



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**  
Energieforschung und Cleantech

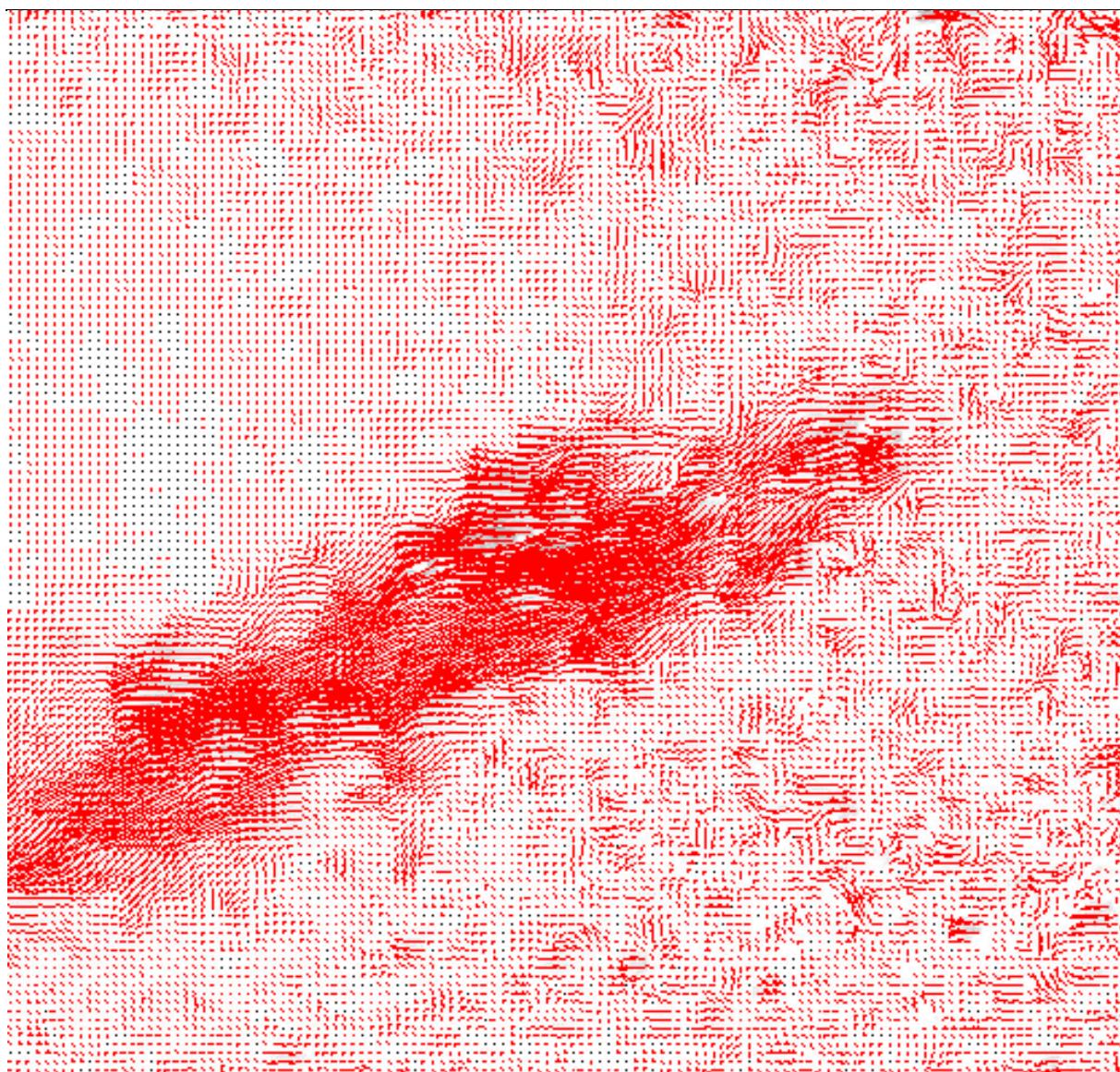
Schlussbericht vom 20.01.2020

---

## Applied Research Projekt

### DiffStrat - Stratification of Thermal Storage Tanks by Diffusor Design

---



Quelle: © SPF 2019



INSTITUT FÜR  
SOLARTECHNIK



**Datum:** 20.01.2020

**Ort:** Rapperswil

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

SPF Institut für Solartechnik  
Hochschule für Technik HSR  
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil  
[www.spf.ch](http://www.spf.ch)

**Autor/in:**

Robert Haberl, SPF, [robert.haberl@spf.ch](mailto:robert.haberl@spf.ch)  
Dominik Amstad, SPF, [dominik.amstad@spf.ch](mailto:dominik.amstad@spf.ch)  
Ivo Caduff, SPF, [ivo.caduff@spf.ch](mailto:ivo.caduff@spf.ch)  
Andreas Reber, SPF, [andreas.reber@spf.ch](mailto:andreas.reber@spf.ch)  
Michel Haller, SPF, [michel.haller@spf.ch](mailto:michel.haller@spf.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)  
Elimar Frank, [elimar.frank@frank-energy.com](mailto:elimar.frank@frank-energy.com)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/500315-03

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Zur Bewertung der Eigenschaften von verschiedenen Speichereinbauten wurden verschiedene optische Methoden zur Visualisierung von Strömungen evaluiert: Direct Shadowgraphy (DS), Background Oriented Schlieren (BOS) und Particle Image Velocimetry (PIV). Aufgrund der Aussagekraft der Methode, den Erfahrungen in der Gruppe sowie dem vorhandenen Equipment wurde eine Entscheidung zugunsten von PIV getroffen.

Zur Durchführung der Aufnahmen wurde eine Testinfrastruktur aufgebaut, die eine Konditionierung sowohl des Inhalts eines Glasspeichers als auch eines eintretenden Volumenstroms erlaubt. Damit konnten genau definierte Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Schliesslich wurden PIV Aufnahmen von Speichereintritten mit einem einfachen Sprührohr sowie mit Bogenrohr mit und ohne Lochblech durchgeführt.

Die Aufnahmen mit einfachen Sprührohren bestätigen den bisher lediglich aus CFD-Simulationen bekannten Effekt der ungleichmässigen Durchströmung der Austrittsöffnungen. Entsprechend sind diese nicht geeignet um die Strömungsgeschwindigkeit am Speichereintritt effektiv zu verringern.

Die Beladung eines Speichers durch ein Bogenrohr wurde in verschiedene Varianten untersucht: Mit verschiedenen Lochblechen zur Strömungsberuhigung sowie ohne ein solches Lochblech. In den PIV-Aufnahmen ist bei der Messung ohne Lochblech eine deutlich ausgeprägte Walze im Speicher zu beobachten. Der Einfluss dieser Walze auf die Verschiebung des Thermoklins im Speicher kann allerdings aus den Messdaten nicht ohne die Hilfe von unterstützenden Simulationen ermittelt werden.

## Résumé

Pour évaluer les propriétés de différents internes dans les réservoirs d'eau, différentes méthodes optiques de visualisation des écoulements ont été évaluées. Sur la base de la validité de la méthode, de l'expérience du groupe et du matériel disponible, une décision en faveur de la PIV a été prise.

Une infrastructure de test a été mise en place pour produire les images optiques avec cette méthode. Ainsi, des conditions de base exactement définies ont pu être créées.

Enfin, des images PIV des entrées de stockage ont été créées.

Les images optiques avec les tubes perforé confirment l'effet de l'écoulement irrégulier à travers les orifices de sortie, qui n'était connu auparavant que par des simulations CFD. Par conséquent, les tubes perforé ne sont pas adaptés pour réduire efficacement la vitesse d'écoulement à l'entrée du réservoir.

Le chargement d'un réservoir de stockage par un tube courbé a été étudié dans différentes variantes : Avec différentes tôles perforées pour l'apaisement des flux et sans cette tôle perforée. Sur les images PIV, on peut observer un roulis prononcé dans le réservoir lors de mesures sans plaque perforée. Cependant, l'influence de ce roulis sur le déplacement de la thermocline dans le réservoir ne peut être déterminée à partir des données de mesure sans l'aide de simulations justificatives.



## Summary

In order to evaluate the capabilities of different integrated storage components, different optical methods for the visualization of flows were evaluated: Direct Shadowgraphy (DS), Background Oriented Schlieren (BOS) and Particle Image Velocimetry (PIV). Due to the informative value of the method, the experiences in the group as well as the existing equipment, a decision was made in favor of PIV.

A test infrastructure was set up to carry out the images, which allows the conditioning of both the volume of a glass storage tank and an incoming volume flow. This enabled precisely defined boundary conditions to be created.

Finally, PIV images of storage tank inlets were taken with a simple spraying tube as well as with a elbow pipe with and without perforated plate.

The images taken with simple spraying tubes confirm the effect of uneven flow through the outlet openings, which was previously only known from CFD simulations. Accordingly, they are not suitable for effectively reducing the flow velocity at the storage inlet.

The loading of a storage tank through an elbow pipe was investigated in different variants: With different perforated plates for flow calming as well as without such a perforated plate. In the PIV images, a clearly pronounced roll can be observed in the storage tank when measuring without a perforated plate. However, the influence of this roll on the displacement of the thermocline in the storage tank cannot be determined from the measurement data without the aid of supporting simulations.

## Take-home messages

- Einfache Sprührohre mit grossen Öffnungen werden ungleichmässig durchströmt. Dadurch entstehen lokal hohe Strömungsgeschwindigkeiten mit entsprechend negativem Einfluss auf die Schichtung in Speichern.
- Bogenrohre mit Austrittsöffnung gegen einen gewölbten Klöpperboden führen zu einer walzenförmigen Strömung im Speicher. Durch den Einsatz eines Lochblechs kann eine homogene und gleichgerichtete Strömungsverteilung im gesamten Speicherquerschnitt erreicht werden.
- Die Thermokline im Speicher bleibt auch mit störenden Strömungen scharf, wird aber kontinuierlich verschoben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>Summary .....</b>	<b>4</b>
<b>Take-home messages .....</b>	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>1      Einleitung .....</b>	<b>8</b>
1.1    Ausgangslage und Hintergrund .....	8
1.2    Motivation des Projektes .....	8
1.3    Projektziele .....	8
<b>2      Vorgehen und Methode.....</b>	<b>9</b>
2.1    Optische Untersuchungen von Strömungen .....	9
2.1.1   Vergleich der Methoden .....	9
2.1.2   Beschreibung PIV Methode.....	11
2.2    Anlagenbeschrieb.....	12
2.2.1   Konzept.....	12
2.2.2   Konditionierungseinheit .....	12
2.2.3   PIV-Aufbau .....	15
<b>3      Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>16</b>
3.1    Aufnahmen Sprührohr .....	16
3.1.1   Material .....	16
3.1.2   Konditionierung.....	16
3.1.3   Beladung.....	17
3.1.4   PIV-Aufnahme .....	17
3.2    Ergebnisse Sprührohr.....	18
3.2.1   Temperaturen .....	18
3.2.2   PIV-Aufnahmen .....	19
3.3    Diskussion Sprührohr .....	22
3.4    Aufnahmen Bogenrohr .....	24
3.4.1   Konditionierung.....	26
3.4.2   Beladung.....	26
3.4.3   PIV-Aufnahme .....	26
3.5    Resultate Bogenrohr ohne Lochblech .....	27
3.5.1   Temperaturen .....	27
3.5.2   PIV-Aufnahmen .....	28
3.6    Resultate Bogenrohr mit Lochblech 1 (grosse Löcher) .....	30



3.6.1	Temperaturen .....	30
3.6.2	PIV-Aufnahmen .....	30
3.7	Resultate Bogenrohr mit Lochblech 2 (kleine Löcher) .....	32
3.7.1	Temperaturen .....	32
3.7.2	PIV-Aufnahmen .....	32
3.8	Diskussion Bogenrohr .....	34
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit .....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung .....</b>	<b>36</b>
5.1	Messungen .....	36
5.2	Simulationen .....	37
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>37</b>



## Abkürzungsverzeichnis

BOS	Background Oriented Schlieren
CFD	Computational Fluid Dynamics
D <sub>R</sub>	Rohrdurchmesser
D <sub>L</sub>	Lochdurchmesser
DS	Direct Shadowgraphy
DSLR	Digital Single Lens Reflex (digitale Spiegelreflexkamera)
DUM	Durchflussmessgerät
IHX	Immersed Heat Exchanger (eingetauchter Wärmeübertrager)
LED	Light Emitting Diode
N	Anzahl
PIV	Particle Image Velocimetry
WÜ	Wärmeübertrager



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

In der Wärmeversorgung ersetzen Wärmepumpen als erneuerbare Energiequelle in zunehmendem Mass klassische Wärmeerzeuger auf Basis von fossilen Brennstoffen. In der Kombination mit Wasserspeichern führt dies zu einigen Herausforderungen. Grund dafür sind zum einen die hohen Massenströme der Wärmepumpen, da diese in der Regel bzw. mit heute üblichen Kältemitteln mit kleiner Temperaturspreizung betrieben werden und zum anderen der grosse Einfluss der Senkentemperatur auf den Strombedarf der Wärmepumpen.

In den Projekten StorEx (Haller u. a. 2015) und BigStrat (Battaglia u. a. 2018) konnte gezeigt werden, wie wichtig vor diesem Hintergrund die Schichtung thermischer Speicher für effiziente Wärmesysteme mit modernen LowEx- und Niedertemperaturanwendungen ist.

Speicherherstellern sind diese Zusammenhänge durchaus bewusst. Entsprechend werden Massnahmen getroffen um die Durchmischung im Speicher durch mehr oder weniger geeignete Eintritts-Geometrien zu verhindern. Sehr oft werden dabei einfache Sprührohre zur horizontalen Einschichtung in einen Speicher mit in der Summe grosser Austrittsöffnung und Bogenrohre zur Nutzung der Rundung am Boden oder dem Deckel als grossen Diffusor genutzt.

## 1.2 Motivation des Projektes

Bei der Beurteilung von Speichereinbauten, welche die Schichtungseffizienz erhöhen sollen, bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten. So wird zum Beispiel die Anwendung von einfachen horizontalen Sprührohren im Planungshandbuch Fernwärme (QM Fernwärme, EnergieSchweiz) empfohlen, obwohl in den Speicherschichtungstests des SPF Speicher, welche mit diesen ausgestattet sind, bisher keine guten Resultate erzielen konnten. Von der Anwendung von zum Boden oder zum Speicherdeckel gerichteten Bogenrohren wird im gleichen Handbuch abgeraten, obwohl diese Konstruktionen in den Untersuchungen im Projekt BigStrat zu sehr guten Ergebnissen geführt haben. Auch die Frage, unter welchen Umständen ein Lochblech zur Abtrennung des Einströmbereichs vom restlichen Speichervolumen zielführend ist, konnte bisher nicht geklärt werden.

## 1.3 Projektziele

Ziel des Projektes ist es, Erkenntnisse zur Verwendung von folgenden Komponenten in Kombispeichern zu erhalten:

- Sprührohre
- Bogenrohre
- Lochbleche

Diese Erkenntnisse sollten als Unterstützung für Hersteller bei der Entwicklung neuer Speicherlösungen oder bei der Beurteilung der Einsatzgrenzen ihrer schon bestehenden Produkte eingesetzt und verbreitet werden.

Als ein Fernziel sollen aus den Erkenntnissen Empfehlungen für Anwender und Planer abgeleitet und publiziert werden. Mit den Autoren des Handbuchs QM Fernwärme wird eine Zusammenarbeit angestrebt, um die dort getroffenen Aussagen zu Sprüh- und Bogenrohren mit den Erkenntnissen aus diesem Projekt abzustimmen.



## 2 Vorgehen und Methode

### 2.1 Optische Untersuchungen von Strömungen

#### 2.1.1 Vergleich der Methoden

Zur Untersuchung der aus dem Einsatz der verschiedenen Komponenten resultierenden Strömungen sollen optische Methoden verwendet werden, mit deren Hilfe die jeweils entstehende Strömung visualisiert werden kann. In früheren Projekten wurden am SPF bereits verschiedene optische Methoden angewendet:

- Zugabe von Farbstoff in den Beladevolumenstrom (Frank u. a. 2008)
- Particle Image Velocimetry (Logie & Frank 2011)
- Schlierenbilder bzw. Shadowgraphy (KTI Projekte in Zusammenarbeit mit der Industrie, Resultate nicht öffentlich)

#### **Zugabe von Farbstoffen**

Die Zugabe von Farbstoffen wurde erfolgreich zum Testen von Schichteinrichtungen für low flow drainback-Systeme angewendet. Dazu wird der in einen Speicher eintretende Volumenstrom mit einem Farbstoff versetzt. Die Verteilung des eintretenden Gemisches im Gesamtvolumen kann damit genau beobachtet werden. Für die Beurteilung von Sprührohren und Bogenrohren wurde die Methode aus zwei Gründen nicht berücksichtigt:

1. Es muss für jedes Experiment das gesamte Flüssigkeitsvolumen getauscht werden um wieder einen mit klarem Wasser gefüllten Speicher zu erhalten.
2. Bedingt durch die hohen Volumenströme in typischen Wärmepumpenanwendungen würde das Speichervolumen in wenigen Minuten umgewälzt werden, was eine neue Konditionierung inklusive Flüssigkeits-Austausch zur Folge hätte.

#### **Particle Image Velocimetry (PIV)**

Die Methode der Particle Image Velocimetry (PIV) wurde am SPF zur Untersuchung von eingetauchten Wärmeübertragern (IHX) angewendet. Dazu werden dem Fluid reflektierende Partikel zugesetzt und durch einen Laser beleuchtet und in kurzem zeitlichen Abstand fotografiert. Aus den Partikelpositionen auf den Bildern kann die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit näherungsweise ermittelt werden.

In den bisher durchgeföhrten Untersuchungen wurde die Strömung an eingetauchten Wärmeübertragern (IHX) betrachtet. Die durch die freie Konvektion auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sind im Vergleich zur direkten Beladung eines Speichers niedrig. Durch mehrere Aufnahmen verschiedener Bereiche im Speicher mit einer Überlappung der Ausschnitte (ähnlich einer Panoramaaufnahme in der Landschaftsfotografie) kann ein Abbild eines grösseren Bereiches im Speicher erreicht werden. Voraussetzung dafür sind stabile Strömungsverhältnisse über einen längeren Zeitraum. Bei grösseren Strömungsgeschwindigkeiten ändern sich die Rahmenbedingungen zwischen den Aufnahmen auf Grund von Turbulenzen zu stark, so dass die Bilder nicht mehr zusammengefügt werden können. Trotz der Unsicherheit bezüglich der Grösse der Aufnahmen scheint die Methode grundsätzlich für die angestrebten Randbedingungen im vorliegenden Projekt geeignet zu sein.



## Schlierenaufnahmen / Shadowgraphy

Untersuchungen mit dem Prinzip der Schlierenaufnahmen bzw. der Shadowgraphy wurden durch das SPF bisher in KTI Projekten, bzw. in Projekten mit direkten Aufträgen aus der Industrie, verwendet.

Die Technik der Schlierenfotografie wurde bereits 1864 durch August Toepler entwickelt (Krehl & Engemann 1995) und wird zur Erzeugung eines Abbildes von örtlichen Änderungen des Brechungsindexes von Flüssigkeiten und Gasen verwendet. Die Änderung des Brechungsindexes kann durch Mischungsprozesse verschiedener Stoffe, durch thermische Konvektionsbewegungen oder durch Stosswellen verursacht werden. Der bisher verwendete Aufbau bestand aus einem rechteckigen Glastank mit einer quadratischen Grundfläche von 80 cm x 80 cm, einer weissen Rückwand im Tank, einem Baustrahler und einer Digitalkamera. Als problematisch erwies sich dabei der geringe Kontrast in den entstehenden Aufnahmen, sowie die fehlende Information über die räumliche Ausdehnung der beobachteten Phänomene. Grundsätzlich konnte aber mit relativ geringem Aufwand ein brauchbares Abbild von Strömungen erzeugt werden.

Settles & Hargather 2017 zeigen in einem ausführlichen Review-Artikel einen Überblick der heute verfügbaren Techniken der Schlierenfotografie, die vor allem in den vergangenen 15 Jahren enorme Fortschritte gemacht hat. Treibende Faktoren in dieser Entwicklung sind die digitale Fotografie und die zunehmende Verwendung von LED als Lichtquelle. Zwei der gezeigten Techniken kommen ohne aufwendige Linsen aus und sind damit grundsätzlich geeignet für die angestrebte Anwendung im vorliegenden Projekt: Direct Shadowgraphy (DS) und Background Oriented Schlieren (BOS). Die Gemeinsamkeit der beiden Methoden ist, dass nicht die Schlieren selbst, sondern eine Projektionsfläche fotografiert wird. Für die Methode DS muss diese Projektionsfläche aus einem extrem stark reflektierenden Material bestehen und durch eine sehr helle, punktförmige Lichtquelle beleuchtet werden. Für BOS-Aufnahmen ist ein Hintergrund mit einem eindeutigen Muster nötig, dessen Auflösung auf die Auflösung der verwendeten Kamera abgestimmt ist. An die Beleuchtung werden keine besonderen Anforderungen gestellt, das Resultat muss allerdings erst über Berechnungen am Computer erzeugt werden.

## Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden

In Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung der drei möglichen Aufnahmetechniken zur Visualisierung von Strömungen in einem Wasserspeicher zu sehen.

Im vorliegenden Projekt geht es vor allem darum, den Einfluss verschiedener Einflussgeometrien auf die Schichtung innerhalb der Wärmespeicher zu untersuchen. Die beschriebenen Messmethoden DS, BOS und PIV vertreten grundsätzlich verschiedene Interessen. Während PIV sich auf die Berechnung von Geschwindigkeitsfelder fokussiert, steht mit DS und BOS die Visualisierung von Temperatur- und Druckveränderungen im Vordergrund. Alle Methoden ermöglichen die Untersuchung der vorhandenen Fragestellung, jedoch auf unterschiedliche Weise. Deshalb gilt es diejenige Methode auszusuchen, welche eine einfache Umsetzung bei gleichzeitig wenig Aufwand bietet.



Tabelle 1: Gegenüberstellung verschiedener optischer Aufnahmetechniken zur Visualisierung von Strömungen in einem Wasserspeicher.

Direct Shadowgraphy (DS)	Background Oriented Schlieren (BOS)	Particle Image Velocimetry (PIV)
+ Einfacher Aufbau + Keine Nachberechnung + Video	+ Einfacher Aufbau + Sehr genaue Visualisierung der Temperatur möglich	+ Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes inkl. Wirbel + Erfahrung am SPF
- Nur qualitative Analyse - Keine Information über Tiefe - Unsicherheit bezüglich räumlicher Ausdehnung	- Nur qualitative Analyse (Vergleich) - Keine Information über die Tiefe - Keine Erfahrung mit der Methode am SPF	- Berechnung nur auf einer Ebene möglich - Aufwendige Nachbearbeitung und Auswertung - Synchronisierung von Laser und Kamera
Equipment		
<ul style="list-style-type: none"><li>Starke, punktförmige Lichtquelle<sup>1</sup></li><li>Retroreflektierender Hintergrund</li><li>Kamera (DSLR<sup>2</sup>)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Hintergrund mit eindeutiger Struktur (ca. 2 Pixel)</li><li>Kamera (DSLR)</li></ul>	<p>PIV System:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Hochgeschwindigkeits-Kamera</li><li>Laser</li><li>Partikel</li><li>Software</li></ul>

Grundsätzlich ist DS die einfachste Methode, bei der keine Nachbearbeitung der Aufnahmen nötig ist. Für die Aufnahmen mit PIV ist neben der Nachbearbeitung auch eine aufwendige Vorbereitung nötig, da Laser und Kamera synchronisiert werden müssen und ausserdem eine Kalibration der Anlage (Anteil der Partikel im Fluid und zeitlicher Abstand der Aufnahmen) nötig ist.

Allerdings sind sowohl für DS als auch für BOS Anschaffungen im Equipment nötig: Für DS sollte sowohl eine starke, punktförmige Lichtquelle zur Verfügung stehen als auch ein stark reflektierender Hintergrund. Laut Aussagen von Settles und Hargathner ist das geeignete Material für DS deutlich teurer als ein Hintergrund für BOS, jedoch günstiger als die bereits verworfenen Alternativen mit Parabolspiegeln oder anderen optischen Geräten. Zudem gibt es eine erhebliche Unsicherheit der Haltbarkeit der Hintergrundmaterialien bei der Anwendung in einem Wasserspeicher.

Aus diesem Grund (Material) und wegen der fehlenden Erfahrung innerhalb der Gruppe mit der BOS-Methode wurde eine Entscheidung zugunsten von PIV getroffen, bei der alle notwendigen Komponenten bereits vorhanden waren.

### 2.1.2 Beschreibung PIV Methode

Particle Image Velocimetry (PIV) ist ein berührungsloses optisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in der Strömungsmechanik. In kurzen zeitlichen Abständen werden Partikel im

<sup>1</sup> Phosphor-conversion LED mit Emitterdurchmesser in der Grössenordnung von 1mm, so hell wie möglich.

<sup>2</sup> Digital single lens reflex / Digitale Spiegelreflexkamera.



Fluid fotografiert. Aus den Partikelpositionen auf den Bildern kann die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit näherungsweise ermittelt werden.

Dazu werden dem zu untersuchenden Fluid kleinste Partikel, die sogenannten Tracer, zugesetzt. Bei Strömungsanalysen in Wasser werden meist mikroskopisch kleine, mit Luft gefüllte Glaskugeln verwendet. Ebenso geeignet sind Kunststoffpartikel aus Polyamid. Die Dichte der Partikel muss ähnlich der Dichte des zu untersuchenden Fluides gewählt werden. Der Durchmesser der in diesem Projekt verwendeten Glas-Partikel liegt zwischen 10 bis 100 µm.

Die Belichtung der Tracer erfolgt bei den vorgestellten Untersuchungen durch einen zu einer Ebene aufgeweiteten Double-Pulsed Laser, welcher aus zwei eigenständigen Laser aufgebaut ist. Der Grund für den Einsatz eines Double-Pulsed Laser ist, dass ein sehr kleines Zeitintervall  $\Delta t$  zwischen den beiden Bildaufnahmen verlangt wird, welches die Repetitionsrate eines einzigen Lasers nicht zulassen würde. Die Zeit zwischen den beiden Bildaufnahmen wird somit nicht durch die Repetitionsrate des Lasers, sondern die minimale Zeit einer Doubleframe-Aufnahme der Kamera limitiert.

Vor der Aufnahme der Bilder muss eine Kalibration des gesamten PIV-Systems erfolgen, um folgenden Parameter des Systems abzustimmen:

- Konzentration der Tracer
- Zeitintervall der Aufnahmen
- Bildausschnitt der Aufnahme (Brennweite des Objektives und Abstand von der belichteten Ebene)
- Perspektivische Korrektur der Aufnahme

Die perspektivische Korrektur wird mittels einer Kalibrationsplatte auf die Laser-Ebene kalibriert, die nicht exakt parallel zum verwendeten Sensor der Kamera liegt. Dazu wird die Kalibrationsplatte präzise auf die LASER-Ebene ausgerichtet, so dass das Laserlicht gerade die weissen, erhabenen Punkte der Platte berührt und fotografiert. Aus dem Abstand der fotografierten Punkte, welcher als fixer Wert im Programm hinterlegt ist, wird die perspektivische Kalibration errechnet. In Abbildung 16 (im Kapitel 3.4) ist diese Kalibrationsplatte zu sehen.

## 2.2 Anlagenbeschrieb

### 2.2.1 Konzept

In einem durchsichtigen Tank werden verschiedene Diffusoren bzw. Speichereinbauten installiert. Vor dem Experiment wird der Speicher, bzw. das Wasser im Speicher, auf eine genau definierte Temperaturverteilung konditioniert. Danach wird ein Volumenstrom mit vorgegebener Temperatur über die Speichereinbauten in den Speicher geführt.

Von den entstehenden Strömungen wird mittels PIV ein Strömungsbild gemacht. Zudem stehen die Temperaturen des Speicherinhaltens als Information über den Einfluss der Geometrie zur Verfügung.

### 2.2.2 Konditionierungseinheit

Der Aufbau zur Umsetzung des oben beschriebenen Ansatzes ist in Abbildung 1 dargestellt. Das System unterteilt sich in drei verschiedene Kreise, die durch Wärmeübertrager (WÜ) voneinander getrennt sind: Ein Pufferspeicher und ein Glastank mit jeweils variabler hydraulischer Einbindung sowie ein Thermostatbad zum Heizen und Kühlen.

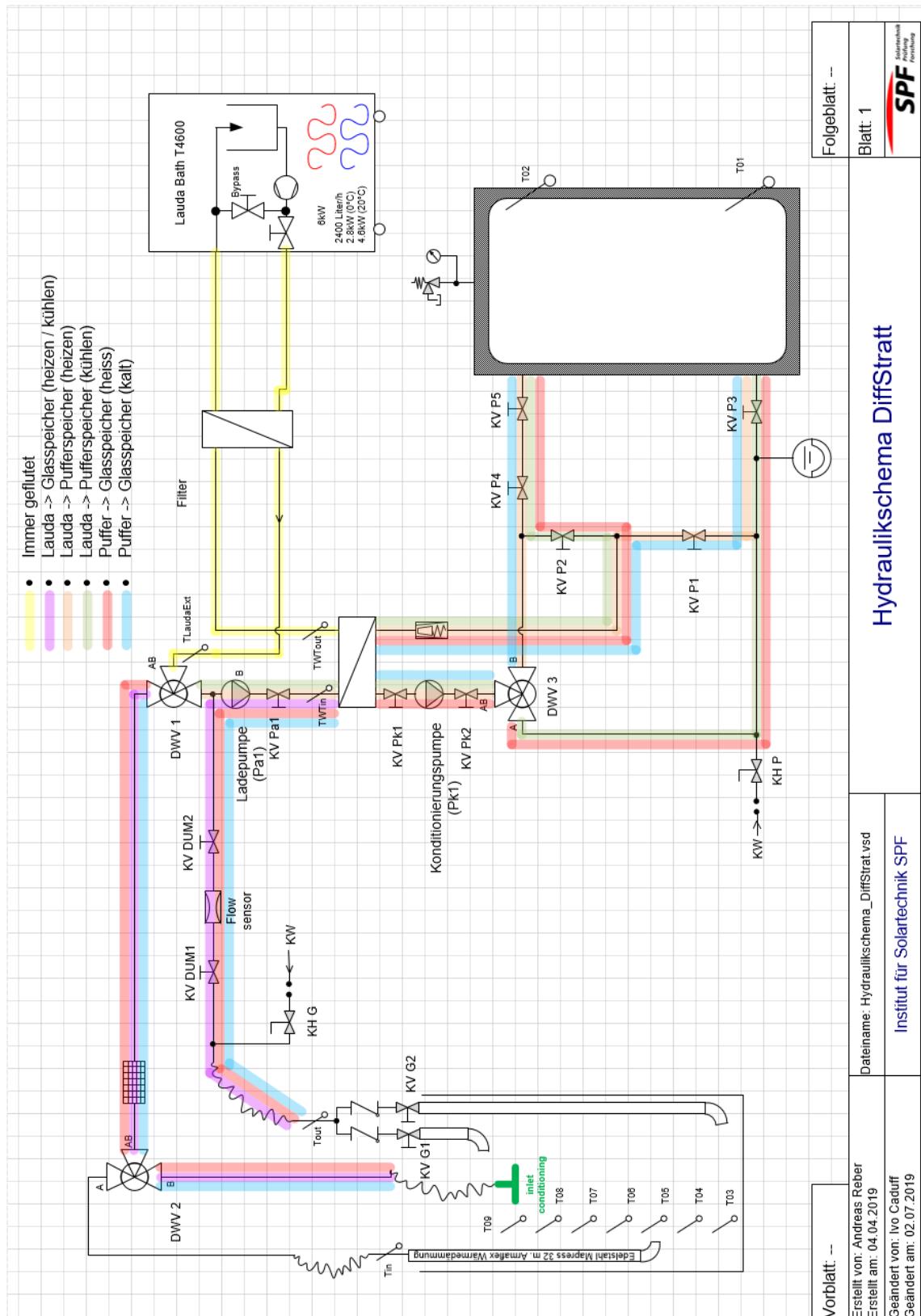


Abbildung 1: : Hydraulikschemata zur Konditionierung im Projekt DiffStratt. DW: Drewegeventil; KH: Kugelhahn; KV: Kugelventil.



Vor der Durchführung eines Experimentes müssen verschiedene Komponenten des Messaufbaus vorbereitet werden. Diese Konditionierung bezieht sich auf:

- Die Temperaturverteilung im Glastank zu Beginn eines Experimentes.
- Die Beladung des Pufferspeichers zur Unterstützung des Lauda Bades.

### **Thermostatbad**

Als Thermostatbad wird ein Gerät der Firma Lauda sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen eingesetzt. Es ist ein offenes System mit eigener Pumpe. Das Laudabad wird manuell auf eine Solltemperatur eingestellt. Das Fluid im Kreis ist ein Wasser/Glykol Gemisch. Die Leistung des Gerätes beträgt 2.8 kW (Kühlen bei 0 °C) bzw. 6 kW (Heizen). Diese Leistung ist nicht ausreichend für eine instantane Konditionierung des Beladevolumenstroms. Aus diesem Grund wird ein Puffer eingesetzt, der über einen längeren Zeitraum für die Durchführung des Experimentes konditioniert (geheizt oder gekühlt) werden kann. Während des Experimentes steht das Laudabad dann als "Regelleistung" zum Erreichen der gewünschten Temperatur zur Verfügung.

### **Pufferspeicher**

Der Pufferspeicher hat ein Volumen von ca. 1 m<sup>3</sup>. Er wird vor Beginn der Messung über das Thermostatbad auf eine Temperatur  $T_{\text{Puffer}} > T_{\text{inVL,exp}}$  (im Fall warmer Speichereintritt) oder  $T_{\text{Puffer}} < T_{\text{inVL,exp}}$  (im Fall kalter Speichereintritt) konditioniert. Dazu kann über das Dreiegeventil und die verschiedenen Kugelventile der Durchsatz so eingestellt werden, dass der Speichereintritt oben und Speicheraustritt unten ist, oder umgekehrt. Der Puffer ist mit Frischwasser gefüllt und wird möglichst nicht entleert.

### **Glastank**

Der Glastank hat eine quadratische Grundfläche mit einer Seitenlänge von 0.8 m und eine Höhe von 1.8 m. Als Fluid im Kreis "Glastank" wird Wasser mit Zugabe von reflektierenden Partikeln verwendet. Für die Experimente muss das Fluid sauber und in der korrekten Mischung vorliegen. Der Kreis ist offen (Glasspeicher gegen die Umgebung oben offen). Eine eigene Pumpe sorgt für den Durchsatz im Kreislauf.

Mittels Dreiegeventil kann zwischen Konditionierung des Speichers und Speichereintritt mittels Diffusor umgeschaltet werden. Über Kugelventile kann der Rücklauf aus dem Speicher unten oder aus dem Speicher oben geführt werden. Der Glastank ist mit einer Isolation versehen. Entsprechend den Anforderungen im Experiment (gewünschter Ausschnitt) können Sichtfenster freigelassen werden für Laser und Kamera.

### **Hydraulik**

Die Verschaltung der Komponenten Laudabad, Pufferspeicher und Glastank erfolgt über ein System aus Rohrleitungen, Pumpen und Ventilen. Über verschiedene Ventilstellungen können unterschiedliche Betriebszustände erreicht werden. Diese Zustände sind in der Abbildung 1 farblich markiert:

- Konditionierung des Glasspeichers (sowohl Heizen als auch Kühlen) mittels Laudabad
- Heizen des Pufferspeichers mittels Laudabad
- Kühlen des Pufferspeichers mittels Laudabad
- Erwärmen des Beladevolumenstroms während des Experiments durch den Pufferspeicher (das Laudabad wird verwendet, um die Solltemperatur exakt einzustellen).
- Kühlen des Beladevolumenstroms während des Experiments durch den Pufferspeicher (das Laudabad wird verwendet, um die Solltemperatur exakt einzustellen).



## Messtechnik

Sowohl der Durchsatz als auch die Ein- und Austrittstemperaturen des Beladevolumenstroms werden erfasst. Zur Ermittlung der Temperaturen im Speicher wird eine Fühlerlanze mit 7 gleichmäßig verteilten Temperaturfühlern eingesetzt (T03 bis T09).

Die Temperaturmessungen erfolgten mit 4-Leiter Pt100 Fühlern mit einer Standardabweichung von 0.1 K. Die Messung des Beladevolumenstroms erfolgte mit einem Durchflussmessgerät nach dem Coriolis-Prinzip mit einer Standardabweichung von 0.1 %.

### 2.2.3 PIV-Aufbau

Der PIV Aufbau besteht aus einem Laser und einer Hochgeschwindigkeitskamera, wobei diese Komponenten so positioniert werden, dass die Bildachse im rechten Winkel zur durch den Laser beleuchteten Fläche steht. Die Komponenten "Power Supply" und der zugehörige Rechner sind auf einem Tisch angeordnet. In Abbildung 2 ist die Disposition im Labor dargestellt.

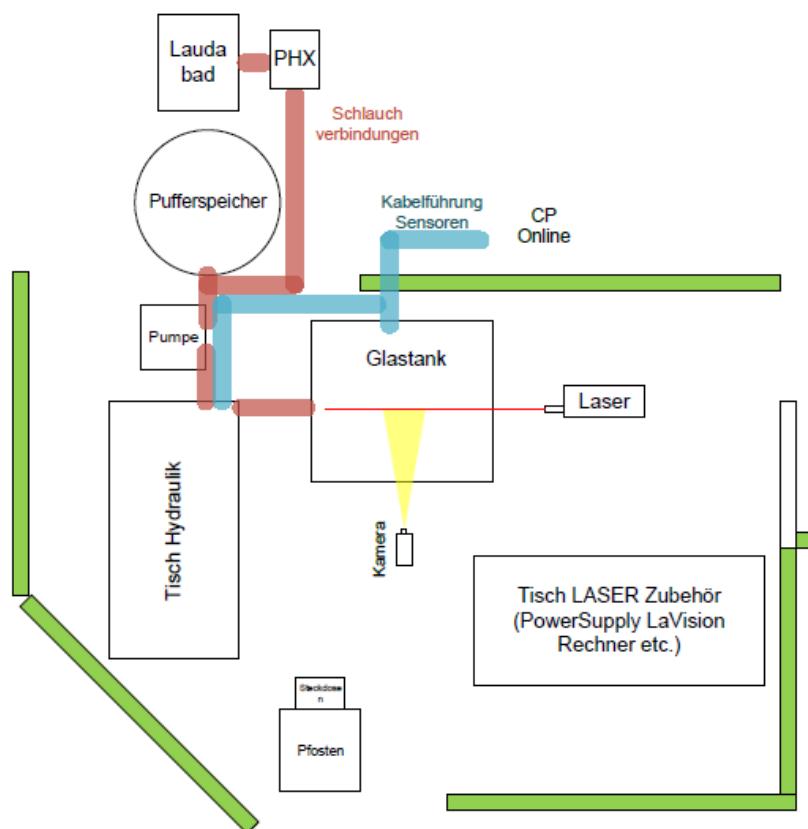


Abbildung 2: Disposition des Testaufbaus im Labor Eichwies.

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben wurde sendet der Laser zwei Impulse in kurzem zeitlichen Abstand aus. Dazu wurde ein Double-Pulsed Nd:YAG<sup>3</sup>-Laser der Firma LaVision<sup>4</sup> verwendet.

<sup>3</sup> Festkörper-LASER mit Neodym-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat Kristall als LASER-aktives Medium

<sup>4</sup> LaVision GmbH, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 Goettingen.



Als Hochgeschwindigkeitskamera wurde das Modell "Imager Pro X 4M", ebenfalls von der Firma LaVision, eingesetzt. Der CCD-Sensor der Kamera hat eine Auflösung von 2048x2048 Pixeln bei einer Sensorgrösse<sup>5</sup> von ca. 15x15 mm<sup>2</sup>. Die Kamera wurde mit einem Objektiv mit 50 mm Brennweite bestückt (Fixbrennweite).

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Aufnahmen Sprührohr

#### 3.1.1 Material

In Abbildung 3 ist das verwendete Sprührohr zu sehen. Das Rohr hat eine Länge (ab dem eingeschraubten Gewinde) von ca. 60 cm. Die Öffnungen sind seitlich in gleichmässigem Abstand angeordnet und haben einen Durchmesser von je 23 mm. Insgesamt ergibt dies einen Querschnitt der Austrittsöffnungen von 83 cm<sup>2</sup>. Würden diese Öffnungen gleichmässig durchströmt, so wäre die Austrittsgeschwindigkeit bei einem Volumenstrom von 2 m<sup>3</sup>/h weniger als 0.07 m/s<sup>6</sup>.

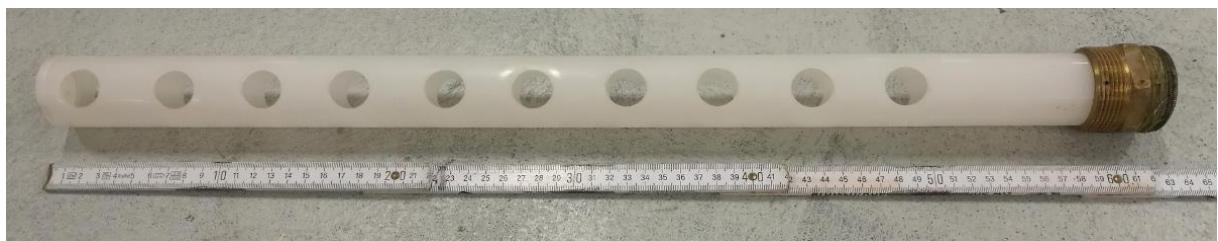


Abbildung 3: Verwendetes Sprührohr aus der Messung.

#### 3.1.2 Konditionierung

Der Glastank ist bis auf 1.25 m gefüllt, so dass alle Temperaturfühler T03 – T09 im Wasser sind. Das Sprührohr ist auf das in der Höhe verstellbare Einlaufrohr aufgeschraubt und hängt horizontal im Glastank auf einer Höhe von ca. 0.9 m knapp über dem Temperaturfühler T07 (0.85 m ab Boden). Mit dem Konditionierungseinlass wurde der Tank oberhalb des Sprührohrs (ab ca. 0.95 m) auf 54 °C konditioniert gemäss Abbildung 4. Die Temperatur T07 unterhalb der Thermokline stieg bis zum Ende der Konditionierung auf 23.5 °C. Die Temperaturen darunter (T03 – T06) lagen bei 21.5 °C.

<sup>5</sup> Zur Einordnung der Sensorgrösse: Ein Sensor im häufig verwendeten APS-C Format hat eine Grösse von 22.3x14.9 mm<sup>2</sup>.

<sup>6</sup> Generell wird für eine ruhige Einströmung eine homogene Austrittsgeschwindigkeit < 0.1 m/s empfohlen.

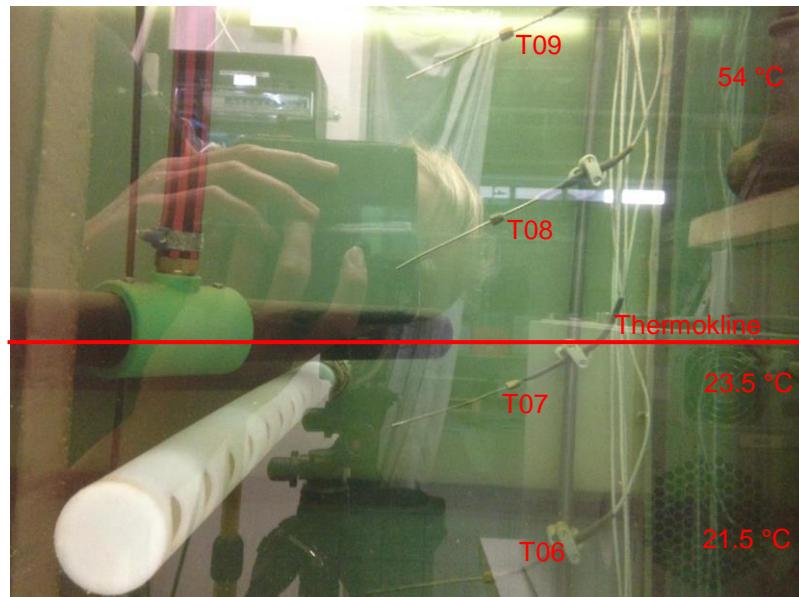


Abbildung 4: Konditionierung des Glastanks für die Messung mit Sprührohr.

### 3.1.3 Beladung

Für die Messung wurde der Konditionierungseinlass aus dem Speicher entfernt. Durch das Sprührohr wurde ein Volumenstrom von knapp 2000 l/h in den Speicher geführt. Der Pufferspeicher wurde vorgängig auf 32 °C konditioniert. Der Vorlauf in den Glastank durch das Sprührohr wurde mit Hilfe des Pufferspeichers möglichst auf 28 °C temperiert um einen Temperaturunterschied von >5 K zwischen Vor- und Rücklauf zu erhalten. Für den Rücklauf wurde der untere Stutzen verwendet. Die Temperaturen im Tank, sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen ( $T_{in}$  und  $T_{out}$ ) wurden während des ganzen Vorgangs gemessen.

### 3.1.4 PIV-Aufnahme

Es wurden PIV Aufnahmen in drei verschiedenen Ebenen gemacht: An der Spitze des Sprührohrs (letzte Austrittsöffnung), in der Mitte und hinten (erste Austrittsöffnung). Die Ebenen verlaufen senkrecht zum Sprührohr durch die Mitte des jeweiligen Austrittsloches, wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Kamera wurde in der Verlängerung des Sprührohrs so positioniert, dass der Bildausschnitt das Sprührohr und der rechte Austrittsbereich erfasste. Die Kamera wurde nicht verstellt für die drei Ebenen, was dazu führt, dass der Bildausschnitt vorne kleiner ist als hinten. Wegen der Änderung des Abstandes von Laser und Kamera zwischen den Aufnahmen war jeweils eine neue perspektivische Korrektur nötig. Aus diesem Grund ist der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen mit ca. 11 min relativ gross.

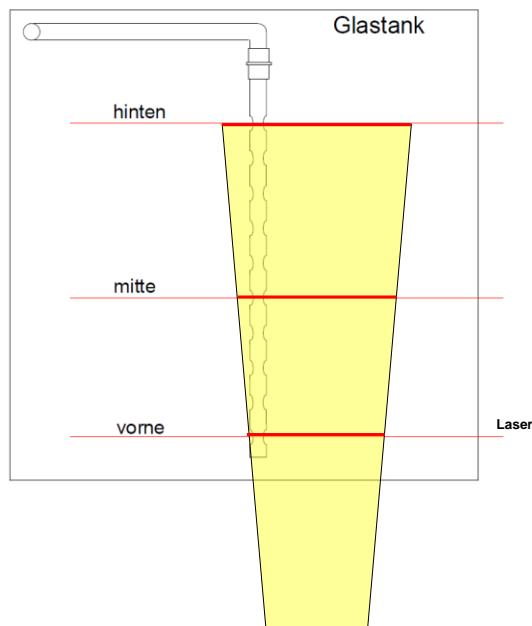


Abbildung 5: Positionierung von Kamera und Laser für die Aufnahmen des Sprührohrs.

## 3.2 Ergebnisse Sprührohr

### 3.2.1 Temperaturen

In Abbildung 6 ist die Temperaturverteilung im Speicher während der Messung, sowie die Ein- und Austrittstemperatur des Beladevolumenstroms inklusive des Durchsatzes, zu sehen. Die Zeitpunkte der PIV-Aufnahmen sind als Strich-Punktierte Linien zu sehen.

Der Speichereintritt ist räumlich knapp über dem Sensor T07 und deutlich unter dem Sensor T08. Die Eintrittstemperatur des Fluides ist tiefer als die Temperatur im Speicher an der Position des Eintritts. Damit sollte ein Prozess wie z.B. die Beladung des Raumheizungsteils in einem Kombispeicher nachgebildet werden, wobei der obere Teil des Speichers nicht durchmischt werden sollte.

Die Temperaturschichtung direkt über dem Sprührohr ging bereits nach etwa 3 Minuten verloren, was daran zu erkennen ist, dass die Temperatur T08 dort sehr schnell nach dem Start der Messung abfällt. Die Temperaturen T03-T07 zeigen, dass sich der Speicher in diesem Bereich schnell, aber mit klarer Thermokline, aufwärmst. Die Sensoren T06 bis T03 zeigen nacheinander ein sprunghaftes Ansteigen der Temperatur, wobei die jeweils untenliegenden Sensoren zunächst konstant bleiben. Dabei muss beachtet werden, dass aus der Rücklauf aus dem Speicher unten entnommen wird.

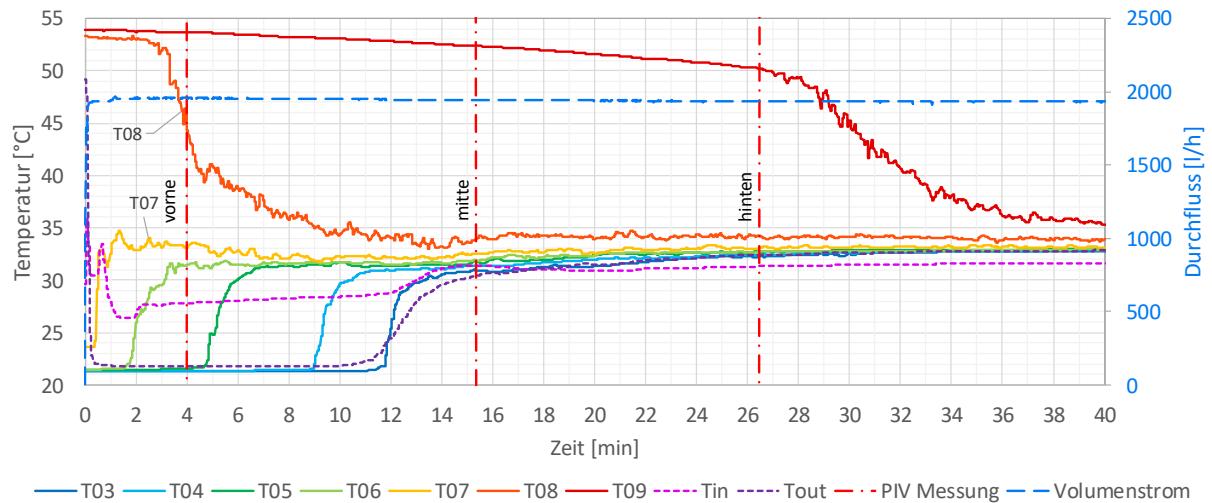


Abbildung 6: Rahmenbedingungen der PIV-Messungen des Sprührohres. Gezeigt werden die Temperaturen im Glastank (T03 – T09), die Ein- und Austrittstemperatur der Beladung mit dem zugehörigen Volumenstrom sowie die Zeitpunkte der einzelnen Aufnahmen.

### 3.2.2 PIV-Aufnahmen

In Abbildung 7 bis Abbildung 9 sind die unbearbeiteten Bilder der drei PIV-Aufnahmen des Sprührohres zu sehen. Bedingt durch die verschiedene Entfernung zur Kamera bei gleicher Brennweite ist der Bildausschnitt nicht identisch. Die Aufnahme "vorne" zeigt einen Ausschnitt von 180 mm x 180 mm, die Aufnahme "mitte" zeigt 230 mm x 230 mm und die Aufnahme "hinten" zeigt einen Ausschnitt von 280 mm bis 280 mm. Zu sehen ist jeweils die erste von zwei Aufnahmen, aus denen dann eine Grafik mit den Geschwindigkeitsvektoren gerechnet wird.

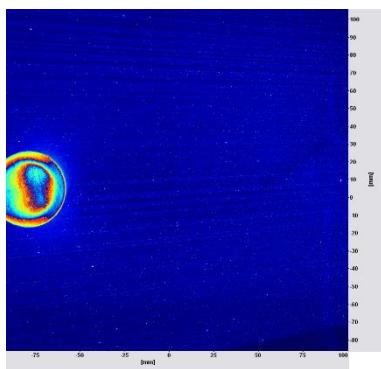


Abbildung 7: Unbearbeitete Aufnahme des Sprührohres vorne, am Ende des Sprührohres.

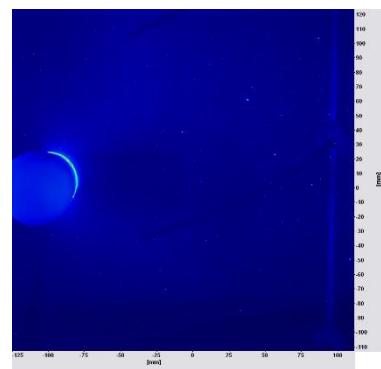


Abbildung 8: Unbearbeitete Aufnahme des Sprührohres mitte.

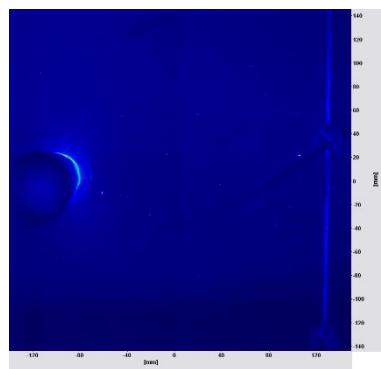


Abbildung 9: Unbearbeitete Aufnahme des Sprührohres hinten, am "Anfang" des Sprührohrs in Fluidströmungsrichtung.

Abbildung 10 zeigt den Austritt aus der vordersten der 10 seitlichen Öffnungen des Sprührohres, Abbildung 11 den Austritt der 6. Öffnung (in etwa der Mitte des Sprührohres) und Abbildung 12 den Austritt an der ersten Öffnung in Fluidflussrichtung.

In den Bildern wird deutlich, dass der Austritt von Fluid durch die seitlichen Öffnungen in den Speicher vor allem an der Spitze des Sprührohres stattfindet. In dieser Ebene ist ein deutliches, sich relativ breit auffächerndes Geschwindigkeitsfeld zu erkennen. Ab Austritt aus dem Sprührohr ist der Bereich mit der



hohen Strömungsgeschwindigkeit 10 cm bis 15 cm lang, bevor eine Zone mit geringen Geschwindigkeiten zu sehen ist. Ursache dafür könnte sein, dass der Austritt aus dem Sprührohr nicht parallel zur gewählten Aufnahmeebene stattfindet und sich entsprechend in einer anderen Ebene fortsetzt.

An der mittleren Öffnung deutet sich lediglich ein Strömungsfeld vom Austritt nach aussen an, wobei sich eine walzenförmige Ausgleichsströmung bildet. Die Geschwindigkeiten in dieser Ebene bleiben generell eher tief (die Geschwindigkeit ist an der Länge der Pfeile in der Grafik zu sehen).

An der ersten Öffnung (beim Eintritt in den Speicher) kann praktisch keine Austrittsströmung festgestellt werden. Einzelne lange, aber chaotisch angeordnete Strömungsvektoren sind auf Fehlinterpretationen der Software zurückzuführen.

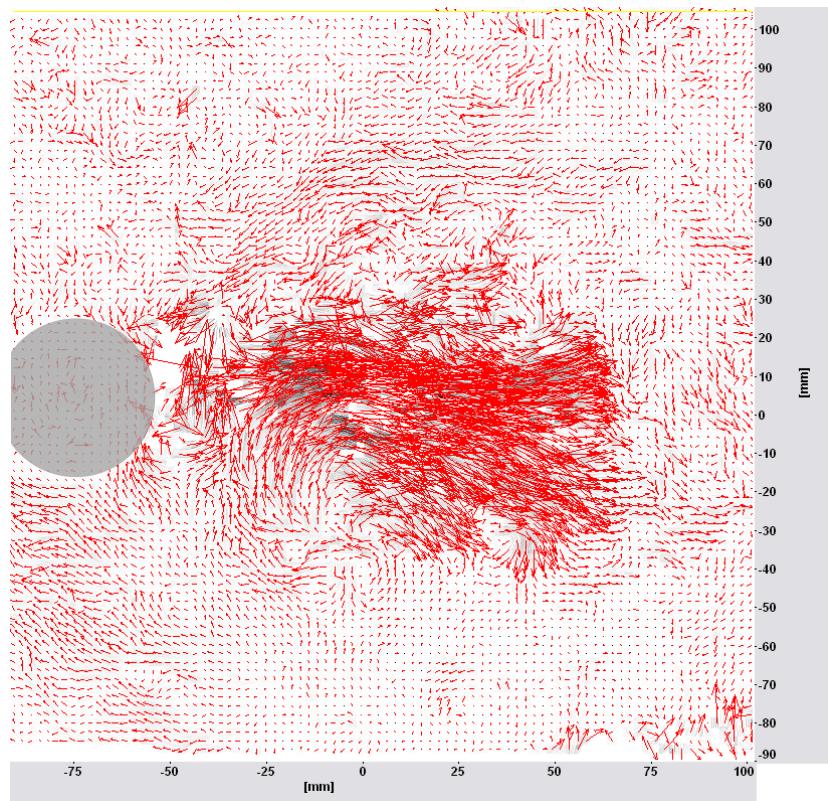


Abbildung 10: Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene senkrecht zur Spitze des Sprührohres.

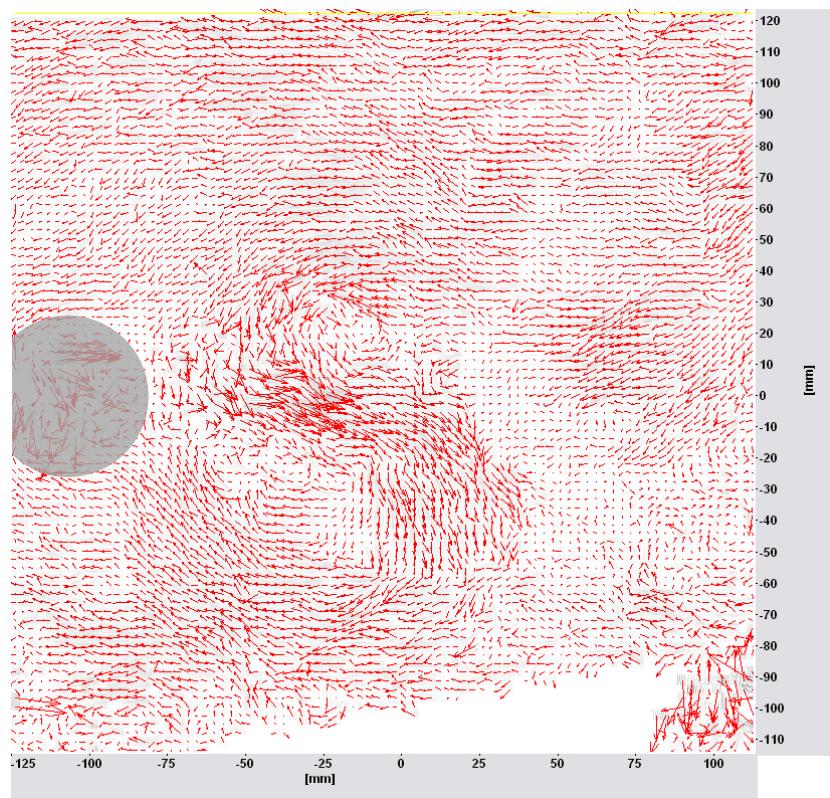


Abbildung 11: Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene senkrecht zur Mitte des Sprührohres.

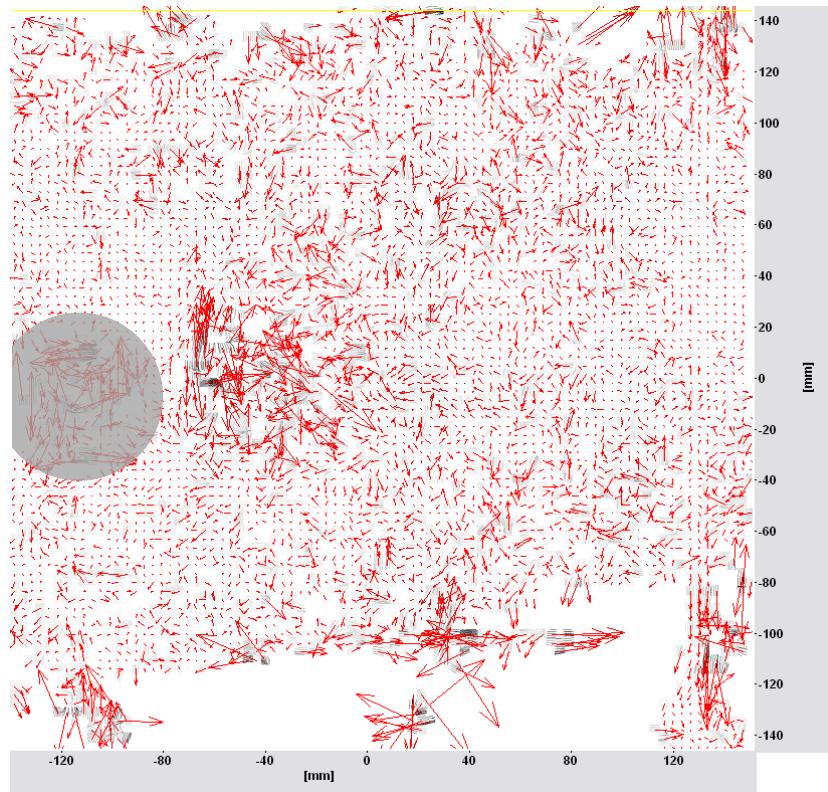


Abbildung 12: Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene an der ersten seitlichen Öffnung des Sprührohrs.

### 3.3 Diskussion Sprührohr

Abbildung 13 zeigt eine andere Anordnung der Speichertemperatur. Für verschiedene Zeitpunkte der Messung ab dem Ende der Konditionierung (Zeitpunkt 0.00) ist jeweils ein Graph der Temperatur nach der Höhe der Messstelle im Speicher zu sehen. Zum Zeitpunkt 0.00 ist ein deutlicher Thermoklin zwischen den Sensoren T07 und T08 zu sehen (ca. 84 cm bis 102 cm).

Während der Beladung werden pro 5 Minuten aus dem unteren Bereich des Speichers ca. 170 Liter entnommen und mit höheren Temperatur (ca. 28 °C) in einer Position von ca. 85 cm ab Boden wieder in den Speicher geführt.

Bei optimaler Einschichtung würde zu den Zeitpunkten 5.00 und 10.00 ein zweiter Thermoklin ausgeprägt, der jeweils um eine Sensorposition nach unten wandern und der Bereich T08/T09 homogen bei hohen Temperaturen erhalten bleiben. In der Darstellung wären entsprechend zwei Thermokline zu sehen. Stattdessen ist im Verlauf der Messdaten zu sehen, dass sich der Bereich unterhalb der Einschichtung durchmischt.

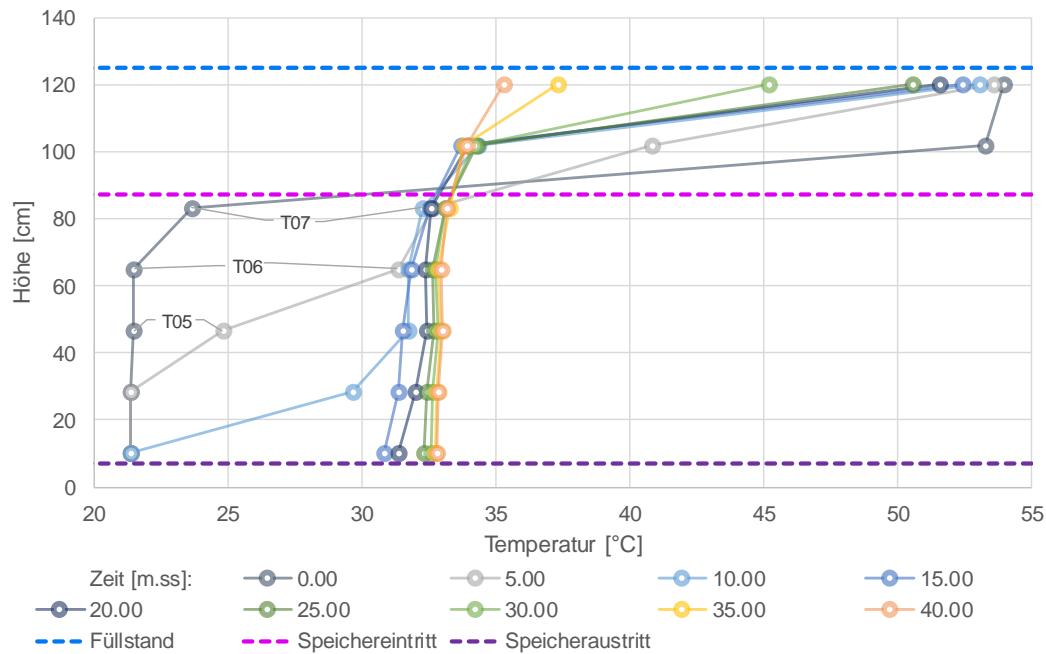


Abbildung 13: Temperaturverteilung im Speicher, geordnet nach der Zeit.

Oberhalb des Sprührohres (am Sensor T08) sinkt die Temperatur innerhalb der ersten 5 Minuten von 53 °C auf 42 °C und in den nächsten 5 Minuten auf die Temperatur am Sensor T07. Dies zeigt, dass der Thermoklin nach oben verschoben wird. Je näher sich der Thermoklin in Richtung Sensor T09 knapp unter der Wasseroberfläche verschiebt desto schneller ist das Absinken an der Position T09 zu erkennen.

Der Abstand der Speicherwand vom Austritt aus dem Sprührohr ist relativ gross, so dass sich die Strömung nicht bis zur Wand ausbreiten konnte. Mit der gewählten Baulänge wäre dies in einem herkömmlichen Speicher mit ca. 80 cm Durchmesser auch nicht der Fall. Bei grösserer Baulänge würde die Spitze allerdings zu nahe an die Speicherwand ragen.

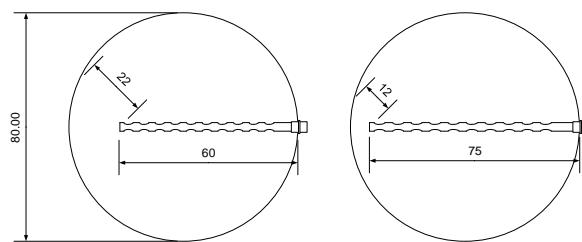


Abbildung 14: Abstand der Spitze von Sprührohren bei unterschiedlicher Baulänge.

Das verwendete einfache Sprührohr hat an je 10 Austrittsöffnungen an beiden Seiten. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben ergäbe sich damit, unter Annahme einer gleichmässigen Durchströmung der Austrittsöffnungen, eine Strömungsgeschwindigkeit  $< 0.1 \text{ m/s}$  im vorliegenden Experiment. Die Messungen zeigen allerdings, dass der Austritt aus dem Sprührohr vor allem an dessen Spitze stattfindet. In Battaglia u. a. 2018 wird eine Formel vorgestellt, nach der die Bohrungen mit dem Ziel einer homogenen Durchströmung dimensioniert werden müssen:



$$D_L \leq 0.7 D_R / \sqrt{N}$$

Formel 1

Bei einem gegebenen Rohrdurchmesser ( $D_R$ ) von 2.54 cm (1") und einer Anzahl (N) von 10 Löchern je Seite sollte demnach der Durchmesser der Bohrungen kleiner als 0.6 cm sein, was allerdings zu einer Strömungsgeschwindigkeit von über 1 m/s führen würde. Eine Kombination aus der Anzahl der Austrittsöffnungen und dem passenden Durchmesser für eine homogene Durchströmung zum einen und einer Austrittsgeschwindigkeit < 0.1 m/s ist bei dem gegebenen Durchmesser des einfachen Sprührohres und dem Massenstrom im Experiment (ca. 2 m<sup>3</sup>/h) nicht möglich.

### 3.4 Aufnahmen Bogenrohr

Der Speichereintritt durch ein Bogenrohr wurde in drei verschiedenen Varianten gemessen:

- Mit einem Lochblech mit grossen Löchern ( $\varnothing$  10 mm) (Abbildung 18)
- Mit einem Lochblech mit kleinen Löchern ( $\varnothing$  3 mm) (Abbildung 17)
- Ohne ein Lochblech.

Die Bedingungen und Konditionierung des Tanks waren im Rahmen der Möglichkeiten bei allen Varianten identisch.

Um eine Verteilung der Strömung wie im realen Einsatz zu erreichen wurde im eckigen Glastank ein Klöpperboden versenkt und angeströmt (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16). Dieser Klöpperboden hat einen Durchmesser von 740 mm. Das Lochblech, falls verwendet, wurde auf eingeschweisste Halterungen am Rand des Klöpperbodens gelegt, wobei drei M10 Gewindestangen zur Fixierung der Bleche dienen. Das Bogenrohr wurde in der Lage und Höhe so positioniert, dass der Einlauf in der Mitte des Klöpperbodens auf der Höhe des Lochblechs, bzw. des Randes geschieht. Die Lochbleche haben dort eine Aussparung für das Bogenrohr.



Abbildung 15: Im eckigen Glasspeicher versenkter Klöpperboden.

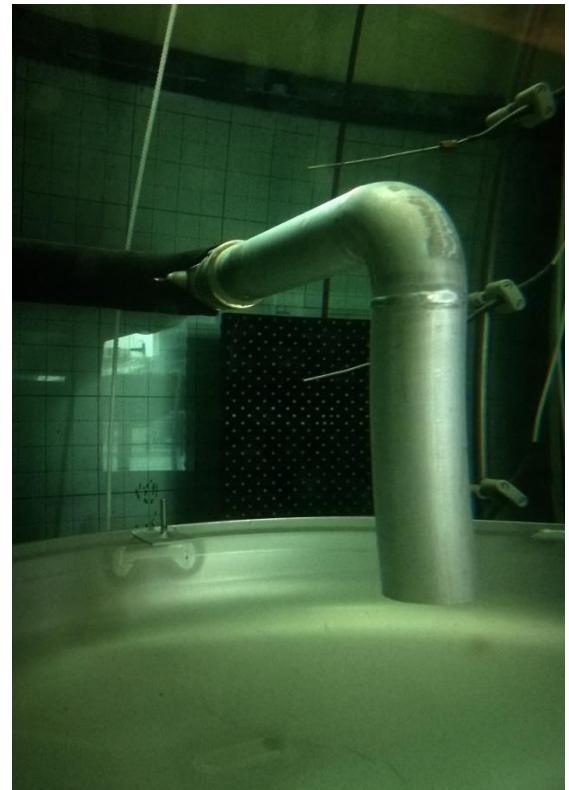


Abbildung 16: Bogenrohr in der Messung ohne Lochblech.



Abbildung 17: Lochblech "klein" mit Aussparungen zur Fixierung an den Halterungen im Klöpperboden und mittigem Ausschnitt für das Bogenrohr.

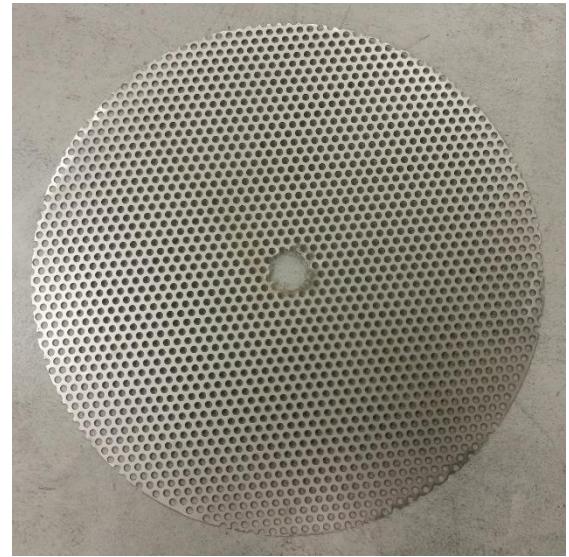


Abbildung 18: Lochblech "gross" mit mittigem Ausschnitt für das Bogenrohr.



### 3.4.1 Konditionierung

Mit dem Konditionierungseinlass wurde der obere Teil des Tanks auf 50 °C und der untere auf 30 °C konditioniert gemäss Abbildung 19. Die Thermokline liegt ca. 30 cm über dem Lochblech, unterhalb des Temperaturfühlers T06.

### 3.4.2 Beladung

Für die Messung wird der Glastank durch das Bogenrohr mit einem Volumenstrom von 2000 l/h beladen. Die Einlauftemperatur wird mit Hilfe des Pufferspeichers auf 30 °C, gleich der unteren Tanktemperatur, konditioniert. Der Auslauf geschieht bei 50 °C durch den oberen Stutzen.

### 3.4.3 PIV-Aufnahme

Gemäss Abbildung 20 wurden PIV-Aufnahmen in einer Ebene nahe der Mitte des Klöpperbodens gemacht. Drei verschiedene Kamerapositionen, links, mitte und rechts, decken den ganzen Bereich des Klöpperbodens ab. Die Position der resultierenden Bilder ist aus der Abbildung 20 zu lesen.

Da für diese Aufnahmen die Kamera parallel zur Laserebene verschoben wurde war keine neue Kalibration vor jeder Aufnahme nötig. Somit konnten die Aufnahmen "links", "mitte" und "rechts" in geringer zeitlicher Abfolge durchgeführt werden. Um den Einfluss des Abstands zwischen Beladung und Thermoklin im Speicher zu ermitteln wurden die Aufnahmen während eines Beladevorgangs mehrfach wiederholt.

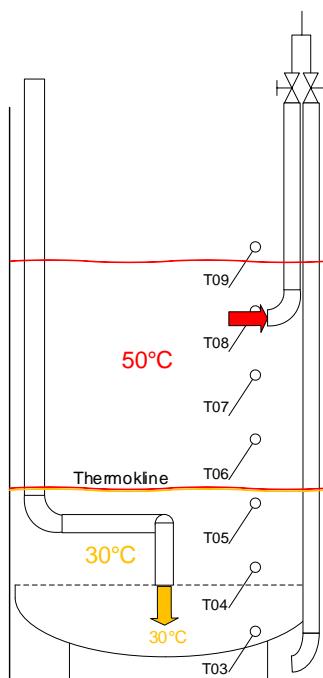


Abbildung 19: Konditionierung für die Messung mit dem Bogenrohr.

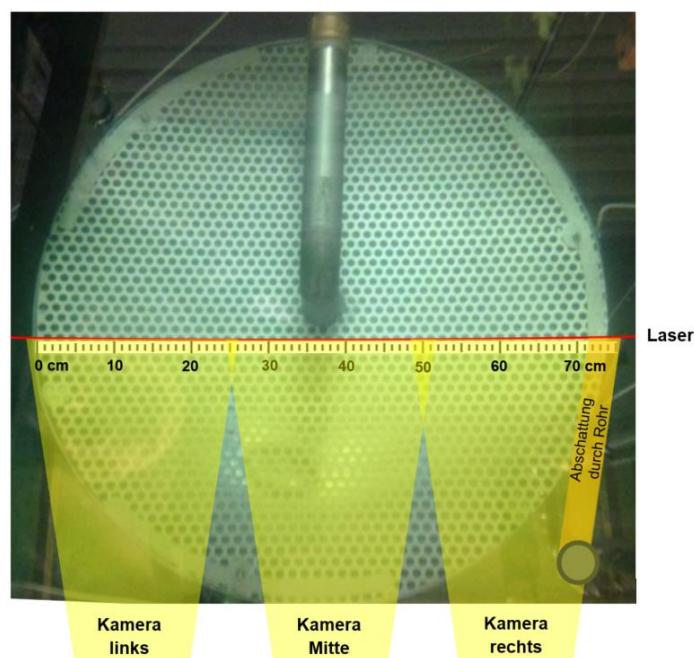


Abbildung 20: Darstellung der Laserebene und der drei Kamerapositionen.



## 3.5 Resultate Bogenrohr ohne Lochblech

### 3.5.1 Temperaturen

In Abbildung 21 ist die Temperaturverteilung im Speicher während der Messung sowie die Ein- und Austrittstemperatur des Beladevolumenstroms inklusive des Durchsatzes zu sehen. Die Zeitpunkte der PIV-Aufnahmen sind als strich-punktierte Linien gezeigt.

Der Speichereintritt ist durch das Bogenrohr nach unten geführt (unter die Kante des Klöpperbodens). Die Entnahme aus dem Speicher findet über dem Sensor T08 statt. Die Eintrittstemperatur ist in etwa dieselbe Temperatur wie an der Position des Speichereintritts und damit tiefer als in den Zonen oberhalb des Bogenrohrs. Damit wird die Beladung eines Kältespeichers nachgestellt.

Über dem Klöpperboden befindet sich kein Lochblech.

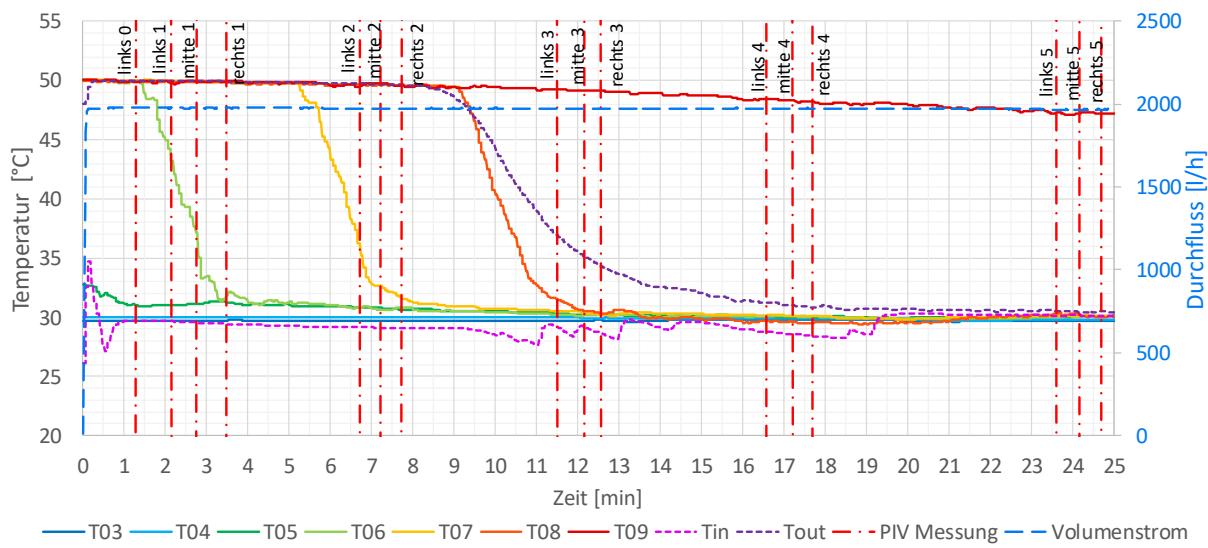


Abbildung 21: Rahmenbedingungen der PIV-Messungen des Bogenrohrs. Gezeigt werden die Temperaturen im Glastank (T03 – T09), die Ein- und Austrittstemperatur der Beladung mit dem zugehörigen Volumenstrom sowie die Zeitpunkte der einzelnen Aufnahmen.



### 3.5.2 PIV-Aufnahmen

Zur Veranschaulichung der PIV-Aufnahmen sind in Abbildung 22 die unbearbeiteten Aufnahmen der Messung zu sehen.

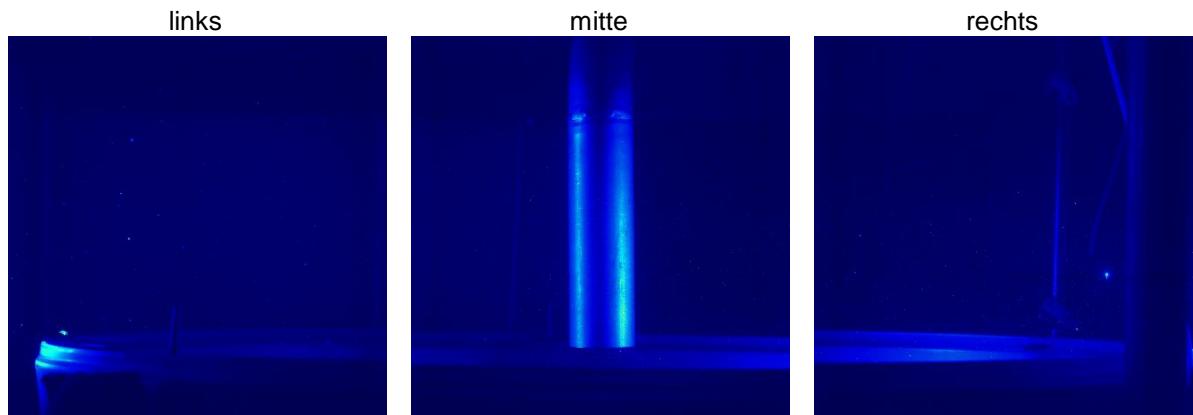


Abbildung 22: Unbearbeitete Aufnahmen der Messung mit Bogenrohr ohne Lochblech. In den Aufnahmen ist der ober Rand des Klöpperbodens und das Bogenrohr mit der Austrittsöffnung nach unten (zum Klöpperboden) zu sehen. In der Aufnahme rechts ist zusätzlich die Fühlerlanze zur Messung der Speichertemperatur zu sehen.

In Abbildung 23 sind die PIV-Aufnahmen mit den berechneten Strömungsvektoren zu sehen. Die Aufnahmen sind angeordnet auf Grund ihrer Position (links, mitte, rechts) und den Zeitpunkt der Aufnahme. Dabei entspricht die oberste Reihe dem Zeitpunkt 1, und die unterste Reihe der zeitlich letzten Aufnahme.

Die in den unbearbeiteten Aufnahmen zu sehenden sichtbaren Komponenten (vgl. Abbildung 22, Klöpperboden und Rohr im Vordergrund an der rechten Seite) wurden in den Aufnahmen in grau verdeckt. Eine weitere graue Fläche wurde über dem reflektierenden Bogenrohr platziert, da dessen Reflektionen zu einer fehlerhaften Darstellung führen.

In den Abbildungen ist zu sehen, dass sich durch die Beladung eine deutliche Walze im Speicher ausbildet: Das eintretende Wasser prallt auf den Klöpperboden. Durch das nachströmende Wasser wird der Eintritt zur Seite verdrängt und entlang der Rundung des Bodens geführt. In der Aufnahme ist erst das nach oben führende Geschwindigkeitsfeld an den Rändern des Klöpperbodens zu sehen. In einem grossen Bogen fliest ein Teil des Wassers mittig wieder zurück nach unten in Richtung Boden.

Obwohl sich die Thermokline mit der Zeit nach oben verschiebt (zu sehen an den Speichertemperaturen) wird die räumliche Ausdehnung der Walze mit der Zeit kleiner.

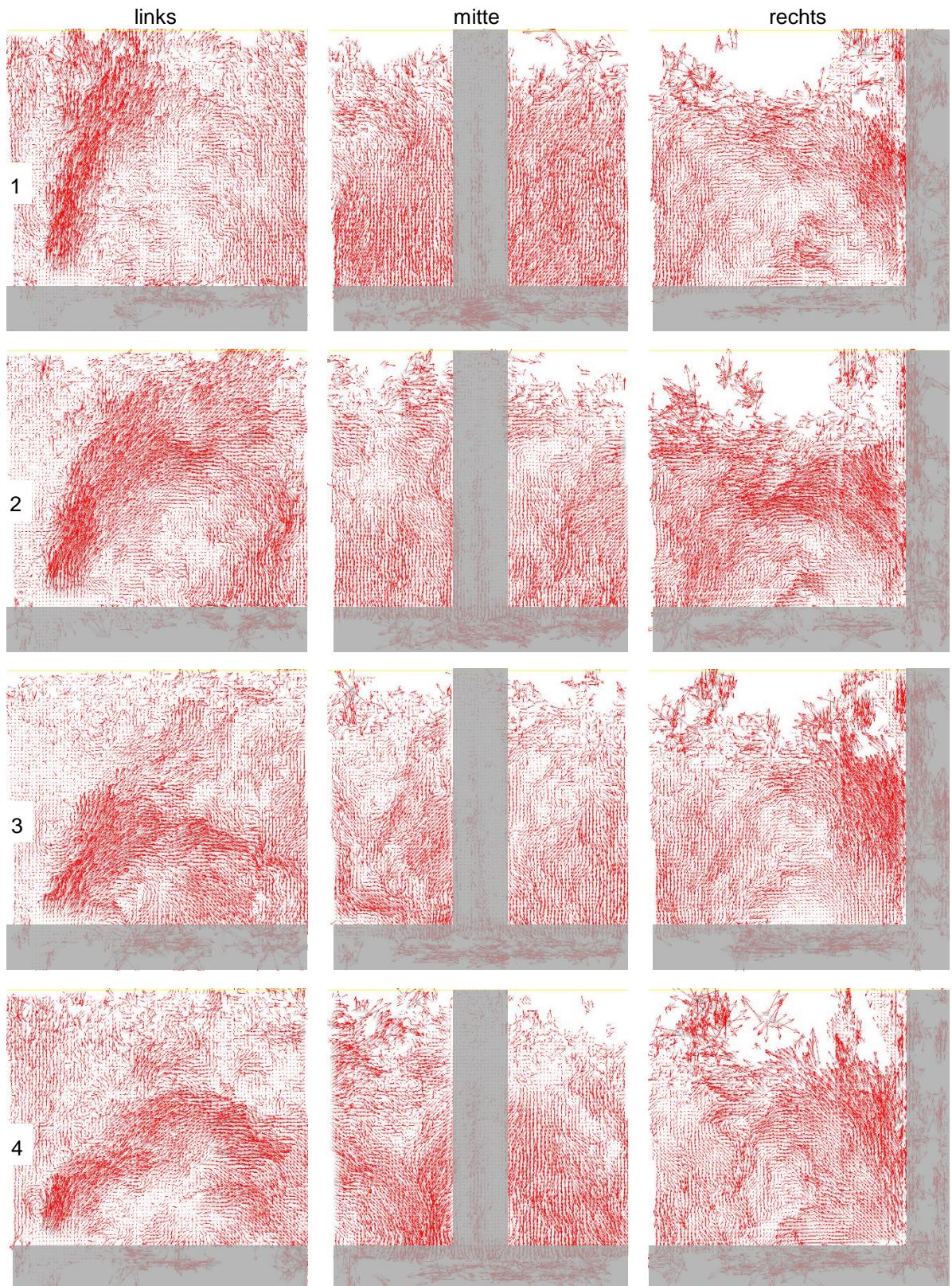


Abbildung 23: PIV-Aufnahmen der Beladung durch ein Bogenrohr ohne Lochblech. Die in den unbearbeiteten Aufnahmen zu sehenden sichtbaren Komponenten sowie das im Hintergrund reflektierende Bogenrohr wurden in den Aufnahmen in grau verdeckt.



## 3.6 Resultate Bogenrohr mit Lochblech 1 (grosse Löcher)

### 3.6.1 Temperaturen

In Abbildung 24 ist die Temperaturverteilung im Speicher während der Messung sowie die Ein- und Austrittstemperatur des Beladevolumenstroms inklusive des Durchsatzes zu sehen. Die Zeitpunkte der PIV-Aufnahmen sind als Strich-Punktierte Linien gezeigt.

Der Speichereintritt ist durch das Bogenrohr nach unten geführt (unter die Kante des Klöpperbodens). Die Entnahme aus dem Speicher findet über dem Sensor T08 statt. Über dem Klöpperboden befindet sich das Lochblech "grosse Löcher".

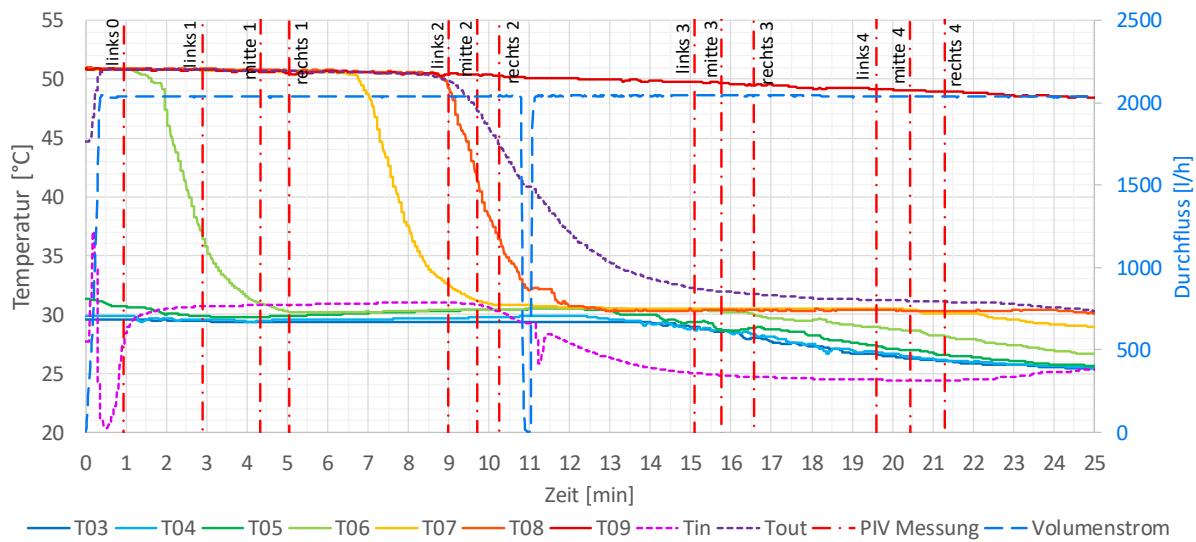


Abbildung 24: Rahmenbedingungen der PIV-Messungen des Bogenrohres in Kombination mit einem Lochblech (Lochblech 1). Gezeigt werden die Temperaturen im Glastank (T03 – T09), die Ein- und Austrittstemperatur der Beladung mit dem zugehörigen Volumenstrom sowie die Zeitpunkte der einzelnen Aufnahmen.

### 3.6.2 PIV-Aufnahmen

Die PIV-Aufnahmen der Messung mit dem Lochblech "grosse Löcher" sind in Abbildung 25 dargestellt. Wie bereits in der Messung ohne Lochblech ist der grösste Teil der nach oben gerichteten Strömung über dem Rand des Klöpperbodens zu finden. Im Gegensatz zur Messung ohne Lochblech gibt es aber keine Strömung die mittig nach unten führt, stattdessen sind auf der gesamten Breite des Speichers nach oben führende Geschwindigkeitsvektoren zu sehen.

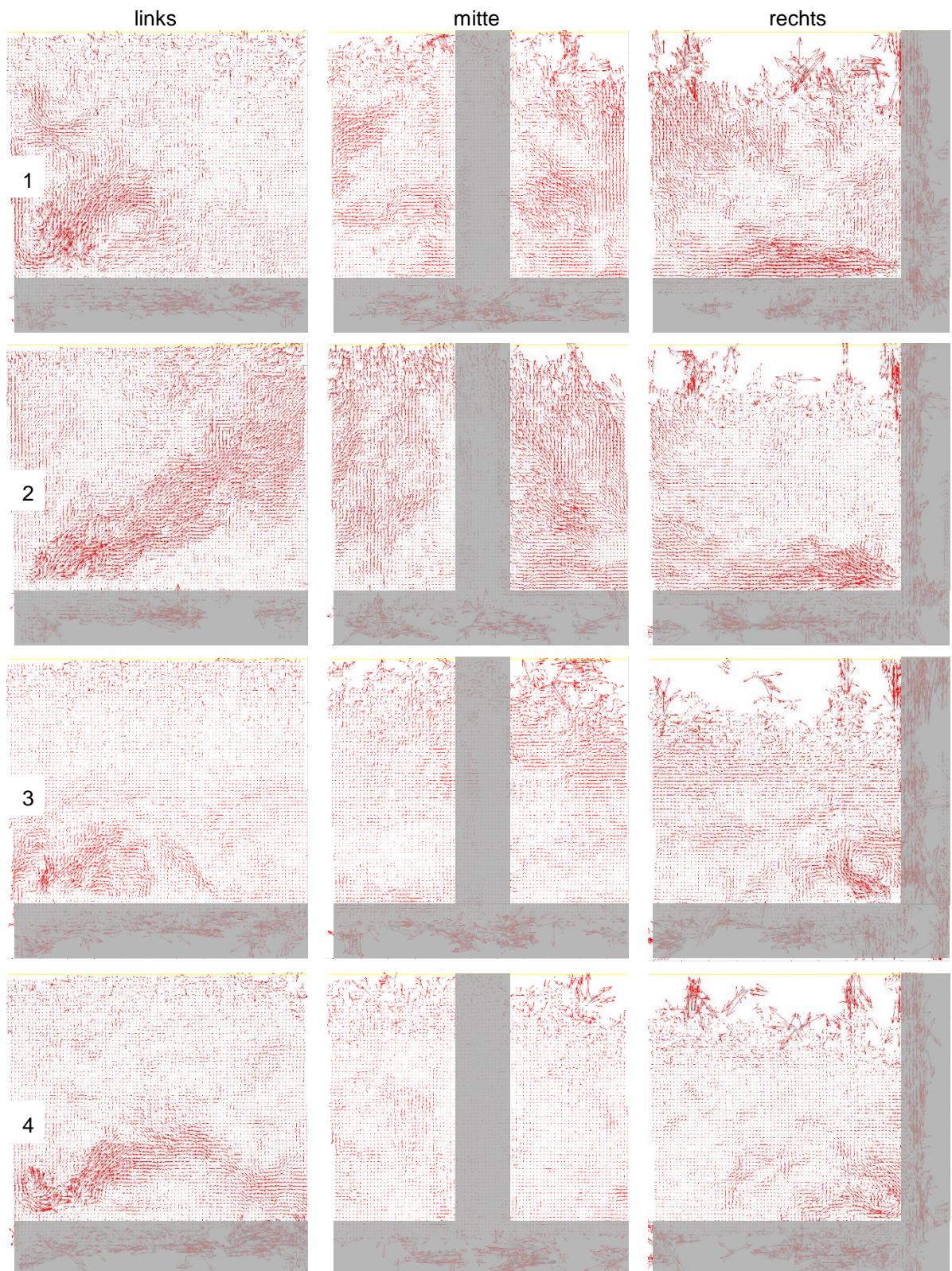


Abbildung 25: PIV Aufnahmen der Beladung durch ein Bogenrohr in Kombination mit dem Lochblech "grosse Löcher". Die in den unbearbeiteten Aufnahmen zu sehenden sichtbaren Komponenten sowie das im Hintergrund reflektierende Bogenrohr wurden in den Aufnahmen in grau verdeckt.



## 3.7 Resultate Bogenrohr mit Lochblech 2 (kleine Löcher)

### 3.7.1 Temperaturen

In Abbildung 26 ist die Temperaturverteilung im Speicher während der Messung sowie die Ein- und Austrittstemperatur des Beladevolumenstroms inklusive des Durchsatzes zu sehen. Die Zeitpunkte der PIV-Aufnahmen sind als Strich-Punktierte Linien gezeigt.

Der Speichereintritt ist durch das Bogenrohr nach unten geführt (unter die Kante des Klöpperbodens). Die Entnahme aus dem Speicher findet über dem Sensor T08 statt. Über dem Klöpperboden befindet sich das Lochblech "klein".

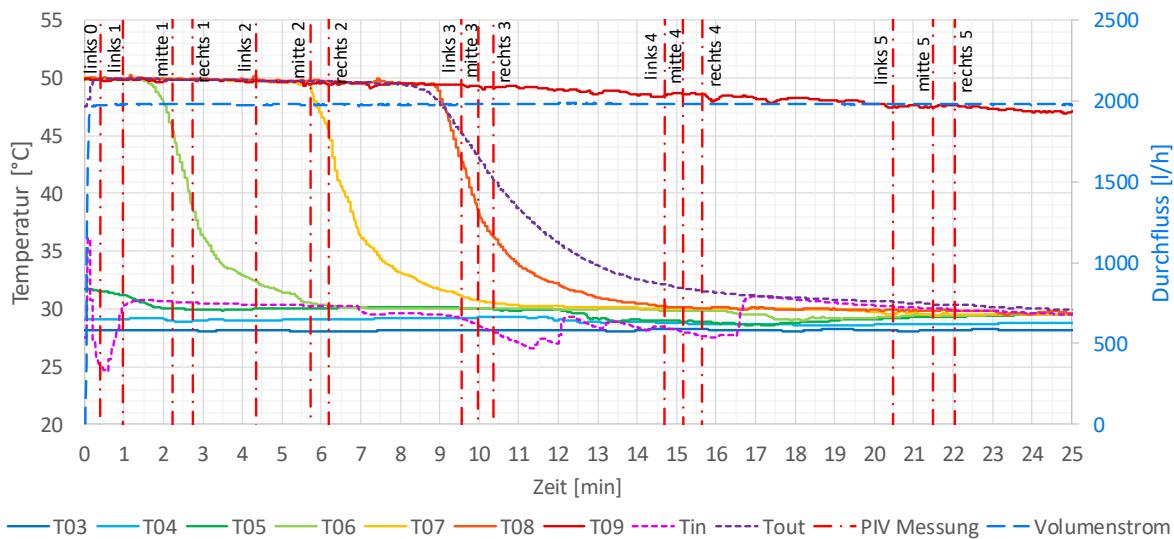


Abbildung 26: Rahmenbedingungen der PIV-Messungen des Bogenrohres in Kombination mit einem Lochblech (Lochblech 2). Gezeigt werden die Temperaturen im Glastank (T03 – T09), die Ein- und Austrittstemperatur der Beladung mit dem zugehörigen Volumenstrom sowie die Zeitpunkte der einzelnen Aufnahmen.

### 3.7.2 PIV-Aufnahmen

In Abbildung 27 sind die PIV Aufnahmen der Messung mit Bogenrohr und Lochblech "kleine Löcher" zu sehen. Durch den im Vergleich zu den vorherigen Messungen (ohne Lochblech -> Lochblech "große Löcher" -> Lochblech "kleine Löcher") erhöhten Widerstand für das Fluid auf dem Weg nach oben wird die unterhalb des Lochblechs auftretende Strömung an den Rändern des Klöpperbodens weiter gebremst und stattdessen homogen über die gesamte Breite des Speichers geführt.

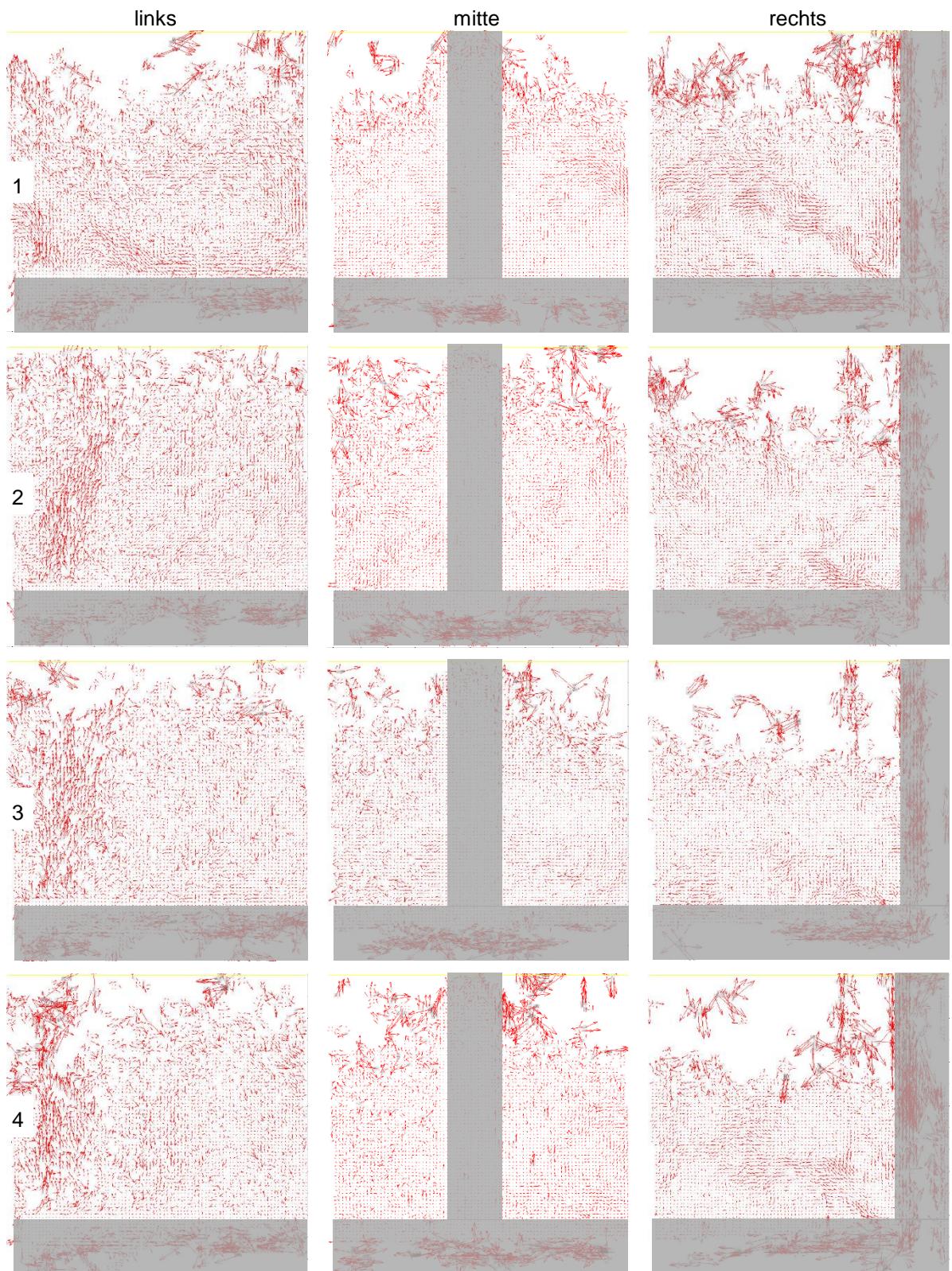


Abbildung 27: PIV Aufnahmen der Beladung durch ein Bogenrohr in Kombination mit dem Lochblech "klein". Die in den unverarbeiteten Aufnahmen zu sehenden sichtbaren Komponenten sowie das im Hintergrund reflektierende Bogenrohr wurden in den Aufnahmen in grau verdeckt.



### 3.8 Diskussion Bogenrohr

Ein Lochblech zur Abgrenzung zwischen Klöpperboden und dem Speichervolumen dient als "Bremse" der Strömung indem der Druckverlust erhöht wird. Die PIV-Aufnahmen der verschiedenen Messungen zeigen eine Homogenisierung der Strömung mit steigendem Druckverlust.

In den Abbildung 28 bis Abbildung 30 ist die Temperaturverteilung der verschiedenen Messungen mit Bogenrohr zu sehen. Der Verlauf der Temperaturen ist während der ersten 20 min der Experimente praktisch identisch. Die Messung mit dem Lochblech "grosse Löcher" zeigt nach 25 min einen etwas anderen Verlauf, da in diesem Fall die Eintrittstemperatur nach dieser Zeit tiefer war als in den anderen Messungen.

Die Thermokline oberhalb der Beladezone wird in allen Aufnahmen kontinuierlich nach oben verschoben. Besonders erwähnenswert ist, dass zwischen den Aufnahmen ohne Lochblech und mit Lochblech "kleine Löcher" fast kein Unterschied zu erkennen ist. Allerdings wird die walzenförmige Strömung in der Messung ohne Lochblech durch die Kolbenströmung im Speicher überlagert, die durch die Entnahme oben und den Eintritt unten entsteht. Dies würde sich decken mit den Aussagen von Gwerder u. a. 2016, die über CFD-Simulationen eine Kontinuierliche Verschiebung des Thermoklins im Speicher, unter Beibehaltung der scharfen Ausprägung des Thermoklins zeigen. Um diese Aussagen mit den vorliegenden Messdaten zu kontrollieren wäre eine Nachstellung der Experimente mittels Simulationen nötig. In Frage kämen dazu Simulationen in TRNSYS mit einem Plug-Flow Speichermodell oder die Abbildung mit Computational Fluid Dynamics (CFD).

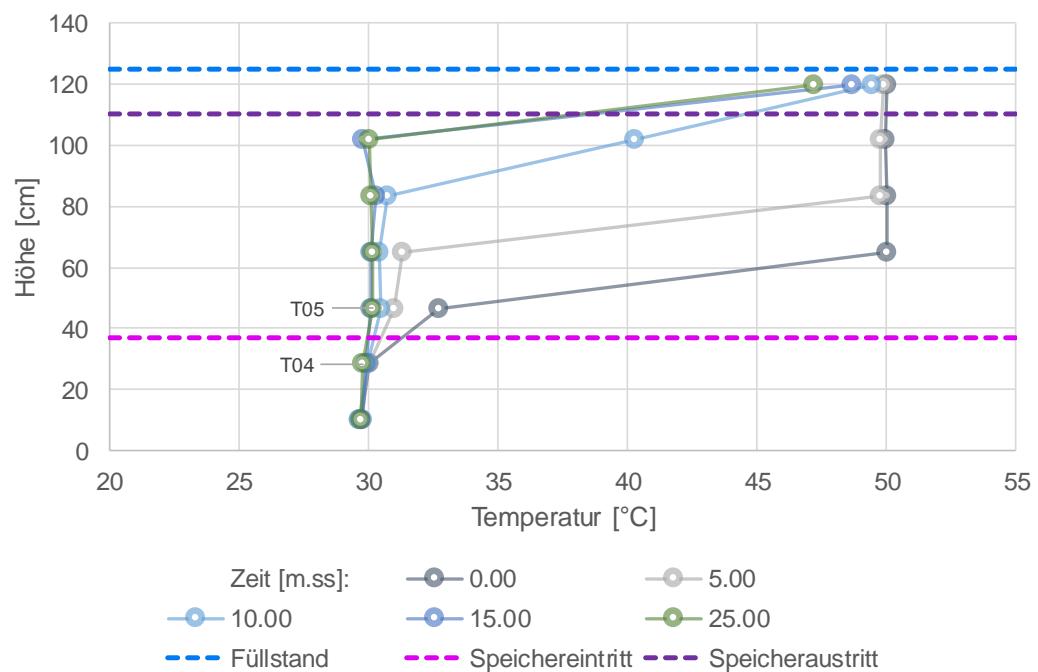


Abbildung 28: Temperaturverteilung im Speicher, geordnet nach der Zeit. In der Aufnahme mit Bogenrohr ohne Lochblech.

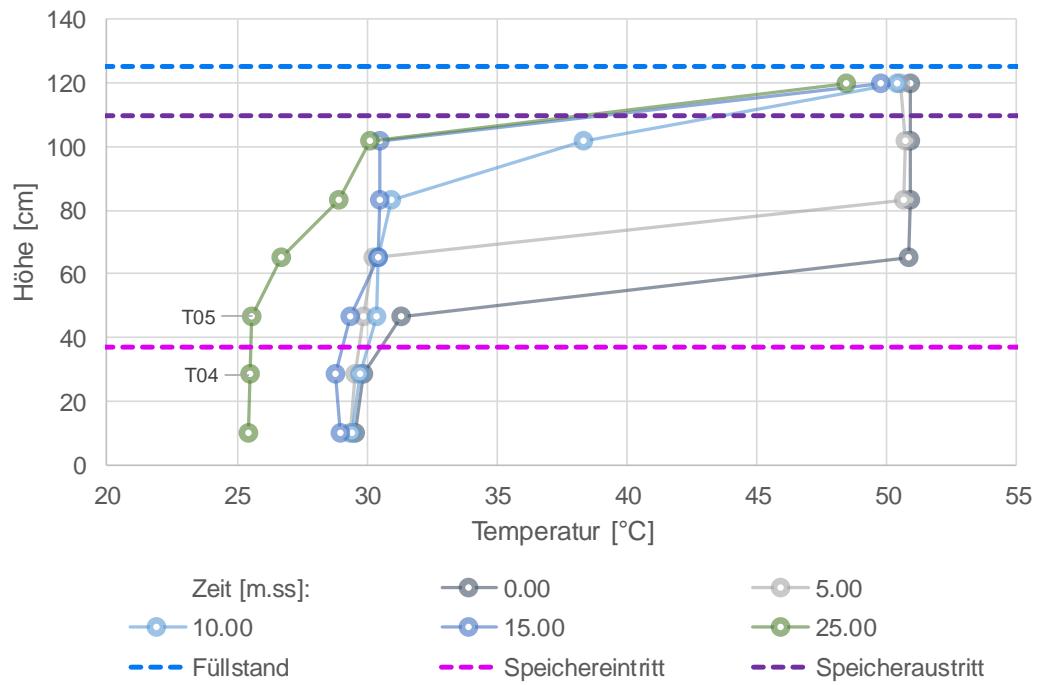


Abbildung 29: Temperaturverteilung im Speicher, geordnet nach der Zeit, in der Aufnahme mit Bogenrohr und Lochblech "große Löcher".

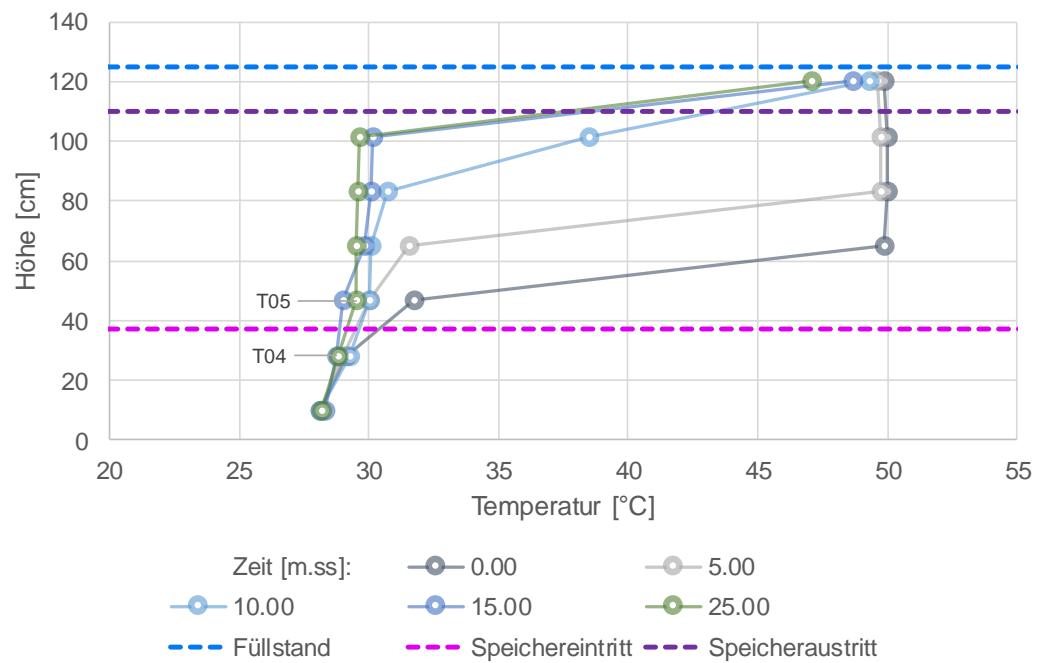


Abbildung 30: Temperaturverteilung im Speicher, geordnet nach der Zeit, in der Aufnahme mit Bogenrohr und Lochblech "kleine Löcher".



## 4 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Methode der Particle Image Velocimetry hat sich als geeignete Methode zur Visualisierung von Strömungen in Wasserspeichern erwiesen. Mit einem eckigen Glasspeicher können die Bedingungen des Realfalls mit wenig Abstrichen nachgestellt, und die auftretenden Phänomene bei der Beladung eines Speichers untersucht werden. Die Konditionierung der Experimente hat sich als sehr aufwändig herausgestellt.

Die gewonnenen Messdaten wären geeignet um weiterführende Auswertungen durchzuführen, zum Beispiel zur Validierung von CFD-Simulationen mit deren Hilfe weitere Rahmenbedingungen untersucht werden könnten. In diesem Falle sind PIV-Aufnahmen äusserst wertvoll.

Sprührohre werden in der Praxis oft dazu eingesetzt, in einen Mehrzonenspeicher mit vorhandener Temperaturschichtung einen kontrollierten Beladevorgang durchzuführen, bei welchem die räumlich entfernten Zonen nicht beeinflusst werden. Die gezeigten PIV-Aufnahmen mit einem einfachen Sprührohr zeigen, dass diese Erwartung nicht erfüllt werden kann. Bedingt durch die ungleichmässige Durchströmung ergeben sich lokal hohe Strömungsgeschwindigkeiten und eine Ausprägung von nicht gewollten Strömungen, welche die vorhandene Schichtung zerstören.

Für Bogenrohre besteht die Erwartungshaltung der Aufrechterhaltung der Temperaturbereiche im Speicher oben und unten nicht. Bei einem Speichereintritt zuoberst oder zuunterst in den Speicher muss die Eintrittstemperatur mindestens identisch zur Speichertemperatur sein, bzw. höher (bei Eintritt in den Speicher oben) oder tiefer (bei Eintritt unten). Die Temperaturverteilung während der Beladung eines Kältespeichers mittels Bogenrohr zum unteren Klöpperboden zeigt einen sich stetig nach oben verschiebenden Thermoklin. In den PIV-Aufnahmen ist allerdings eine deutlich ausgeprägte, walzenförmige Strömung zu erkennen. Durch den Einsatz eines Lochblechs mit 10 mm Lochdurchmesser kann diese Walze verhindert werden. Bei weiter verringertem Lochdurchmesser (3 mm) wird schliesslich eine über den kompletten Querschnitt des Speichers homogene Strömung erreicht. Inwiefern sich dies positiv auf die Schichterhaltung, respektive die exergetische Effizienz des Speichers auswirkt, konnte nicht ermittelt werden.

## 5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

### 5.1 Messungen

Die Messungen an bzw. mit einem einfachen Sprührohr wurden jeweils in einer Ebene senkrecht zum Sprührohr durchgeführt. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass das Strömungsfeld sich nicht nur in einer senkrechten Ebene (x-y) auffächert, sondern auch in einer horizontalen Ebene (x-z). Entsprechend wären zusätzliche Aufnahmen in einem 45° Winkel zur gewählten Ebene wichtig für eine genauere Interpretation und Aussage.

Im Schlussbericht des Projektes "BigStrat – Schichtung grosser Wärmespeicher" (Battaglia u. a. 2018) wurde eine Formel zur Bestimmung der Lochgrösse einfacher Sprührohre präsentiert, die zu einer homogenen Durchströmung der einzelnen Löcher führt. Allerdings kann auch dadurch keine Strömungsgeschwindigkeit  $< 0.1 \text{ m/s}$  erreicht werden. Mittels PIV-Aufnahmen könnte nun untersucht werden, inwiefern das Kriterium der Strömungsgeschwindigkeit für einfache Sprührohre überhaupt relevant ist.



Die Aufnahmen mit Bogenrohren liefern gute Informationen zur Interpretation des Verhaltens im Speicher. Zusätzliche Aufnahmeebenen oberhalb der Beladezone im Bereich der Thermokline wäre wünschenswert um ein besseres Bild der Verschiebung der Thermokline zu erhalten.

Die in diesem Bericht gezeigten Aufnahmen mit einem Bogenrohr wurden in einer Ebene gemacht, die eine symmetrische Verteilung der Strömung zeigt. Eine mögliche Asymmetrie die entsteht auf Grund des Rohrbogens, der ja nicht kreissymmetrisch in Bezug auf den Klöpperboden sein kann, wurde nicht erfasst<sup>7</sup>. Messungen im rechten Winkel zu den in diesem Bericht gezeigten könnten dies zeigen.

## 5.2 Simulationen

Für die Interpretation der PIV-Aufnahmen stehen zum einen die berechneten Grafiken mit Geschwindigkeitsvektoren und zum andern die Speichertemperaturen zur Verfügung. Dennoch sollten die gewonnenen Daten dazu verwendet werden, um Simulationsmodelle der Experimente zu validieren um dann die überlagerten Effekte aus Kolbenströmung und Strömungswalzen zu analysieren.

# 6 Literaturverzeichnis

Battaglia, M., Züllig, L. & Haller, M., 2018. *BigStrat - Schichtung grosser Wärmespeicher*. Report SI/500315-03,

Frank, E., Vogelsanger, P. & Marty, H., 2008. *Preiswerte und kontinuierliche Schichtladeeinrichtung für Solar- und Pufferspeicher*. In: 18. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany.

Gwerder, C., Lütscher, L., u. a., 2016. *Horizontal Inlets of Water Storage Tanks With Low Disturbance of Stratification*. Journal of Solar Energy Engineering, 138(5), S.051011–051019.

Haller, M.Y., Haberl, R., Persdorf, P. & Reber, A., 2015. *StorEx - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern*. Bundesamt für Energie BFE.

Krehl, P. & Engemann, S., 1995. *August Toepler — The first who visualized shock waves*. , 1–2(5), S.1–18.

Logie, W. & Frank, E., 2011. *Experimental and Numerical Investigations on Thermal Energy Storages - Indirect Charging via Immersed Coil Heat Exchangers*. Rapperswil.

Settles, G.S. & Hargather, M.J., 2017. *A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques*. Measurement Science and Technology, 28.

---

<sup>7</sup> Im Inneren des Rohrbogens ergibt sich eine höhere Strömungsgeschwindigkeit entlang des äusseren Radius. Diese ungleiche Geschwindigkeitsverteilung wird wahrscheinlich bis zum Austritt aus dem Bogenrohr nicht homogenisiert.