwindigkeitsmessungen nahe dieser Wand wurden durchgeführt und haben thermische Konvektionsströmungen gezeigt, die eine lange Aufrechterhaltung der thermischen Schichtung verhindern. Um den Einfluss des Temperaturfeldes an diesen Strömungsphänomenen besser beurteilen zu können, wurde die *Background-Oriented Schlieren* Methode in den Aufbau implementiert. Erste Testmessungen mit dieser Messmethode haben deutlich gezeigt, dass sie geeignet ist, die thermische Schichtung in einer Speicherzelle qualitativ zu erfassen. Zukünftige Messungen sollen zeigen, ob sie sich auch für die Messung der Temperaturgrenzschicht an der Speicherwand eignet. Zudem sollen die Werte der Verschiebung in eine Dichteänderung umgerechnet werden, um aus dieser dann die Temperatur zu bestimmen.

Dankesworte

Die Arbeiten werden im Rahmen des „Europäischen Fonds für regionale Entwicklung“ (EFRE) und von der Thüringer Aufbaubank (2017 FE 9086) gefördert.

Literatur

- Thess, A., Trieb, F., Wörner, A., Zunft, S., 2015:** „Herausforderung Wärmespeicher“, Physik Journal, 14:33-39
- Otto, H., Resagk, C., Cierpka, C., 2018:** „Einfluss lokaler parasitärer Wandschichtströmungen in thermischen Energiespeichern“, 26. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Rostock
- Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C.J., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2018:** „Particle Image Velocimetry – A Practical Guide“, 3. Aufl., Springer International Publishing
- Raffel, M., 2015:** „Background-oriented schlieren (BOS) techniques“, Exp. Fluids, Vol. 56, No. 60
- Dalziel, S.B., Hughes, G.O., Sutherland, B.R., 2000:** „Whole-field density measurements by ‘synthetic schlieren’“, Exp. Fluids, Vol. 28, No. 4, pp. 322-335
- Dalziel, S.B., Carr, M., Sveen, J.K., Davies, P.A., 2007:** „Simultaneous synthetic schlieren and PIV measurements for internal solitary waves“, Meas. Sci. Technol., Vol. 18, No. 3, pp. 533-547