

Analyse der Strömungsfluktuationen in geschichteten thermischen Energiespeichern

Analysis of flow fluctuations in stratified thermal energy storage systems

C. Naumann, H. Otto, C. Cierpka

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau

Schlagworte: PIV, Exergie, thermischer Energiespeicher, Strömungsfluktuationen

Kurzfassung

Thermische Energiespeicher (TES) stellen eine effektive Lösung für das Speicherproblem von erneuerbaren, volatilen Energieträgern dar. Verwendet in einer Carnot Batterie, können sie überschüssige elektrische oder thermische Energie über eine Strom-Wärme-Strom Kopplung speichern und bei Bedarf bereitstellen. Eine verbreitete Bauart der TES sind thermische Schichtenspeicher, die den thermischen Dichtegradienten des flüssigen Speichermediums ausnutzen, um eine Schichtung von heißem über kaltem Fluid zu erzeugen. Vergangene Studien an einem Modellexperiment für thermische Schichtenspeicher haben gezeigt, dass die Wärmeleitung von der heißen, oberen Schicht in die kalte, untere Schicht durch die vertikale Außenwand mit höherer Wärmeleitfähigkeit zu wandnahen Ausgleichsströmungen (Wandstrahlen) und damit zu Exergieverlusten im Speichermedium führt. Die dafür durchgeführten, optischen Geschwindigkeitsfeldmessungen mittels Particle Image Velocimetry (PIV) haben außerdem Hinweise auf periodische Fluktuationen im Bereich der thermoklinen Zone gegeben, welche zum Mischungsvorgang der heißen und kalten Schicht beitragen und den Exergieverlust stark beschleunigen können. Um diese Fluktuationen genauer zu untersuchen, wurden zeitaufgelöste PIV-Messungen jeweils nahe des Wandstrahls und im Fernfeld der Wand durchgeführt und die Frequenzspektren analysiert. Die Ergebnisse zeigen Oszillationen mit charakteristischen Frequenzen der jeweiligen Region. Das Geschwindigkeitsfeld nahe der vertikalen Wand weist periodische Fluktuationen auf, die anhand ihrer charakteristischen Frequenz auf den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung zurückzuführen sind. Im Fernfeld liegt der Frequenzbereich der gemessenen Oszillation im Bereich der sog. Brunt-Väisälä Frequenz, die im Wesentlichen beschreibt, mit welcher Frequenz ein geschichtetes Fluid schwingt, wenn ein Fluidpaket von seiner Ruheposition durch Auftrieb aufgrund von lokalen Dichteunterschieden vertikal ausgelenkt wird. Außerdem zeigt sich, dass die Fluktuationen von den Randbereichen der thermoklinen Zone dominieren und sich in tiefere Regionen der Thermokline ausbreiten.

Einleitung

Erneuerbare Energiequellen sind von großer Bedeutung für die Bekämpfung des Klimawandels, indem sie konventionelle Kraftwerke, die fossile Brennstoffe verwenden, ersetzen [1]. Thermische Energiespeicher (TES) sind eine vielversprechende Lösung, um das Energiespeicherproblem zu lösen, das die meisten erneuerbaren Kraftwerke aufgrund ihrer unstetigen Energieversorgung haben [2]. TES-Systeme, als eine der Schlüsselkomponenten von Carnot-Batterien, können auch eine wichtige Rolle bei der Wärmespeicherung für industrielle und private Anwendungen spielen, insbesondere wenn es um saisonale Wärmespeicherung geht. Carnot-Batterien sind eine Kombination aus einer Wärmepumpe, einem TES und einer Wärmekraftmaschine, um überschüssige elektrische Energie in Wärme umzuwandeln, die im TES gespeichert wird und bei Bedarf wieder in Strom umgewandelt werden kann [3]. In Carnot-Batterien eingesetzt, haben TES daher das Potenzial, als saisonales Energiespeichersystem

sowohl für elektrische Energie als auch für thermische Energie eingesetzt zu werden. Eine spezielle und weit verbreitete Bauart der TES sind thermische Schichtenspeicher, welche die Temperaturabhängigkeit der Dichte des flüssigen Speichermediums nutzen, um eine thermische Schichtung von heißem über kalten Fluid zu erzeugen. So ist es möglich, den Speicher als Ein-Tank-System anstatt eines Zwei-Tank-Systems zu entwerfen. Durch ein solches Ein-Tank-System können die Speicherkosten durch Material- und Bauraumeinsparungen wesentlich reduziert werden. Für einen einwandfrei funktionierenden thermischen Schichtenspeicher ist es neben einer mischungsarmen Beladung essenziell, dass die heiße und kalte Fluidschicht dauerhaft gut voneinander getrennt gehalten werden.

Daher wird in dieser Arbeit die Strömungsdynamik solcher geschichteter TES untersucht, wobei im Einzelnen der Einfluss des inneren Wärmeübergangs von der oberen heißen Schicht zur unteren kalten Schicht aufgrund von hoch wärmeleitenden Seitenwandmaterialien von Interesse ist. In vorangegangenen Studien der Autoren wurde gezeigt, dass die hohe Wärmeleitfähigkeit der Seitenwand zu einer sinkenden Exergieeffizienz des TES führt, die durch die konvektive Durchmischung der beiden Schichten und die damit verbundene Entropieproduktion verursacht wird [4]. In einem sehr gut isolierten 2 m³ thermischen Schichtenspeicher dominiert der vertikale Wärmeübergang und diese Phänomene zerstören die Hälfte des gesamten Exergiegehalts nach etwa 20 % der Speicherzeitkonstante. Da lange Speicherzeiten durch eine bessere Isolierung begünstigt werden, gewinnen diese Effekte für zukünftige großtechnische TES-Anwendungen an Bedeutung. Darüber hinaus wurden die Strömungsstrukturen der natürlichen Konvektion entlang der vertikalen Seitenwände mittels zeitgemittelter Particle Image Velocimetry (PIV)-Messungen untersucht [5]. Insgesamt zeigte sich, dass sich im Speicher zwei großskalige Zirkulationen ausbilden, die durch einen Wärmestrom von der heißen Fluidschicht in die Seitenwand nach unten und dann in die kalte Schicht entstehen. Die entstehenden Temperaturprofile in Fluid und Seitenwand, sowie die zeitgemittelte Strömungsstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt. Im wandnahen Bereich ist die Strömung durch die höchsten Geschwindigkeiten gekennzeichnet, da der antreibende Wärmestrom an dieser Stelle stattfindet, während die Strömung im wandfernen Bereich lediglich eine Folge der Massenerhaltung ist.

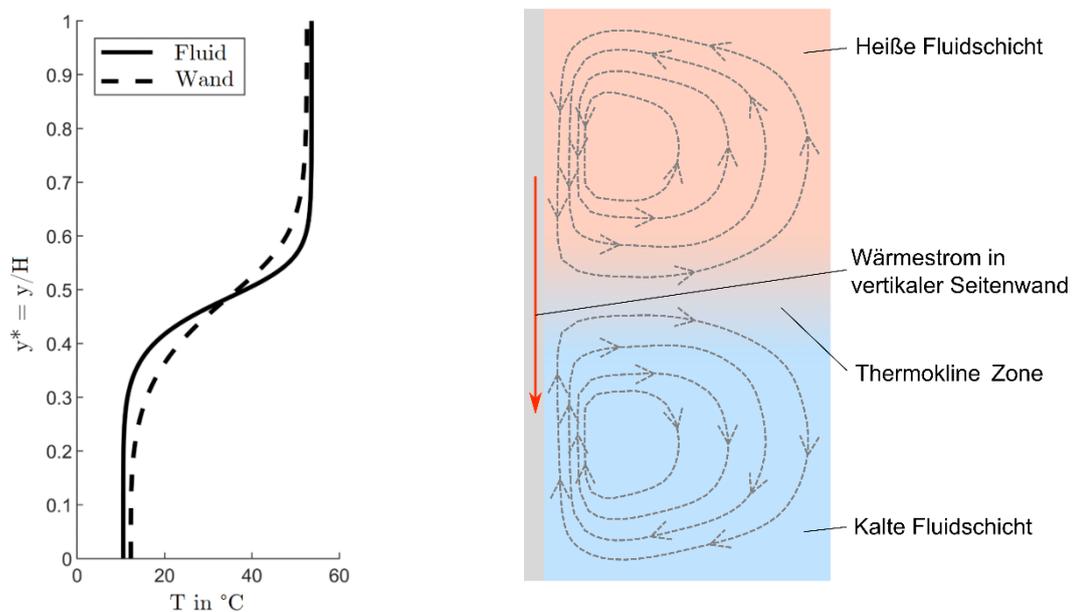


Abbildung 1: Links: Vertikale Profile der Wand- und Fluidtemperatur. Rechts: Zeitgemittelte Strömungsstruktur im Modellexperiment des TES aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der vertikalen Außenwand.

Bei den zeitlich gemittelten Strömungsuntersuchungen wurde außerdem festgestellt, dass in der oberen, heißen Fluidschicht der vertikale Wandstrahl durch eine geringere horizontale Ausdehnung und höhere Geschwindigkeiten gekennzeichnet ist als der untere Wandstrahl in der kalten Fluidschicht. Zusätzlich zeigt der obere Wandstrahl instationäres Verhalten mit starken Geschwindigkeitsfluktuationen, die im Rahmen der zeitgemittelten PIV-Messungen nicht untersucht wurden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen somit die Fluktuationen des oberen Wandstrahls als auch dessen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse im Fernfeld der vertikalen Wand untersucht werden.

Experimenteller Aufbau

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, der für die Untersuchungen verwendet wurde, bestehend aus einem Modellexperiment eines thermischen Schichtenspeichers und einem PIV-Messsystem.

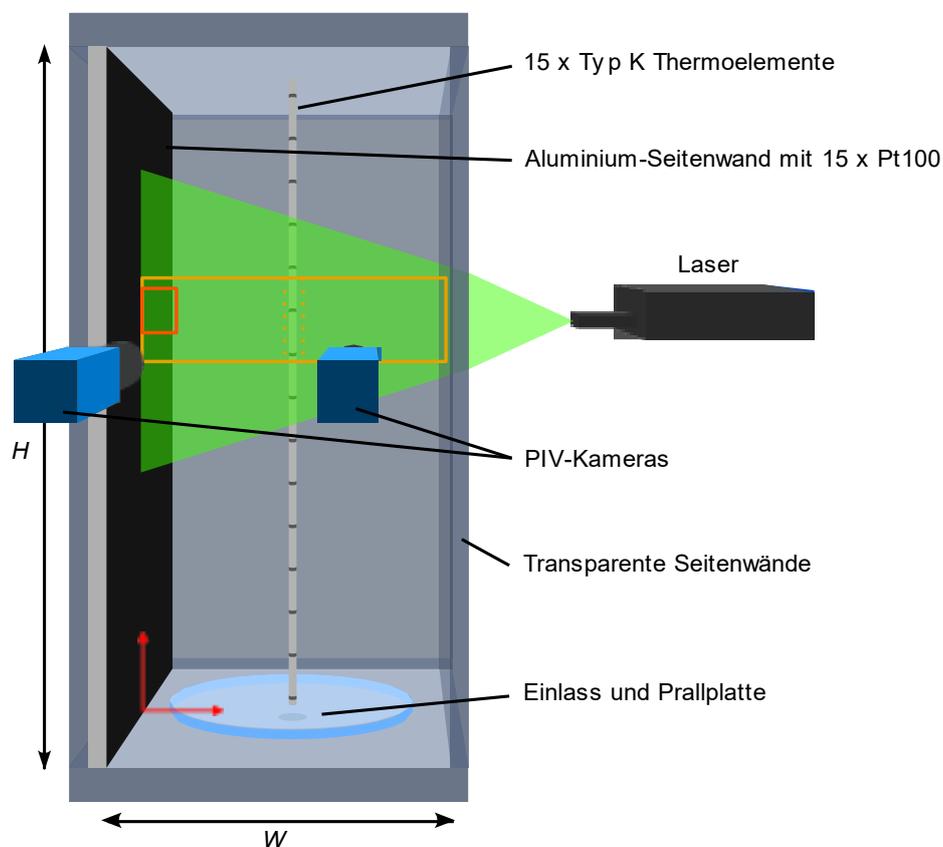


Abbildung 2: Modellversuch mit dem PIV-System für Strömungsmessungen im wandnahen Bereich und im Fernfeld der Wand. Die gezeigte Kameraanordnung entspricht der Messung im Fernfeld, die aus zwei nebeneinander liegenden Kameras besteht, während bei der Wandmessung nur eine Kamera in Kombination mit einem Objektiv mit höherer Vergrößerung verwendet wird. Die unterschiedlichen Rechtecke zeigen die entsprechenden Bildbereiche der beiden Messungen.

Bei dem Modellversuch handelt es sich um eine rechteckige Zelle aus Polycarbonat mit einer Höhe $H = 750$ mm auf einer quadratischen Grundfläche mit einer Kantenlänge $W = 375$ mm. Auf einer Seite der Zelle kann eine 10 mm dicke Aluminiumwand eingesetzt werden, um eine vertikale Tankseitenwand eines TES mit hoher Temperaturleitfähigkeit ($\kappa_{al} = 104,4$ m² / s) zu imitieren. Das Modellexperiment wird von unten durch einen Einlass in der Bodenplatte befüllt, der mit einer Prallplatte abgedeckt ist, um die Vermischung des thermisch geschichteten Fluids zu verhindern. Die thermische Schichtung wird erzeugt, indem die Hälfte der Zelle mit heißem

Wasser durch einen Durchlauferhitzer befüllt wird, gefolgt von kaltem Wasser aus einem gekühlten Reservoir, welches dann das heiße Wasser langsam nach oben drückt. Im Vergleich zur vertikalen Aluminiumplatte hat das Wasser eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit ($\kappa_{wa} = 0,13 \text{ m}^2 / \text{s}$), sodass die Aluminiumplatte eine Wärmebrücke zwischen der oberen heißen Schicht und der unteren kalten Schicht bildet. Während der Versuche kann die Temperaturverteilung sowohl in der Aluminiumplatte als auch im Wasser mit Temperatursensoren überwacht werden. Zu diesem Zweck wurden 15 Pt100-Widerstandsthermometer (Klasse AA mit einer Toleranz von $\pm (0,1 \text{ K} + 0,0017 \cdot \vartheta_{wa})$), wobei ϑ_{wa} die Wassertemperatur in Grad Celsius ist) gleichmäßig über die Höhe im Inneren der Aluminiumplatte verteilt. Die Wassertemperatur wird mit 15 Thermoelementen (Typ K mit einer absoluten Unsicherheit von $\pm 0,1 \text{ K}$ und einer relativen Unsicherheit von $2\sigma = \pm 0,014 \text{ K}$ nach Rekalibrierung) gemessen, die an der in der Mitte des Modellversuchs angebrachten Temperaturlanze befestigt sind. Außerdem wird eine asymmetrische logistische Funktion zur Regression des vertikalen Wand- und Wassertemperaturprofils verwendet.

Die zeitaufgelösten Langzeit-PIV-Messungen wurden über einen Zeitraum von 40 Minuten durchgeführt und wurden 5 Minuten nach Beendigung des Befüllungsvorgangs gestartet. Die fünfminütige Verzögerung wurde gewählt, damit sich mögliche Strömungsstörungen durch den Befüllungsprozess beruhigen konnten. Je nach Messposition unterschied sich das Kamera-Setup: Die erste Messposition im wandnahen Bereich beschränkt sich auf das relativ kleine Sichtfeld einer Kamera (siehe kleines Rechteck in Abbildung 2) mit einer hohen räumlichen Auflösung von $56,51 \text{ px} / \text{mm}$ bei einer Aufnahme Frequenz von 7 Hz , damit die hohen Geschwindigkeitsgradienten des Wandstrahls präzise erfasst werden können. Die zweite Messposition konzentriert sich auf die Fernfeld-Strömungsphänomene, die der Wandstrahl auslöst. Dabei wird die gesamte Breite der Messzelle mit einer räumlichen Auflösung von $11,66 \text{ px} / \text{mm}$ durch zwei nebeneinander liegende Kameras mit einer Aufnahme Frequenz von $0,5 \text{ Hz}$ erfasst. Bei den verwendeten Kameras handelt es sich um sCMOS-Kameras (Imager sCMOS, LaVision GmbH) mit einer Sensorauflösung von $2560 \times 2160 \text{ px}$, die je nach Messposition mit einem Objektiv von 100 mm Brennweite (Milvus 2/100M, Zeiss) oder 50 mm Brennweite (Planar T14/50 (4), Zeiss) für die Wand- bzw. Fernfeldmessung ausgestattet sind. Für die Beleuchtung der Messebene wurde ein Nd:YAG-Doppelpulslaser (Evergreen, Quantel Laser) verwendet. Der resultierende Lichtschnitt verlief vertikal, senkrecht zur Aluminiumwand in der halben Tiefe der Messzelle.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der wandnahen Messung. In Abbildung 3a ist eine Momentaufnahme der vertikalen Geschwindigkeitskomponente v dargestellt. Der blaue Bereich auf der linken Seite zeigt den vertikalen Wandstrahl in Abwärtsrichtung. Zum Zeitpunkt der Aufnahme weist dieser eine Strömungsfuktuation auf, die durch die dickeren Teile im Bereich zwischen $480 \text{ mm} \leq y \leq 510 \text{ mm}$ angezeigt wird. Rechts neben dem Wandstrahl ist durch den gelben Bereich ein Rückströmgebiet erkennbar, das durch lokale Temperaturdefekte in der thermischen Grenzschicht entsteht. Abbildung 3b zeigt ein Raum-Zeit-Diagramm von v entlang der vertikalen Achse bei $x = 3 \text{ mm}$, das durch eine gestrichelte Linie in Abbildung 3a gekennzeichnet ist. Durch das erkennbare Streifenmuster werden Strömungsfuktuationen identifiziert, da verschiedene Farben auf unterschiedliche Geschwindigkeiten hindeuten. In der eingefügten Vergrößerung kann man sehen, dass das Streifenmuster leicht geneigt ist, so dass es von links oben nach rechts unten zeigt. Diese Neigung zeigt an, dass sich die fluktuierenden Strömungsstrukturen im Laufe der Zeit von oben nach unten bewegen. Außerdem ist zu erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeit mit der Zeit abnimmt, was zu erwarten war, da

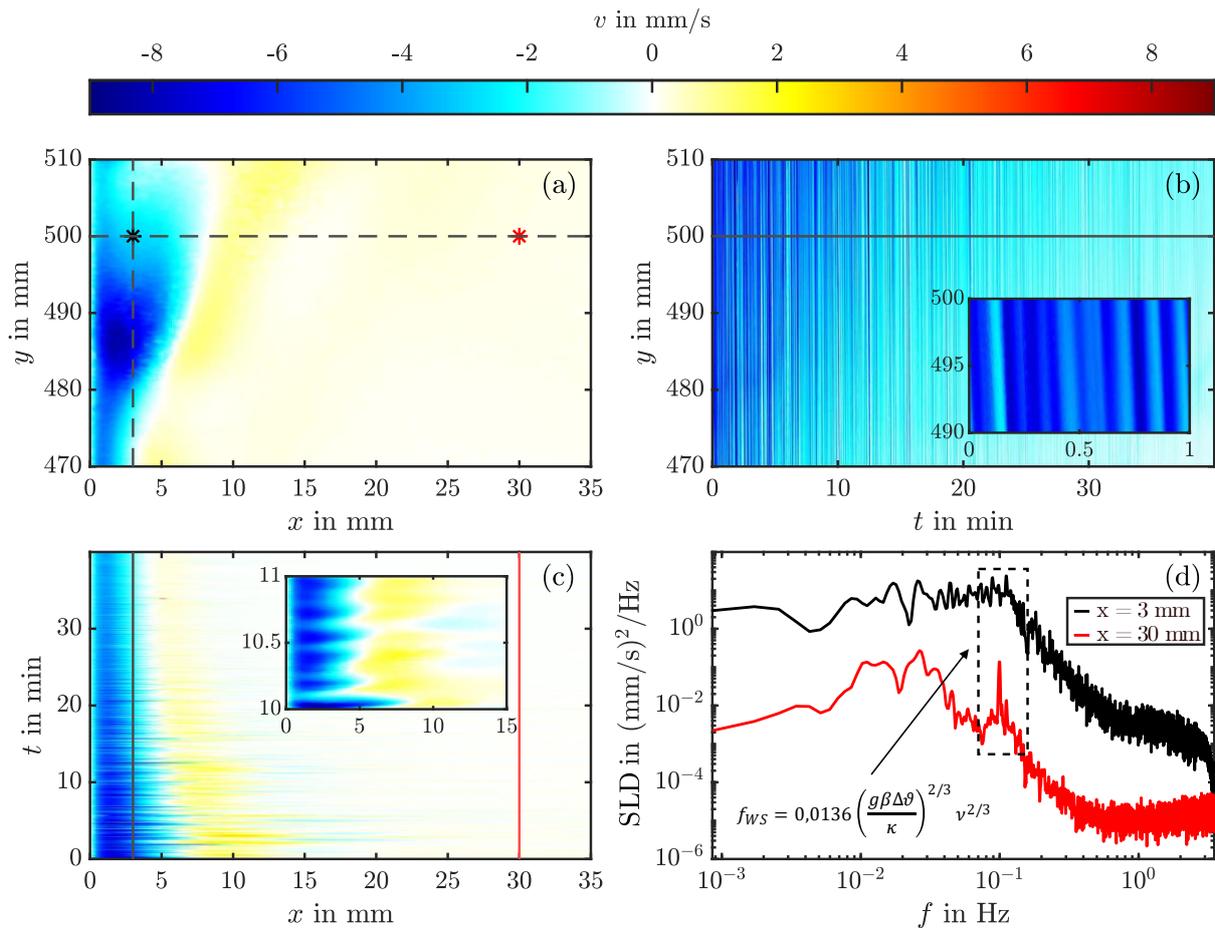


Abbildung 3: (a) Schnappschuss der vertikalen Geschwindigkeitskomponente v der wandnahen PIV-Messungen. (b) Raum-Zeit-Diagramm von v entlang der vertikalen Linie bei $x = 3$ mm (gekennzeichnet durch eine gestrichelte Linie in (a)). (c) Raum-Zeit-Diagramm entlang der horizontalen Linie bei $y = 500$ mm (ebenfalls durch eine gestrichelte Linie in (a) gekennzeichnet). (d) Spektrale Leistungsdichte (SLD) zweier Zeitreihen von v in zwei verschiedenen Abständen zur vertikalen Seitenwand in der Höhe von $y = 500$ mm. Zusätzlich ist die theoretische Frequenz der Fluktuationen im Wandstrahl angegeben, der die lokalen Maxima bei $f = 1 \times 10^{-1}$ Hz zugeordnet werden können. Die Zeitreihen sind durch ihre Farben in den Abbildungen als Sternmarkierungen oder durchgezogene Linien durch ihre Farben in den anderen Teilabbildungen gekennzeichnet.

der Wärmestrom, der die auftriebsinduzierte Strömung antreibt, mit der Zeit ebenfalls abnehmen muss, da das gesamte System in einen Gleichgewichtszustand übergeht.

Abbildung 3c zeigt ebenfalls ein Raum-Zeit-Diagramm der vertikalen Geschwindigkeitskomponente, diesmal allerdings aufgetragen über die horizontale Achse an der Stelle $y = 500$ mm. Hier sieht man die zeitliche Entwicklung der mit der Zeit abnehmenden Wandstrahldicke. Wie in Abbildung 3b kann man auch hier die zeitlichen Fluktuationen erkennen. Jedoch zeigen die Streifen auch in vergrößerter Ansicht keinerlei Neigung, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass die Strömungsstrukturen keine spezifische horizontale Bewegung aufweisen.

Da die Abbildungen 3b und 3c Strömungsfluktuationen über den gesamten Messzeitraum mit scheinbar periodischem Verhalten zeigen, weil die Streifenbreite über die Zeit relativ konstant bleibt, ist in Abbildung 3d die spektrale Leistungsdichte (SLD) beider Zeitreihen dargestellt. Die Sternchen in Abbildung 3a markieren die jeweiligen Positionen dieser Zeitreihen, in 3b und 3c sind sie als Linien gekennzeichnet. Die Spektren zeigen zwei dominante Frequenzbereiche in der fluktuierenden Strömung. Das schwarze Spektrum bei $x = 3$ mm hat sein Maximum bei einer Frequenz von $f = 1,1$ Hz. Von diesem Punkt aus fällt das Spektrum zu höheren Frequenzen hin drastisch ab, was darauf hindeutet, dass Strömungsstrukturen mit Frequenzen größer

als 1,1 Hz weniger häufig auftreten. Anders verhält es sich auf der linken Seite des Maximums: Hier bleibt das Spektrum bei einer nahezu konstanten Leistungsdichte, was darauf hinweist, dass die auftretenden Strömungsschwankungen viele verschiedene Frequenzen in einem größeren Bereich niedriger Frequenzen umfassen. Das rote Spektrum, das bei einem Wandabstand von $x = 30$ mm aufgezeichnet wurde, zeigt ein etwas anderes Verhalten, da zwei deutliche lokale Maxima im Spektrum zu finden sind. Das erste und höchste lokale Maximum ist bei $f = 2,6 \times 10^{-2}$ Hz zu finden. Das zweite ausgeprägte lokale Maximum mit ähnlicher Amplitude liegt bei $f = 1 \times 10^{-1}$ Hz, was nahezu mit dem Maximum aus dem schwarzen Spektrum übereinstimmt. Aufgrund dieser Beobachtung kann davon ausgegangen werden, dass die beiden ausgeprägten lokalen Maxima zwei unterschiedliche physikalische Ursprünge haben. Außerdem ist das globale Maximum im roten Spektrum bei niedrigeren Frequenzen zu finden, während das globale Maximum im schwarzen Spektrum im höheren Frequenzbereich liegt. Es kann daher angenommen werden, dass die niedrigere Frequenz von einer bestimmten Strömungsstruktur des Fernfeldes herrührt, während die höhere Frequenz vom Wandstrahl stammt. Diese Annahme muss jedoch weiter untersucht werden.

Für diese weitere Untersuchung sind in Abbildung 4 die Ergebnisse der PIV-Fernfeldmessungen analog zu Abbildung 3 dargestellt.

In Abbildung 4a ist eine Momentaufnahme der horizontalen Geschwindigkeitskomponente u der Fernfeldmessung zu sehen, da in diesem Bereich die Hauptströmung in horizontaler Richtung verläuft. Die Bereiche ganz links und rechts sind ausgegraut, da in diesen Regionen höhere Geschwindigkeiten vorherrschten, die mit der verwendeten Messfrequenz nicht aufgelöst werden konnten. Die Grafik zeigt, dass das Fluid aufgrund der positiven Geschwindigkeitswerte in fast dem gesamten Bildbereich nach rechts strömt, nur einige kleinere Bereiche zeigen leicht negative Werte. Insgesamt ist der Betrag der gemessenen Geschwindigkeit in der rechten Hälfte der Messzelle höher, was durch die orangefarbenen und roten Bereiche angezeigt wird. Der Grund für dieses Phänomen ist bei dieser Messung unklar, jedoch wird vermutet, dass es mit einer dreidimensionalen Strömungsstruktur zusammenhängt, die sich bildet, um den Massenstrom innerhalb des vertikalen Wandstrahls zu kompensieren. Die allgemeine Strömungsstruktur ist allerdings nicht Gegenstand der Untersuchungen in dieser Arbeit, denn die zu untersuchenden Strömungsfluktuationen werden als unabhängig von der gemittelten Strömung angenommen.

Abbildung 4b zeigt wieder ein Raum-Zeit-Diagramm entlang der vertikalen gestrichelten Linie in Abbildung 4a. In dieser Darstellung ist u fast ausschließlich positiv, was bedeutet, dass der Hauptstrom während der gesamten Messung in wandnormaler Richtung fließt. Darüber hinaus nimmt der Betrag der Geschwindigkeit mit der Zeit ab, was in guter Übereinstimmung mit der Strömung des Wandstrahls steht, der sich ebenfalls mit der Zeit verlangsamt. Außerdem ist erneut ein Streifenmuster zu erkennen, was auf periodische Fluktuationen äquivalent zu Abbildung 3b schließen lässt. Im Gegensatz zum vorhergehenden Muster fließt die Strömung hier allerdings viel langsamer, was durch die breiteren Streifen erkennbar ist. Die Neigung der Streifen zeigt, dass sich das Muster von unten nach oben bewegt. Dieses Verhalten war zu erwarten, da die schematische Darstellung in Abbildung 1 die großskalige Zirkulation der Strömung zeigt, die auch im Fernfeldbereich nach oben gerichtet ist.

Das Raum-Zeit-Diagramm entlang der horizontalen gestrichelten Linie von Abbildung 4a ist in Abbildung 4c dargestellt. Auch entlang dieser Linie werden periodische Fluktuationen durch das Streifenmuster angezeigt. Daraus lässt sich schließen, dass sich diese Fluktuationen über die gesamte Breite der Zelle erstrecken. Gleichzeitig ist jedoch keine horizontale Verschiebung dieser Fluktuationen zu erkennen, da das Muster hier horizontal verläuft und nicht geneigt ist.

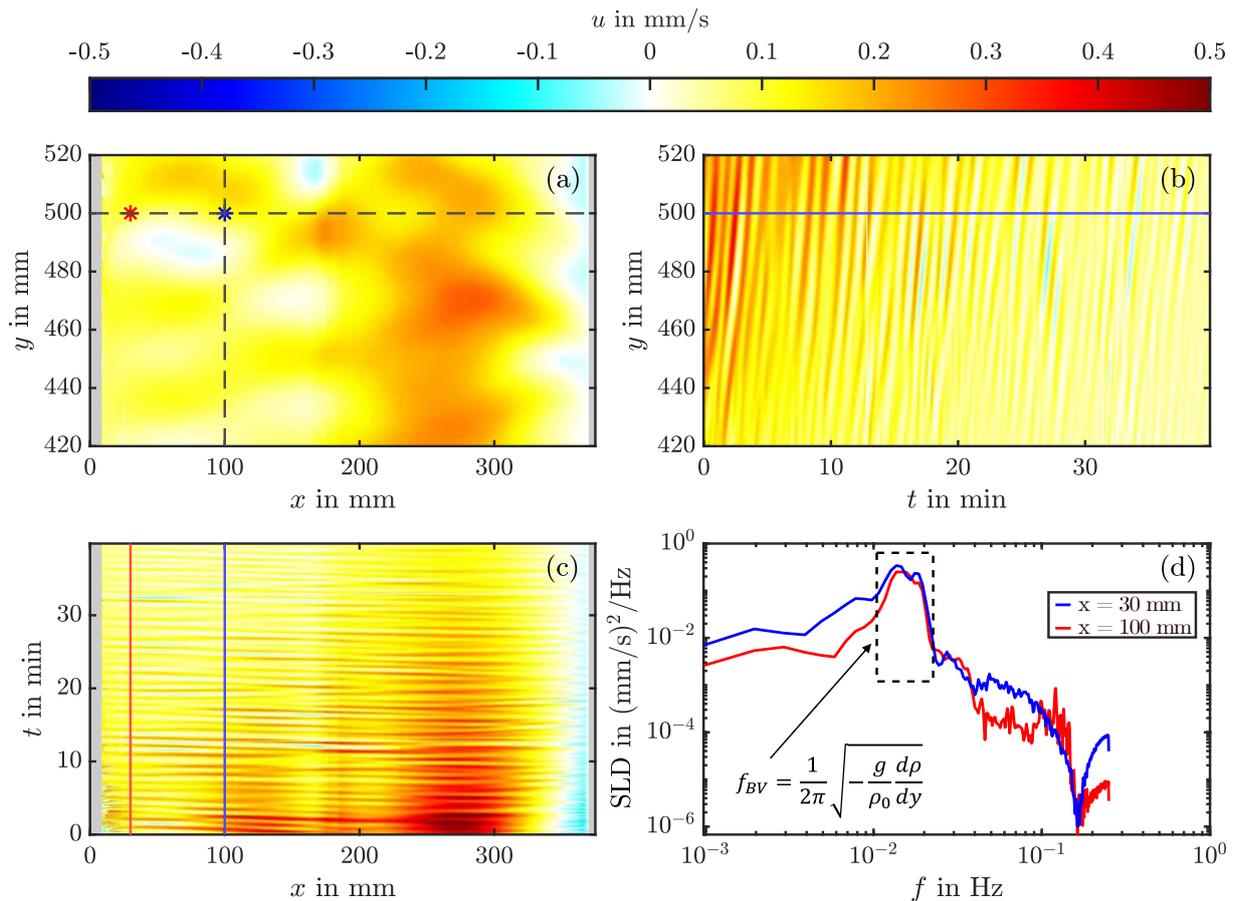


Abbildung 4: (a) Schnappschuss der horizontalen Geschwindigkeitskomponente u der PIV-Messungen im Fernfeld. (b) Raum-Zeit-Diagramm von u entlang der vertikalen Linie bei $x = 3$ mm (gekennzeichnet durch eine gestrichelte Linie in (a)). (c) Raum-Zeit-Diagramm entlang der horizontalen Linie bei $y = 500$ mm (ebenfalls durch eine gestrichelte Linie in (a) gekennzeichnet). (d) Spektrale Leistungsdichte (SLD) zweier Zeitreihen von u in zwei verschiedenen Abständen zur vertikalen Seitenwand in der Höhe von $y = 500$ mm. Zusätzlich ist die Brunt-Väisälä Frequenz angegeben, der die lokalen Maxima bei $f = 2 \times 10^{-2}$ Hz zugeordnet werden können. Die Zeitreihen sind durch ihre Farben in den Abbildungen als Sternmarkierungen oder durchgezogene Linien durch ihre Farben in den anderen Teilbildern gekennzeichnet.

Abbildung 4d zeigt schließlich wieder die spektrale Leistungsdichte von zwei Positionen innerhalb des Bildbereichs, die durch die sternförmigen Markierungen in Abbildung 4a gekennzeichnet sind. Das rote Spektrum wurde erneut für einen Wandabstand von $x = 30$ mm dargestellt und kann daher mit dem roten Spektrum in Abbildung 3d verglichen werden, da es aus demselben Abstand, aber aus einer anderen Messung stammt. Der Vergleich dieser beiden Spektren zeigt, dass beide Spektren zwei deutliche lokale Maxima aufweisen, eins bei einer Frequenz von $f \approx 2 \times 10^{-2}$ Hz und ein zweites bei $f \approx 1 \times 10^{-1}$ Hz. Der Vergleich der Raum-Zeit-Diagramme in den Abbildungen 3b und 3c mit denen von Abbildung 4b und 4c deutet wiederum darauf hin, dass das niedrigere lokale Maximum aus der Fernfeldströmung stammt, während das Maximum bei der höheren Frequenz durch den Wandstrahl erzeugt wird. Das blaue Spektrum, das den Frequenzgang noch weiter von der Wand entfernt zeigt, stimmt ebenfalls mit dieser Interpretation überein, da in diesem Spektrum das lokale Maximum bei höheren Frequenzen nicht zu detektieren ist. Das deutet darauf hin, dass die ausgelösten Fluktuationen durch den Wandstrahl mit zunehmendem Abstand zur Wand aufgrund interner viskoser Reibung im Fluid abnehmen. Das lokale Maximum im unteren Frequenzbereich ist jedoch fast identisch mit dem aus dem roten Spektrum, was zeigt, dass die zugrunde liegende Fluktuation bei beiden Wandabständen vorhanden ist.

In den Abbildungen 3d und 4d sind außerdem zwei Gleichungen zur theoretischen Beschreibung der untersuchten Fluktuationen angegeben. Die vom Wandstrahl ausgelösten Fluktuationen mit höherer Frequenz sind dabei in guter Übereinstimmung auf eine empirisch ermittelte Frequenz zurückzuführen, festgestellt durch numerische Untersuchungen der Stabilität einer Grenzschicht natürlicher Konvektion an einer vertikalen, isotherm beheizten Platte von Zhao et al. [6]. Dabei beschreibt g die Fallbeschleunigung im Erdschwerefeld, β den volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten des Fluids, $\Delta\vartheta$ die Temperaturdifferenz zwischen Platte und Fluid, und κ und ν die Temperaturleitfähigkeit und die kinematische Viskosität des Fluids. Demnach entstehen periodische Fluktuationen durch turbulente Fluidbewegungen innerhalb der Grenzschicht, ausgelöst durch kleine Störungen, in der Realität beispielsweise durch aufsteigende Luftblasen im Speichermedium. Durch diesen Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung wird der Wärmeübergang in der Grenzschicht um bis zu 44 % verstärkt.

Im Gegensatz dazu sind die Fluktuationen mit geringerer Frequenz, ausgelöst durch die Strömungen im Fernfeld, ebenfalls in guter Übereinstimmung, auf die sogenannte Brunt-Väisälä Frequenz zurückzuführen. Dabei beschreibt ρ_0 die Referenzdichte und $\frac{d\rho}{dy}$ den vertikalen Dichtegradienten des Fluids. Vergleichbare Fluktuationen wurden in numerischen Untersuchungen von Ratnu und Manu [7] beobachtet, in denen das zeitliche Verhalten thermischer Schichtenspeicher im Bereich der thermoklinen Zone nach kurzen Störeinströmungen von kaltem Fluid analysiert wurde. Dabei begann das Fluid zu oszillieren, nachdem ein Teil des Fluids aus seiner ursprünglichen Position durch Auftrieb aufgrund von lokalen Dichteunterschieden ausgelenkt wurde. Somit lässt sich schlussfolgern, dass beide Fluktuationsphänomene auf einen physikalischen Effekt zurückzuführen sind.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das zeitliche Verhalten von natürlichen Konvektionsströmungen in geschichteten thermischen Energiespeichern untersucht. Im Einzelnen wurden PIV-Experimente in einem Modellexperiment in zwei Bereichen durchgeführt - im wandnahen Bereich und im Fernfeld über die gesamte Breite des Versuchsaufbaus. Die zeitaufgelösten PIV-Daten wurden anschließend mit Hilfe von Raum-Zeit-Diagrammen und Frequenzanalysen weiter ausgewertet. Im wandnahen Bereich wurde festgestellt, dass der Wandstrahl Fluktuationen mit einer relativ hohen Frequenz von etwa 1×10^{-1} Hz aufweist. Im Fernfeld wurde eine charakteristische Frequenz von etwa 2×10^{-2} Hz beobachtet. Der Übergangsbereich zwischen dem Wandstrahl und dem Fernfeld zeigte beide charakteristischen Frequenzen in der spektralen Leistungsdichte. Ein Vergleich mit einer angepassten Formulierung für die charakteristische Frequenz des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung bei vertikaler natürlicher Konvektion stimmte sehr gut mit dem Frequenzgang der wandnahen PIV-Daten überein. Im Fernfeld wurde die beobachtete charakteristische Frequenz mit der Brunt-Väisälä (BVF) verglichen, die für dichtegesichtete Fluide typisch ist. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in Regionen mit relativ geringen Dichtegradienten, besonders im oberen und unteren Grenzbereich der Thermoklinen, die Frequenzen mit der theoretischen BVF übereinstimmen.

Im Allgemeinen sind diese Fluktuationen sowohl für die Exergie- als auch für die Energieeffizienz des Systems nachteilig. Erstens ist der Wärmeübergang hin zu den Seitenwänden erhöht, was zu einem höheren Energieverlust an die Umgebung und darüber hinaus zu einem erhöhten Wärmeübergang aufgrund von Wärmeleitung in den Seitenwänden führt. Zweitens wird durch die Fluktuation die Durchmischung im Bereich der Thermoklinen verstärkt, was zu Exergieverlusten führt.

Ausblick

Zusätzlich zu den zeitaufgelösten Geschwindigkeitsfeldmessungen sollen ~~außerdem~~ simultane 2D-Temperaturfeldmessungen mittels laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) durchgeführt werden. Durch die Wahl von geeigneten Fluoreszenzfarbstoffen soll das LIF-System hinsichtlich einer hohen Temperatursensitivität optimiert werden, um auftretende Temperaturfluktuationen präzise zu erfassen. Mit der simultanen Messung des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes kann somit erstmalig der lokale Gesamtwärmestrom nahe der Wand bestimmt werden. Dieser setzt sich zusammen aus einem dissipativen Anteil, verursacht durch Wärmeübertragung aufgrund lokaler Temperaturdifferenzen, und aus einem advektiven Anteil, verursacht durch Auftriebsströmungen aufgrund lokaler Dichteunterschiede. Da dieser Gesamtwärmestrom ausschlaggebend für die Exergieverluste in thermischen Schichtenspeichern ist, können die Kenntnisse darüber genutzt werden, um Exergieverluste durch Mischungsprozesse in realen TES durch wandnahe Ausgleichsströmungen vorherzusagen.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des SPP 2403 „Carnot Batterien“ im Projekt CI 185/15-1 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

1. Olabi, A, Onumaegbu C, Wilberforce T, M. Ramadan, Abdelkareem MA und Al – Alami AH (2009) Critical review of energy storage systems. *Energy* 214:118987.
2. Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li Y und Ding Y (2009) Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science* 19:291.
3. Dumont O, Frate GF, Pillai A, Lecompte S, De paepe M und Lemort V (2020) Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage* 32:101756.
4. Otto H, Resagk C und Cierpka C (2020) Optical Measurements on Thermal Convection Processes inside Thermal Energy Storages during Stand-By Periods. *Optics* 1:155.
5. Otto H und Cierpka C (2021) Influence of thermal stratification on vertical natural convection – Experimental investigations on the example of thermal energy storage systems. *Physics of Fluids* 33:13.
6. Zhao Y, Lei C und Patterson JC (2013) Resonance of the thermal boundary layer adjacent to an isothermally heated vertical surface. *Journal of Fluid Mechanics* 724:305.
7. Ratnu S und Manu KV (2021) Three-Dimensional Thermocline Dynamics in Thermal Storage Tanks. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 14:5.