

Einfluss lokaler parasitärer Wandschichtströmungen in thermischen Energiespeichern

Influence of local parasitic near-wall flows in thermal storage tanks

Henning Otto, Christian Resagk und Christian Cierpka

Institut für Thermodynamik und Fluidmechanik, Technische Universität Ilmenau
Am Helmholtzring 1, 99693 Ilmenau

Schlagworte: thermischer Energiespeicher, thermische Schichtung, Wandschichtströmung, freie Konvektion

Keywords: thermal storage tank, thermal stratification, near-wall flow, natural convection

Zusammenfassung

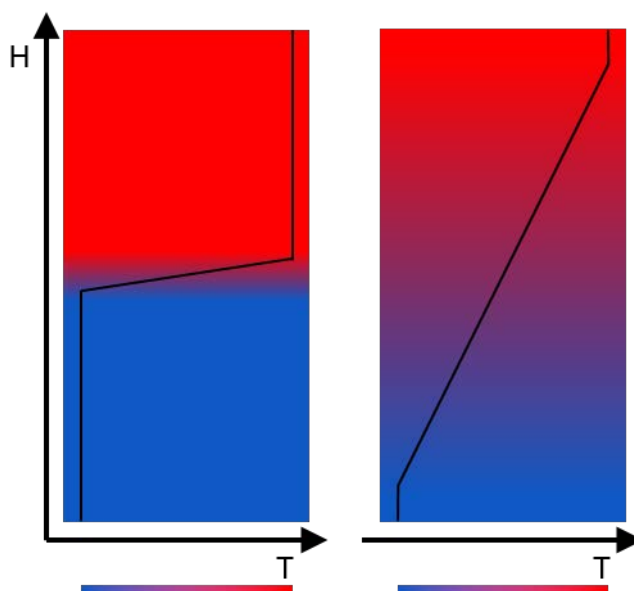
Für die effiziente Speicherung solarthermischer Energie sind thermische Schichtenspeicher notwendig, die in der Lage sind, eine möglichst strikte Trennung zwischen heißem Wasser im oberen Teil des Speichers von kaltem Wasser im unteren Teil über lange Zeit aufrecht zu erhalten. Konvektive Strömungseffekte, die sich vor allem in den Standby-Phasen eines Schichtenspeichers negativ auf diese thermische Schichtung auswirken, müssen dafür minimiert werden. Es wurden sowohl numerische als auch experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt, die gezeigt haben, dass Wärmeströme durch und in den Speicherwänden eines Schichtenspeichers zu Konvektionsströmungen innerhalb des Speichermediums führen, die eine thermische Schichtung negativ beeinflussen können. Auf der Grundlage dieser Voruntersuchungen wird eine Versuchsanordnung entwickelt, um diese Strömungen mittels Particle Image Velocimetry zu untersuchen und zu charakterisieren.

Einleitung

Die Beschränkung des vom Menschen verursachten Klimawandels stellt eine der größten Herausforderungen für die heutige Gesellschaft dar. Um zu diesem Zweck fossile Energieträger durch die Verwendung erneuerbarer Energien zu ersetzen, werden effiziente Methoden der Energiespeicherung benötigt. In solarthermischen Anlagen werden zwischen Energiegewinnung und –nutzung thermische Schichtenspeicher mit Wasser als Wärmeträgerfluid eingesetzt. Aufgrund des thermischen Dichtegradienten bildet zugeführtes warmes Wasser aus dem Kollektor eine getrennte Schicht über darunterliegendem kälteren Wasser aus. Die Speicherzeit hängt maßgeblich vom Wärmeverlust durch die Wände ab. Diese kann durch eine sehr gute Dämmung erhöht und der Energieverlust minimiert werden. Damit der Verbraucher möglichst hohe Temperaturen in einer großen Menge entnehmen kann, muss zudem die thermische Schichtung lange erhalten bleiben [Castell et al. 2010]. Abbildung 1a) zeigt den Unterschied zwischen einer gut erhaltenen (links) und einer bereits stark abgeschwächten (rechts) thermischen Schichtung. Die gute Schichtung zeichnet sich durch ein nahezu stufenförmiges Temperaturprofil über die Höhe des Speichers mit einem hohen Temperaturgradienten aus. Dem Verbraucher steht ein großer Anteil des Volumens mit Fluid der maximalen Temperatur

zur Verfügung. Eine bereits stark durchmischte Schichtung weist einen relativ flachen Temperaturgradienten über große Bereiche der Speicherhöhe auf. Bei insgesamt gleicher Menge an gespeicherter Energie sinkt damit die nutzbare Menge heißen Speichermediums. Grundsätzlich ist Wasser als vielfach eingesetztes Speichermedium aufgrund seiner niedrigen Temperaturleitfähigkeit von $a_w \approx 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für langanhaltende Temperaturschichtungen geeignet und würde in idealen Schichtenspeichern die saisonale Energiespeicherung von mehr als 100 Tagen ermöglichen [Thess et al. 2015]. Allerdings kann ein eingeleiteter Impuls durch die Be- und Entladeprozesse des Speichers zur Durchmischung der Schichten und damit der Minderung der nutzbaren Energie führen. Daher waren und sind die Be- und Entladeeinrichtungen zur Erzeugung stabiler Schichtungen ein wichtiger Forschungsschwerpunkt von thermischen Schichtenspeichern [Buhl und Platzer 2017, Kong et al. 2016, Abdelhak et al. 2015, levers und Lin 2009]. Neben dieser erzwungenen Konvektion bilden die meist aus Stahl gefertigten Speicherwände eine Ursache für freie Konvektionsströmungen innerhalb thermischer Schichtenspeicher. Aufgrund der etwa zwei Größenordnungen höheren Temperaturleitfähigkeit von Stahl gegenüber Wasser ($a_{st} \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) wird der thermische Ausgleich zwischen den Temperaturschichten beschleunigt. Heißes Wasser im oberen Teil des Speichers wird abgekühlt und sinkt herab, während das kalte Wasser aus der unteren Schicht erwärmt wird und aufsteigt. Abbildung 1b) zeigt anhand der roten Pfeile den Wärmestrom, der über die Speicherwand von der oberen heißen Schicht in die untere kalte Schicht des Speichers fließt und dadurch die freie Konvektion antreibt. Zusätzlich zu dieser Strömung sorgt der Verlustwärmestrom durch die Speicherwände an die Speicherumgebung zu einer globalen Abkühlung der wandnahen Bereiche. Dadurch hervorgerufene Dichtegradienten sorgen ebenfalls für Konvektionsströmungen innerhalb des Speichers, deren Effekte auf die thermische Schichtung nicht abschließend geklärt ist. Mit Hilfe einer Speicher-Versuchsanordnung sollen künftig diese Konvektionseffekte innerhalb thermischer Schichtenspeicher charakterisiert und deren Auswirkungen auf die thermische Schichtung ermittelt werden. Versuchsvorbereitend und zur ergänzenden Analyse der Ergebnisse werden numerische Simulationen in ANSYS Fluent durchgeführt.

a)



b)

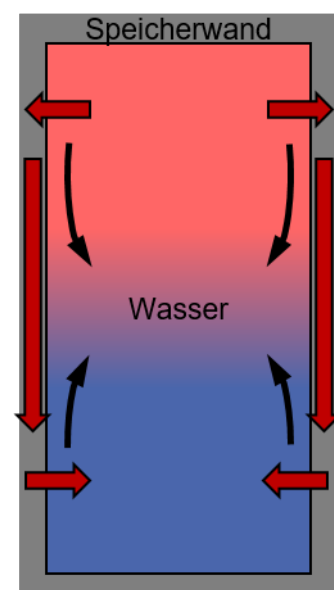


Abb. 1: a) Schematischer Vergleich einer thermischen Schichtung mit stufenförmigem Temperaturprofil (links) zu einer Schichtung mit flachem linearen Temperaturgradienten (rechts). b) Schematische Darstellung der Wärmeströme (rote Pfeile) innerhalb der Speicherwand, die parasitäre Wandschichtströmungen (schwarze Pfeile) in thermisch geschichteten Speichern verursachen.

Voruntersuchungen

Um eine geeignete Versuchsanordnung zu entwickeln, wurden Simulationen und Probemessungen durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt einer dreidimensionalen Simulation einer vereinfachten Speicheranordnung mit der Höhe H und einer quadratischen Grundfläche mit der Kantenlänge B . Eine 10 mm dicke Seitenwand aus Kupfer mit einer nochmal erhöhten Temperaturleitfähigkeit gegenüber Stahl ($\alpha_{\text{Ku}} \approx 117 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) soll die Auswirkungen auf die thermische Schichtung zeigen. Die Simulation ist eine direkte numerische Simulation mit einer Gitterzellenanzahl $N_{\text{Zellen}} \approx 1 \cdot 10^6$. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser wurde in der Simulation linear genähert, weshalb nur eine geringe Temperaturdifferenz von 20 K gewählt wurde. Für alle Außenwände ist eine adiabatische Randbedingung vorgegeben, was einer perfekten Isolierung entspricht. Dadurch finden keine Wärmeverluste an die Umgebung statt, sondern lediglich ein Temperatenausgleich innerhalb des Speichers und der Kupferwand.

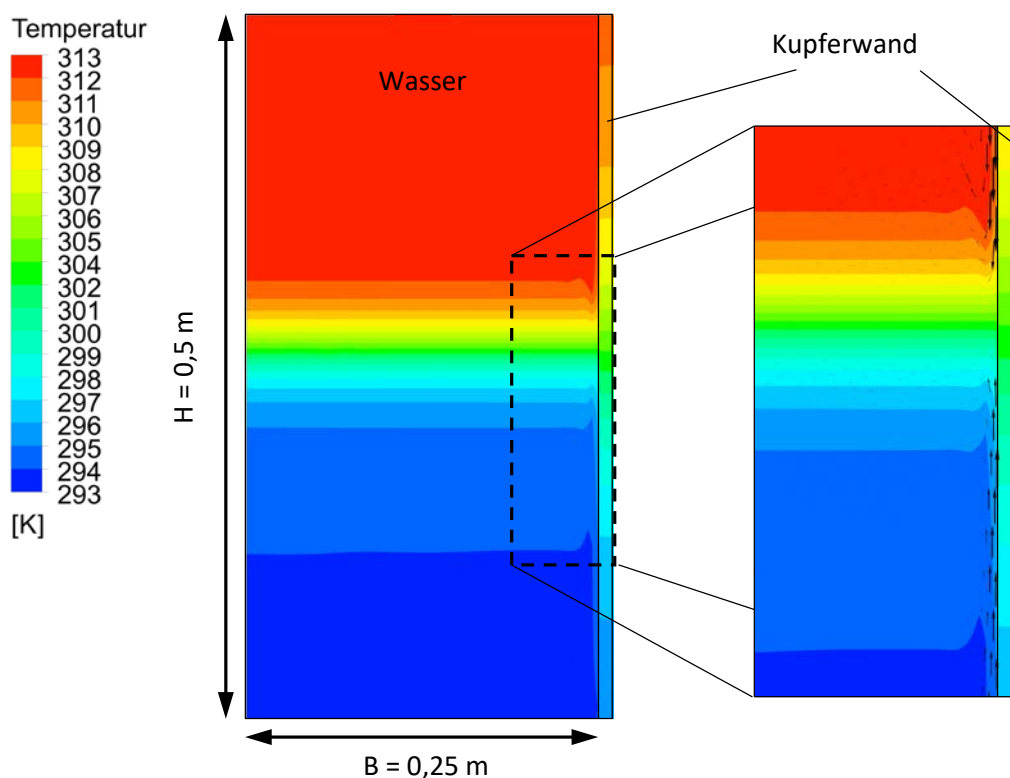


Abb. 2: Numerische Simulation der Temperatur und der Strömung innerhalb eines thermischen Schichtenspeichers bei $t = 540 \text{ s}$. Initialzustand ($t = 0 \text{ s}$): homogene Temperaturverteilung mit $T(0) = 313 \text{ K}$ ($\approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$); Aufbau der Schichtung ($t = 0 - 240 \text{ s}$): Befüllung von unten mit 293 K ($\approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$) kaltem Wasser; Standby-Phase ($t = 240 - 540 \text{ s}$). Die Vektorpfeile zeigen die sich einstellende wandnahe Strömung über dem Konturplot der Temperatur.

Die konturiert dargestellte Temperatur zeigt die thermische Schichtung, die sich innerhalb des Speichers und innerhalb der Kupferwand eingestellt hat. Aufgrund der erhöhten Temperaturleitfähigkeit ist die Temperaturverteilung im Kupfer etwas homogener als im Wasser. Der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Kupfer führt nahe der Wand zu einem horizontalen Temperaturgradienten im Wasser. In der vergrößerten Ansicht auf der rechten Seite der Abbildung sind in genau diesem Bereich die höchsten Geschwindigkeiten anhand der Vektorpfeile zu erkennen. In der kalten Schicht steigt das Wasser an der Kupferwand auf und in der warmen Schicht sinkt es herab. Diese beiden Strömungen treffen im Bereich des thermischen Gleichgewichts zwischen Kupfer und Wasser (grüne Zone des Konturplots) aufeinander. Die Amplitude dieser Geschwindigkeit beträgt $u_{\text{max}} \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. Um zu prüfen, ob es sich um eine

laminare Strömung handelt und daher kein Turbulenzmodell benötigt wird, wurde die Reynoldszahl abgeschätzt. Als charakteristische Länge L wird dabei der Anteil der Speicherhöhe verwendet, der überströmt wird. Da sich über die Höhe zwei Strömungen ausgebildet haben, die etwa in der Mitte aufeinandertreffen, gilt $L \approx 0,5 \cdot H = 0,25$ m. Mit einer kinematischen Viskosität von Wasser von $\nu \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ergibt sich für die abgeschätzte Reynoldszahl $Re = 2500$. Bei längs angeströmten Platten, die der hier vorliegenden Strömung ähnlich sind, liegt der Übergang zur Turbulenz bei einer Reynoldszahl von etwa $Re_{\text{Transition}} = 3 \cdot 10^5$. Daher kann in diesem Fall von laminarer Strömung ausgegangen werden und es wird kein Turbulenzmodell benötigt. Als Vorversuch hat die Simulation damit gezeigt, dass ein stark vereinfachter Versuchsspeicher dazu geeignet ist, eine parasitäre Wandschichtströmung zu erzeugen. Zudem können mit weiteren Simulationen die Ergebnisse späterer Messungen ergänzend analysiert und bewertet werden.

In einer weiteren Voruntersuchung wurde an einem Testspeicher für die Vermessung verschiedener Dämmkonzepte die Temperatur während der Standby-Phase des Speichers in verschiedenen Höhen aufgenommen. Abbildung 3a) zeigt den Querschnitt des Testspeichers und die Position der Temperaturmessstellen, sowie die Speicherschichten N1 bis N5, für die in einem Modell zur Abschätzung der Speicherzeitkonstante die Temperatur am jeweiligen Sensor angenommen wurde. Die Temperaturverläufe der einzelnen Messstellen sind in Abbildung 3b) dargestellt.

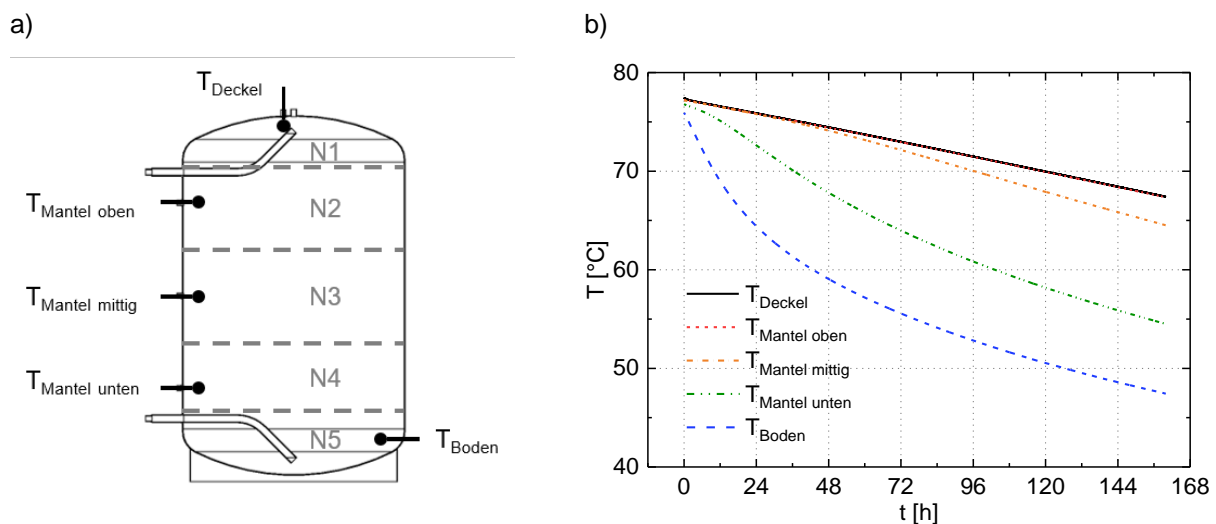


Abb. 3: a) Querschnitt des Testspeichers und Position der Temperaturmessstellen. Der Speicher hat ein Volumen von ca. 2 m^3 bei einem Manteldurchmesser von ca. $1,2$ m. b) zeitlicher Temperaturverlauf der einzelnen Messstellen nach einer initialen Erwärmung des Speichers auf eine homogene Temperatur von ca. $76 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Temperaturverläufe der fünf Sensoren zeigen, dass sich im Verlauf der Messung eine Temperaturschichtung aufbaut. Von der initialen homogenen Temperaturverteilung mit ca. $76 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgehend, hat sich die Fluidschicht N5 nach nur einem Tag bereits um ca. 10 K abgekühlt. In der gleichen Zeit hat in den oberen Schichten N1 bis N3 lediglich eine Temperaturänderung von ca. $1\text{-}2 \text{ K}$ stattgefunden. Diese Abkühlung kann nicht allein auf den Wärmestrom, der vom Speichermedium zur Umgebung fließt, zurückgeführt werden, da die Temperaturen im oberen Bereich des Speichers dann etwa genauso schnell abfallen müssten. Es ist wahrscheinlich, dass aufgrund natürlicher Konvektion das im oberen Teil abgekühlte Fluid nach unten gesunken ist und so im Laufe der Messung eine thermische Schichtung hervorgerufen hat.

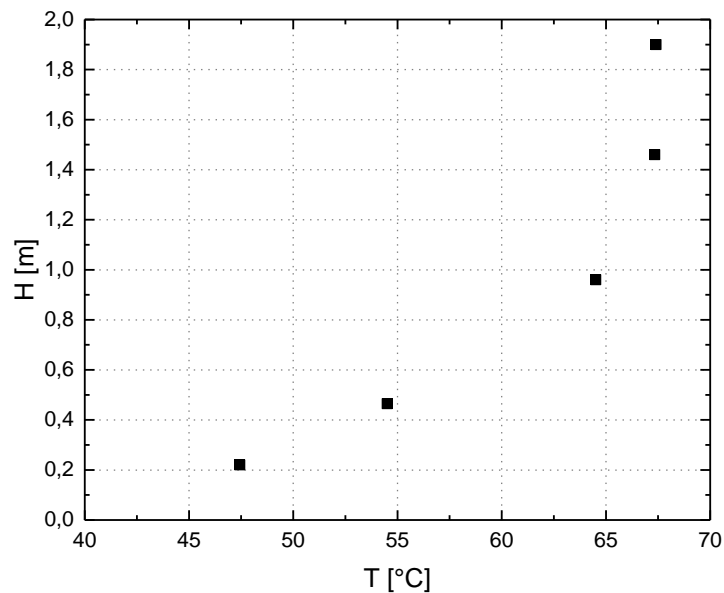


Abb. 4: Temperaturverlauf über die Speicherhöhe nach 160 h

Abbildung 4 zeigt das Temperaturprofil innerhalb des Speichers am Ende der Messungen nach 160 h. Die Temperaturen in der oberen Hälfte des Speichers sind nahezu gleich und haben sich insgesamt nur ca. 10 K abgekühlt. In der unteren Hälfte des Speichers fällt die Temperatur dann näherungsweise linear bis zu ihrem Minimum am Speicherboden ab. Dies zeigt, dass die schon angesprochene globale Abkühlung in Speichern mit homogener Temperatur eine thermische Schichtung hervorruft. In Abbildung 1a) wurde bereits gezeigt, dass zwischen der warmen und kalten Schicht eines Speichers eine Übergangszone vorliegt, die je nach hoher oder niedriger Qualität der Schichtung einen steilen oder flachen Temperaturgradienten aufweist. Das hier entstandene Temperaturprofil zeigt, dass keine Schicht mit homogener kalter Temperatur vorliegt und somit die Übergangszone direkt am Boden des Speichers beginnt. Der Temperaturgradient in dieser Zone ist als eher flach zu bewerten, da er sich über mehr als die halbe Speicherhöhe erstreckt. Damit ist die so entstandene Schichtung von niedriger Qualität. In bereits geschichteten Speichern könnte sich eine wie hier entstandene globale Strömung negativ auswirken, wenn sie die Durchmischung der zwei Schichten beschleunigt. Um darüber eine genaue Aussage treffen zu können, reicht es jedoch nicht aus, nur die Temperaturen während der Abkühlung zu messen. Zusätzlich muss das Strömungsfeld innerhalb des Speichers analysiert werden, was an dem verwendeten Testspeicher nicht möglich ist.

Versuchsaufbau

In Abbildung 5 ist die prinzipielle Versuchsanordnung zur Bestimmung der Konvektion an der Behälterwand dargestellt, die auf der Grundlage der Voruntersuchungen entwickelt und aufgebaut wird. Bei dem Speicher handelt es sich um einen Aufbau aus Polycarbonat, sodass der Speicher gleichzeitig robust gegenüber mechanischen Einwirkungen ist und optischen Zugang bietet. Eine eingesetzte Aluminiumplatte dient als Äquivalent für eine stark wärmeleitfähige Speicherwand. Im Gegensatz zu der Simulation aus den Voruntersuchungen wurde hier kein Kupfer verwendet, da Aluminium günstiger ist und gleichzeitig mit $\alpha_{Al} \approx 99 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ eine ähnlich gute Temperaturleitfähigkeit besitzt. Das sich ausbildende Strömungsfeld innerhalb

des Speichers wird mittels der Particle-Image-Velocimetry (PIV) gemessen. Dazu werden dem Wasser im Speicher Nylon-Tracerpartikel zugeführt, die vom Lichtschnitt eines Nd:YAG Lasers (Continuum Minilite) mit einer Pulsenergie von ca. 20 mJ und einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ beleuchtet werden. Parallel dazu werden die Temperaturen an 15 über die Höhe verteilten Messpunkten mit Typ K-Thermoelementen gemessen. Die Temperaturen in der Aluminiumplatte werden von eingelassenen PT100-Elementen aufgezeichnet. Die Speichermaße betragen $0,375 \text{ m} \times 0,375 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$ (Breite \times Tiefe \times Höhe) und ergeben ein Gesamtvolumen von $V_{\text{Sp}} \approx 100 \text{ l}$.

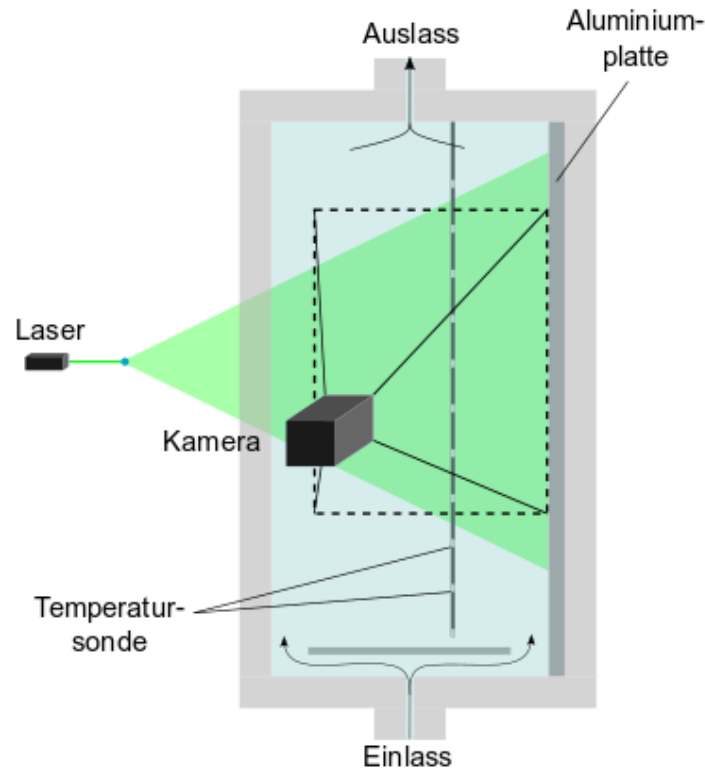


Abb. 5: Prinzipielle Versuchsanordnung zur Messung zweidimensionaler wandnaher Strömungsfelder.

Der Speicher wird initial mit heißem Wasser befüllt und anschließend wird über den unteren Zulauf kaltes Wasser eingeleitet und eine thermische Schichtung erzeugt. Außer den optischen Zugängen wird der Speicher mit Polystyrol gedämmt, um den Wärmeverlust über die Außenwände zu begrenzen. Eine Prallplatte begrenzt den übertragenen Impuls der Zulaufströmung. Damit der Speicher flexibel einsetzbar ist, kann er leicht demontiert werden. Dadurch ist die Aluminiumplatte leicht austauschbar und es können auch Messungen mit anderen Werkstoffen wie Kupfer oder Stahl durchgeführt werden. Wird überhaupt keine Platte in den Speicher eingesetzt, kann er dafür genutzt werden, die globalen Strömungseffekte nachzuvollziehen, die im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurden. Da das Polycarbonat etwa die gleiche Temperaturleitfähigkeit wie Wasser besitzt ($\alpha_{\text{PC}} \approx 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), wirken sich die Speicherwände in diesem Fall nicht störend auf die Strömung aus.

Dankesworte

Das Projekt wird 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

Castell, A., Medrano, M., Solé, C., Cabeza, L.F., 2010: "Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates", Renewable Energy, 35:2192-2199

Buhl, M., Platzer, B., 2017: "Strömungsverhalten in einem einfachen Schichtenlader", 25. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, 5. – 7. September 2017, Karlsruhe

Kong, L., Yuan, W., Zhu, N., 2016: "CFD Simulations of Thermal Stratification Heat Storage Water Tank with an Inside Cylinder with Openings", Procedia Engineering, 146:394-399

Abdelhak, O., Mhiri, H., Bournot, P., 2015: "CFD analysis of thermal stratification in domestic hot water storage tank during dynamic mode", Building Simulation, 8:421–429

levers, S., Lin, W., 2009: "Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank", Applied Energy, 86:2604-2614

