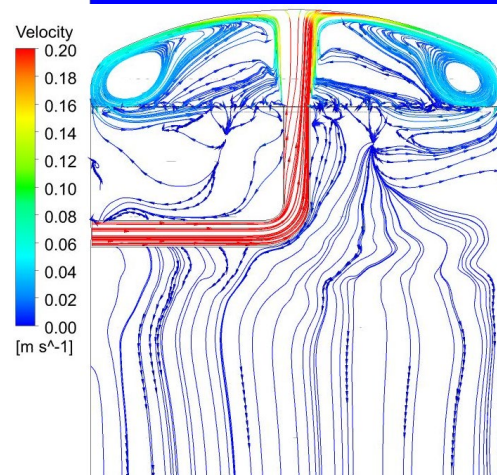
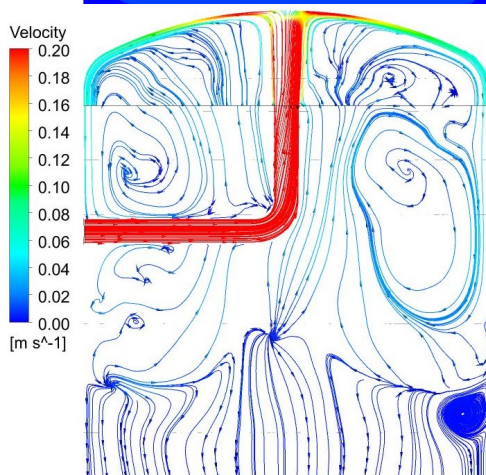
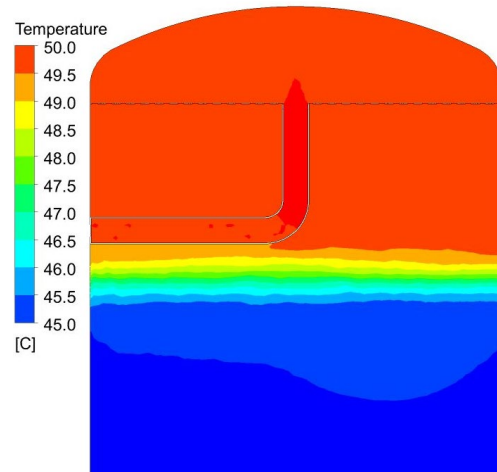
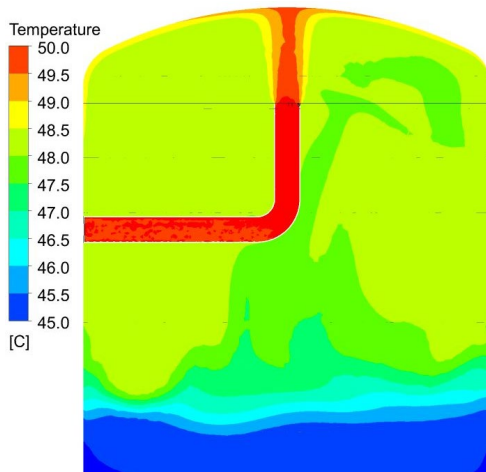




Schlussbericht vom 19.02.2021

Applied Research Projekt

DiffStrat 2 – Schichtung Thermischer Speicher durch Diffusor Design: CFD und Validierung



Quelle: © SPF 2020



Datum: 19.02.2021

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

SPF Institut für Solartechnik
OST Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autor/in:

Dominik Amstad, SPF, dominik.amstad@spf.ch
Robert Haberl, SPF, robert.haberl@spf.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@spf.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/500315-03

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



Zusammenfassung

Thermische Speicher werden zunehmend zum Ausgleich von Produktion und Bedarf von Wärme oder Kälte eingesetzt. In Kombination mit erneuerbaren Energiesystemen wie Wärmepumpen oder Solarwärme ist die Temperaturschichtung der Wasser-Wärmespeicher ein entscheidender Faktor für die Effizienz der Systeme. In Kombination mit Holzheizwerken führt eine gute thermische Schichtung zu konstanteren Vorlauftemperaturen und einer höheren Ausnützung der Speicherkapazität. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen sowohl durch Messungen im Prüfstand als auch durch CFD-Simulationen, dass die Einströmung über Bogenrohre in die Deckel oder Böden der Speicher in Kombination mit einem Lochblech, welches den Einströmbereich vom restlichen Speicher trennt, zu deutlich besserer Temperaturschichtung führt als Varianten ohne Lochblech. Für einfache Sprührohre, welche horizontal in den Speicher eingesetzt werden und das Fluid über seitliche Löcher ausströmen lassen, konnte keine Variante gefunden werden welche zu einem befriedigenden Ergebnis führt.

Résumé

Pour l'ajustement de la demande et de la production de chaleur et de froid, les stockages thermiques sont de plus en plus utilisés. La stratification des températures dans l'accumulateur de chaleur à base de l'eau est un facteur essentiel pour l'efficacité du système lorsque combiné avec des sources d'énergies renouvelables telles que les pompes à chaleur ou le solaire thermique. En combinaison avec des centrales de chauffage au bois, une bonne stratification thermique conduit à des températures de départ plus stables et à une meilleure utilisation de la capacité de stockage. La présente étude est basée sur des mesures sur banc d'essais ainsi que sur des simulations CFD. Pour des entrées de fluide à travers un tuyau coudé placé dans le couvercle ou le fond des cuves de stockage, une bien meilleure stratification thermique a été constatée lorsqu'une tôle perforée sépare l'entrée du reste de la cuve. Dans la configuration où de simples lances insérées horizontalement dans la cuve de stockage et permettant au fluide de diffuser à travers des orifices latéraux, aucune variante permettant d'atteindre des résultats satisfaisants n'a été trouvée.

Summary

Thermal storages are increasingly being used to balance the production and demand for heat or cold. In combination with renewable energy systems such as heat pumps or solar heat, the temperature stratification of the thermal water storage is a decisive factor for the efficiency of the systems. In combination with biomass heating plants, better stratification achieves more constant supply temperatures to the network and a better use of the storage capacity. The present investigations show, both by measurements in the test bench and by CFD simulations, that the inflow via elbow pipes towards the top or bottom of the storage in combination with a perforated plate, which separates the inflow area from the rest of the storage tank, leads to significantly better temperature stratification than variants without perforated plates. For simple diffusor pipes that are inserted horizontally into the storage tank and allow the fluid to flow out through lateral holes, no variant could be found that leads to a satisfactory result.



Take-home messages

- Die Einströmung in den Speicher über Bogenrohre in Richtung Klöpperboden oder -deckel führt zu einer ausgeprägt schichtenden Be- oder Entladung, wenn der Einströmbereich vom restlichen Speicherbereich durch ein Lochblech getrennt ist.
- Die gleiche Anordnung ohne Lochbleche führt zu einer Durchmischung im Speicher, welche mit zunehmendem Massenstrom grösser wird.
- Über einfache horizontale Sprührohre ohne Lochbleche kann in der Regel keine schichtende Be- oder Entladung durchgeführt werden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	7
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	8
2 Vorgehen und Methode	9
2.1 Methode.....	9
2.2 CFD Simulationseinstellungen	9
3 Validierung der CFD Simulation / Netzstudien	10
3.1 Bogenrohr ohne Lochblech	10
3.2 Bogenrohr mit Lochblech.....	13
3.3 Sprührohr.....	16
4 Simulation anderer Konfigurationen	23
4.1 Methoden.....	23
4.1.1 Simulierte Varianten	23
4.1.2 Auswertung der Temperaturprofile.....	26
4.1.3 Berechnung von Kennzahlen zum Vergleich / Abschätzung energetische Auswirkung.....	27
4.2 Vergleich Einlauf oben / unten.....	29
4.3 Resultate Bogenrohr.....	31
4.4 Resultate Sprührohr	44
4.5 Kennzahlen zum Vergleich der Varianten	49
5 Schlussfolgerungen und Fazit	51
6 Nationale und internationale Zusammenarbeit	52
7 Literaturverzeichnis	52
Anhang A: Bogenrohr ohne Lochblech: PIV-Aufnahmen und simulierte Strömung	54
Anhang B: Bogenrohr mit Lochblech: PIV-Aufnahmen und simulierte Strömung	57
Anhang C: Abschätzung der Auswirkungen auf Energieeffizienz	59



Abkürzungsverzeichnis

aR	applied Research
LB	Lochblech
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer Aided Design
D_R	Rohrdurchmesser
D_L	Lochdurchmesser
m	mit
N	Anzahl
o	ohne
PIV	Particle Image Velocimetry
SR	Sprührohr



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Eine gute Temperaturschichtung im Wasserspeicher ist essentiell für einen effizienten Betrieb von Wärme- oder Kälteversorgungssystemen. Gute Schichtung erhöht den Ausnutzungsgrad des Speichervolumens und verlängert damit die Laufzeiten der Wärme-, respektive Kälteerzeuger. Längere Laufzeiten führen zu weniger Ein- und Ausschaltzyklen, und erhöhen damit die Lebensdauer der Anlagen, insbesondere der Erzeuger. Eine gute Speicherschichtung führt jedoch auch zu weniger Temperaturhub auf Seiten der Erzeuger, was insbesondere für Solarthermische Anlagen, Wärmepumpen und Kältemaschinen die Effizienz wesentlich steigert und damit auch den Endenergieverbrauch entsprechend senkt. Effizienzvorteile in etwas geringerem Masse resultieren auch für kondensierende Verbrennungskessel und andere Systeme.

Die thermische Schichtung bei seitlicher Beladung von solaren Kombi-Wärmespeichern durch Wärmepumpen wurde bereits in früheren Studien eingehend untersucht [1,2], und Design-Richtlinien für diese Art der Beladung sind verfügbar¹. Für sehr grosse Wärme- und vor allem für Kältespeicher mit Wärme-Topladung, respektive Kälteladung von unten mit hohen Volumenströmen, findet sich einiges an Literatur und Erkenntnissen zu sogenannten Oktogonal-Rohrsystemen [3–8] oder kreuzweise verbundenen Rohrsystemen [9–11], welche jeweils mit Öffnungen oder Düsen gegen den Speicherdeckel (warme Top-Einströmung), respektive den Speicherboden (kalte Bodeneinströmung) versehen sind. Für Speicher von mehreren hundert oder gar über tausend Kubikmeter Inhalt und gleichzeitig sehr hohen Volumenströmen scheinen diese Systeme sehr gut geeignet zu sein.

Für Speicher etwas kleinerer Dimension (einige Kubikmeter bis wenige 100 m³), welche häufig in Wärme- oder Kältenetzen oder in industriellen Wärme- und Kälteversorgungssystemen eingesetzt werden, kommen jedoch auch einfachere Einströmberuhigungen in Frage. Dokumentiert sind zum Beispiel horizontale Prallplatten [11–18] oder auch Sprührohre [9,19–21], teilweise in Kombination mit einer horizontalen Abgrenzung des Einströmbereichs durch Lochbleche [9,20,22], oder auch nur Lochbleche in Kombination mit einer einfachen seitlichen Einströmung. Horizontale Prallplatten scheinen dabei eher für kleinere Speicher im Bereich von wenigen Kubikmetern in Frage zu kommen, während einfache Sprührohre mit Öffnungen gegen den Speicherdeckel oder Speicherboden in Kombination mit Lochblechen etwas mehr Spielraum in Bezug auf die Speichergrösse zulassen. Für Bogenrohre welche gegen den Speicherboden oder Speicherdeckel gerichtet sind konnte nur eine Studie gefunden werden [22], in welcher diese Anordnung kombiniert wurde mit einem Lochblech.

Im Projekt BigStrat [23] wurde festgestellt, dass auf dem Schweizer Markt auch Speicher mit Volumen von mehreren bis knapp 100 m³ eingesetzt werden, welche über einfache Sprührohre oder einfache Bogenrohre ohne Lochblech beladen werden. Zu diesen Varianten der Speicherbeladung konnten jedoch in der Literatur keine Angaben über das Schichtungsvermögen gefunden werden.

¹ https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/Research/Projekte/SOL-HEAP_Flyer_Kombispeicher-Empfehlung_2019_de.pdf



Aus diesem Grund wurden im Projekt DiffStrat [24] im Labor Messungen zur Visualisierung von Strömungen durchgeführt, welche bei Diffusoren entstehen die nach dem Prinzip des horizontalen Diffusorrohres (Sprührohr) und nach dem Prinzip "Bogenrohr" arbeiten. Nach einer Abwägung verschiedener Optionen von bildgebenden Verfahren wurde entschieden, auf die zwar aufwändige, aber vielseitige Methode der Particle Image Velocimetry (PIV) zurückzugreifen.

Horizontale Diffusorrohre bestehen in diesem Falle aus einem Rohr mit seitlichen Öffnungen, durch welche das Fluid ausströmt. Die PIV-Analysen haben gezeigt, dass bei Lochgrössen, welche genügend gross sind um eine Durchschnittsgeschwindigkeit (über alle Löcher gemittelt) < 0.1 m/s am Austritt der Öffnungen zu gewährleisten, keine gleichmässige Ausströmung erreicht wird. In dieser Konfiguration tritt ein grosser Teil des Fluides an den letzten Öffnungen (in Fliessrichtung) aus. In der Folge treten lokal höhere Fliessgeschwindigkeiten auf und es kommt zu einer erhöhten Durchmischung der Temperaturschichten. Dieser Befund passt zusammen mit Strömungssimulationen (CFD – Computational Fluid Dynamics) welche im Projekt BigStrat [23] gemacht wurden.

Bogenrohre, welche den Austritt des Fluides vertikal zum Klöpperboden oder Klöpperdeckel umlenken, wurden mit und ohne Lochblech mit PIV untersucht. Dabei konnte ein deutlich positiver Effekt von Lochblechen auf die Beruhigung und Homogenisierung der Kolbenströmung nach dem Lochblech bestätigt werden.

1.2 Motivation des Projektes

Das Projekt DiffStrat 1 [24] konnte zwar einige Vermutungen bestätigen und sehr interessante Ergebnisse liefern (siehe Schlussbericht vom 20.01.2020), diese blieben jedoch noch lückenhaft und reichten noch nicht aus, um allgemeingültige Empfehlungen abzugeben. So war es zum Beispiel nicht möglich, Aussagen über Diffusorrohre mit kleinen Lochgrössen (und damit gleichmässiger Ausströmung über alle Löcher) zu tätigen. Sowohl für die Sprührohre als auch für die Bogenrohre war es zudem nicht möglich, den Einfluss auf die Schichtung über die qualitative Bewertung hinaus zu quantifizieren, und somit den Nutzen einer guten Lösung im Vergleich zu einer ungünstigen Konfiguration darzustellen.

1.3 Projektziele

Ziel des Projektes DiffStrat 2 war es, die im Projekt DiffStrat 1 gemachten Untersuchungen durch CFD-Simulationen zu ergänzen, und mit den CFD-Simulationen, mit weniger Aufwand als für Labor-Messungen nötig wäre, weitere Konfigurationen zu untersuchen. Dabei soll die Auswirkung verschiedener Konfigurationen auf die Schichtung auch quantitativ dargestellt werden. Es standen insbesondere folgende Unterziele im Vordergrund:

- Nachstellen der im Labor gemachten Untersuchungen mit CFD und Validierung der CFD-Simulationen
- Verwenden der validierten CFD Modelle für die Simulation weiterer Konfigurationen wie zum Beispiel Sprührohre mit kleinen Löchern und Lochbleche mit verschiedenen Lochgrössen
- Darstellen/Visualisieren weiterer Speicherbereiche und Berechnung von Kennzahlen auf Grund der CFD-Simulationen (mit PIV nicht möglich)



- Gegebenenfalls zusätzliche Messungen im Labor zur Validierung der mit CFD gefundenen Strömungseffekte
- Ableiten allgemeingültiger Resultate für einfache horizontale Sprührohre und Bogenrohre (mit und ohne Lochblechen)
- Abschätzung der exergetischen Effizienz verschiedener Konfigurationen und der potenziellen energetischen Auswirkungen anhand von typischen Systemkonfigurationen

Mit diesen Erkenntnissen soll zum einen eine Unterstützung für Hersteller bei der Entwicklung neuer Speicherlösungen oder bei der Beurteilung der Einsatzgrenzen ihrer schon bestehenden Produkte erfolgen. Zum anderen sollen Empfehlungen für Anwender und Planer abgeleitet und publiziert werden. Mit den Autoren des Handbuches QM Fernwärme wird zusammengearbeitet, um die dort getroffenen Aussagen zu Sprüh- und Bogenrohren den Erkenntnissen aus diesem Projekt anzupassen.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Methode

Die Labormessungen, die im Rahmen des DiffStrat Projekts gemacht wurden, werden mit CFD-Simulationen nachgestellt. Dazu wurden die verschiedenen Versuchsaufbauten der Messungen (Bogenrohr ohne Lochblech, Bogenrohr mit Lochblech und Sprührohr) im CAD modelliert und die Einstellungen der CFD-Simulation so gewählt, dass die Simulationsergebnisse möglichst genau mit den Messungen übereinstimmen. Mittels einer Netzstudie wurde der Einfluss des Detaillierungsgrades der Vernetzung des Simulationsmodells untersucht. Stimmen die Ergebnisse der Simulation genügend mit den Messungen überein, werden die Simulationsmodelle mit den entsprechenden Einstellungen als validiert erachtet. Mit diesen Modellen werden weitere Konfigurationen simuliert.

2.2 CFD Simulationseinstellungen

Die CFD Simulationen wurden mit ANSYS CFX 20.1 durchgeführt. Die CAD Modelle wurden mit NX 12.0 gezeichnet und in ANSYS importiert. Die Vernetzung wurde automatisch mit Tetraedergeometrien durch den CFX Solver generiert. Die Inflation an den Oberflächen hat max. 5 Schichten und weiche Übergänge. Die Elementgröße der Vernetzung wurde variiert zwecks einer Netzstudie. Es wurde nur das Fluid (Wasser) und nicht die Speichereinbauten und Wände vernetzt und simuliert. Alle Oberflächen wurden vereinfachend als adiabatische, glatte Oberflächen mit "No Slip"-Grenzbedingung definiert. Wärmetransporte durch die Tankwände und Einbauten wurden vernachlässigt. Als Turbulenzmodell wurde das Scale-Adaptive Shear-Stress-Transport-Modell (SST-SAS) gewählt mit der Turbulenzeinstellung "high (intensity 10%)" für den Initialzustand und den Einlauf. Diese Einstellungen basieren auf Gwerder u. a. (2016) [2], welche ein CFD Modell mit sehr ähnlichem Aufbau validiert haben. Im Übrigen wurden die Default-Einstellungen von CFX verwendet, wo nicht anders deklariert. Die Einstellungen zur Vernetzung werden in der Netzstudie genauer erläutert. Die Ausgangstemperaturen, die Lage der Thermokline und der Temperatursensoren, sowie die Temperatur und Geschwindigkeit beim Einlauf wurden genau den Messungen entsprechend eingestellt.



3 Validierung der CFD Simulation / Netzstudien

3.1 Bogenrohr ohne Lochblech

Für die Simulation des Bogenrohrs über dem Klöpperboden ohne Lochblech wurde der Klöpperboden und die Ein- und Austrittsverrohrungen detailgetreu im viereckigen Tank in ANSYS modelliert gemäss Versuchsaufbau der Messungen. Das Bogenrohr hat einen Innendurchmesser von 44.5 mm. Folgende Vereinfachungen wurden gemacht um den Simulationsaufwand zu reduzieren: Die Füsse des Klöpperbodens wurden nicht modelliert, da unter dem Klöpperboden kaum Strömung herrscht. Die Befestigungsschienen für die Austrittsrohre und die Temperaturfühlerlanze wurden weggelassen. Fittings wie z.B. ein 90°-Bogen wurden vereinfacht als gebogenes Rohr gezeichnet. Abbildung 1 zeigt das Modell (Fluidvolumen) wie es simuliert wurde. Der untere Bereich wurde mit der Ausgangstemperatur von 30 °C versehen, der obere mit 50 °C, getrennt durch die Thermokline 0.5 m über dem Boden. Die oberste Fläche des Fluidvolumens (Wasseroberfläche) wurde als einzige Fläche nicht adiabatisch, sondern mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von 27 W/(m²K) definiert mit der Grenzbedingung "Free Slip Wall" zur 25-gradigen Umgebungsluft. Um die Eintrittstemperatur und den Massenstrom genau abzubilden, wurden die Messdaten dieser beiden zeitabhängigen Parameter als transiente Profile in ANSYS importiert. Es wurden jeweils 20 Minuten simuliert.

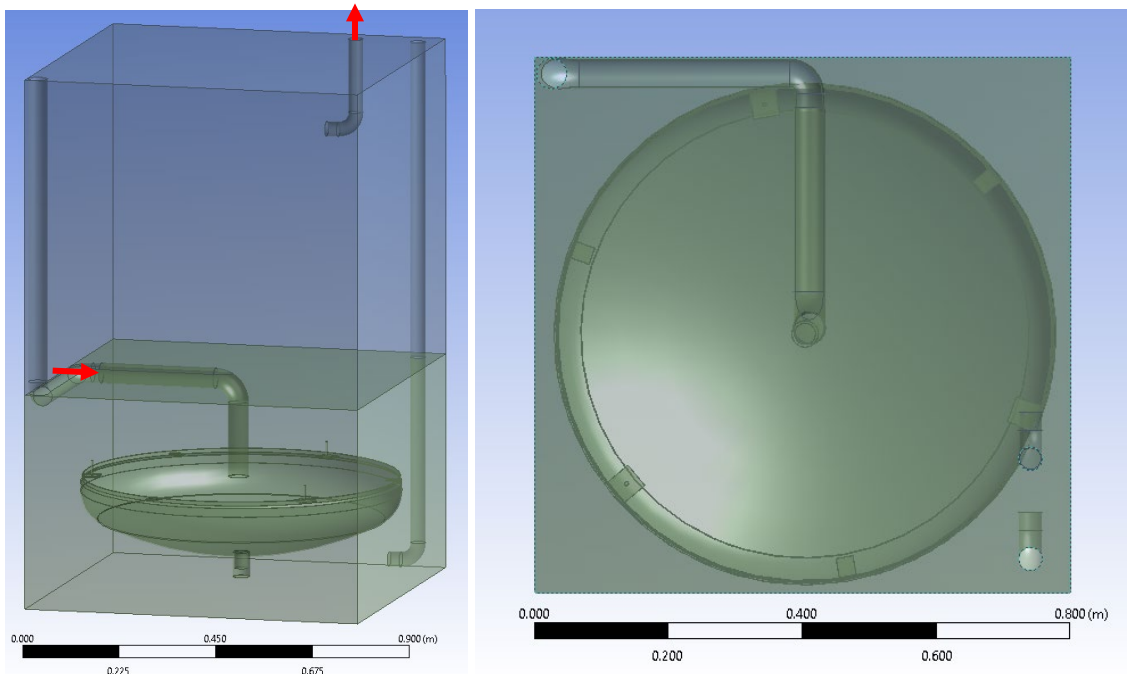


Abbildung 1: Modell für die Simulation des Versuchsaufbaus "Bogenrohr ohne Lochblech".

Bei der Simulation des Bogenrohrs ohne Lochblech wurden drei Varianten (verschiedene Detaillierungsgrade der Vernetzung) simuliert und verglichen, siehe Tabelle 1. Dazu wurde die minimale und maximale Elementgrösse (Kantenlänge des Volumenelements) der Vernetzung variiert.



Tabelle 1: Drei verschiedene Varianten von Netzgrößen der Simulation Bogenrohr ohne Lochblech.

	Maximale Elementgröße [mm]	Minimale Elementgröße [mm]	Gesamte Simulationszeit [h] (Laufzeit * Anz. Prozessoren)
Variante 1	20	2	143
Variante 2	10	2	170
Variante 3	10	1	286

Die Varianten werden jeweils anhand der Temperaturen im oberen Teil des Speichers mit den Messungen verglichen. Dazu wurden in der Simulation virtuelle Temperatursensoren (T03 – T09) verwendet an denselben Orten wie im Laborexperiment. Die Temperatursensoren wurden im Laboraufbau mit Abständen von 20 cm montiert, die Sensorspitzen können aber um einige Zentimeter in ihrer Position variieren, da diese beim Umbau der Experimente leicht verbogen wurden. Deshalb ist die Zeit, welche die Thermokline braucht um sich vom einen zum nächsten Sensor zu bewegen, nicht immer genau gleich, obwohl der Durchfluss relativ konstant ist. Dies ist vor allem beim Sensor T07 beim Experiment Bogenrohr mit Lochblech deutlich zu sehen (Abbildung 7). Diese Variationen in der Position der Sensoren wurden in den Simulationen berücksichtigt und nachgestellt.

In Abbildung 2 bis Abbildung 4 sind die Temperaturen der Simulationen punktiert, gestrichelt bzw. strichpunktiert und die Messungen mit durchgezogenen Linien dargestellt. Interessant für den Vergleich sind nur die Temperatursensoren T06, T07, T08 und die Austrittstemperatur "Tout", weil dort die Verschiebung der Thermokline zu beobachten ist. Die Netzverfeinerung von Variante 1 zur Variante 2 zeigt eine verbesserte Abbildung der Temperaturverläufe. Vor allem bei T07 und T08 bildet die Netzvariante 2 die Messungen besser ab. Die weitere Verfeinerung des Netzes von Variante 2 zur Variante 3 zeigt hingegen keine signifikante Verbesserung der Simulation. Dies liegt daran, dass die Elemente um die Thermokline eher gross sind, da dort keine Speichereinbauten sind und daher keine Details abgebildet werden müssen. Wird die minimale Elementgröße verkleinert, wird also nur in Bereichen mit hohem Detaillierungsgrad, d.h. bei Speichereinbauten, das Netz verfeinert.

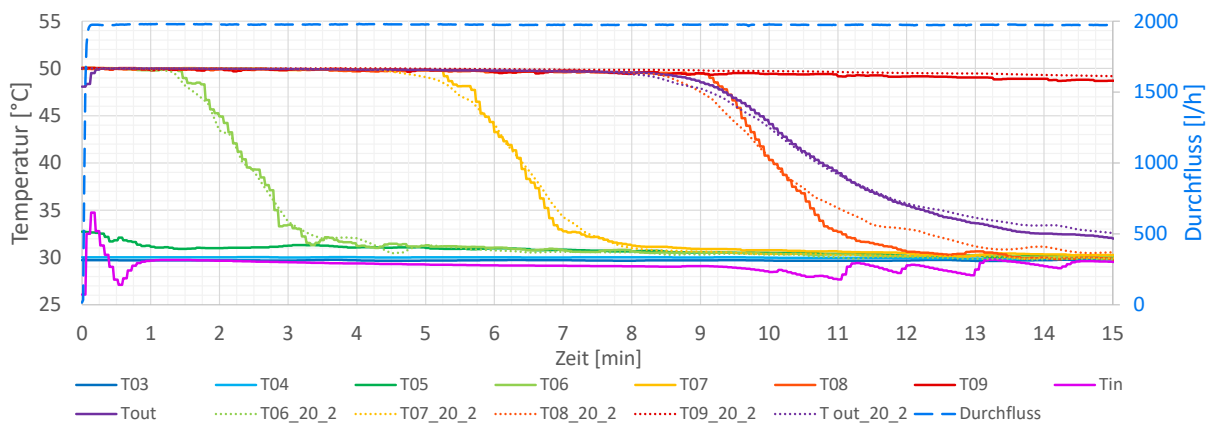


Abbildung 2: Vergleich der Simulation von Variante 1 (max.20 mm, min. 2 mm, punktiert) mit den Messungen (durchgezogen).

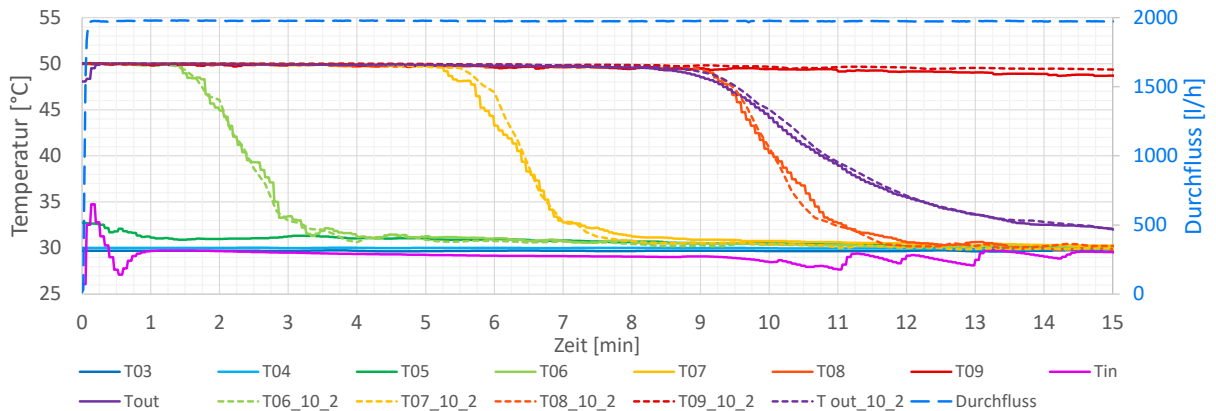


Abbildung 3: Vergleich der Simulation von Variante 2 (max.10 mm, min. 2 mm, gestrichelt) mit den Messungen (durchgezogen).

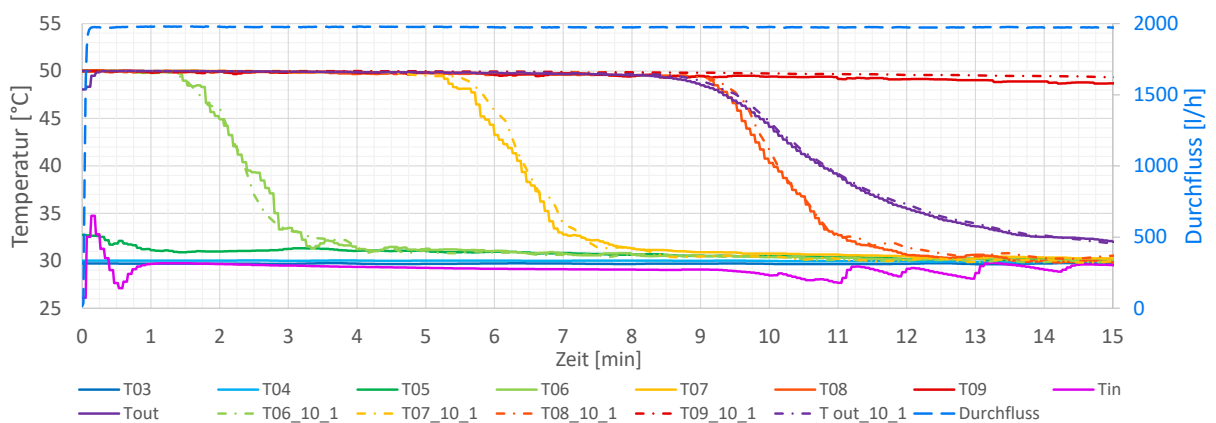


Abbildung 4: Vergleich der Simulation von Variante 3 (max.10 mm, min. 1 mm, strichpunktirt) mit den Messungen (durchgezogen).

Zur weiteren Validierung der Simulation werden die simulierten Strömungsbilder mit den gemessenen PIV-Bildern verglichen. Die Strömungsbilder der Simulation wurden im gleichen Querschnitt wie die Laserebene der PIV-Bilder und zur gleichen Zeit nach Start der Beladung gemacht. Der Vergleich der Strömungsbilder hat kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Netzvarianten gezeigt, daher wird die Wahl der Netzvariante anhand der Temperaturen getroffen. Die Variante 2 und 3 zeigen sehr ähnliche Resultate und eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messungen als Variante 1. Variante 2 braucht deutlich weniger Simulationszeit als Variante 3 und wird deshalb gewählt um die weiteren Simulationen durchzuführen.

Im Laborexperiment wurden fünf PIV-Aufnahmen mit Abständen von ca. 5 Minuten gemacht. Abbildung 5 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen PIV-Bildern der ersten Aufnahme und den Strömungsbildern der Simulationsvariante 2. Die Vergleiche mit den weiteren PIV-Aufnahmen zeigen keine zusätzlichen Erkenntnisse und sind im Anhang A abgelegt. Es muss beachtet werden, dass die PIV-Bilder nicht alle drei (links, Mitte, rechts) zur gleichen Zeit gemacht werden konnten, sondern innerhalb von ca. 1-2 min. Ausserdem wurden sie mit einer kleinen Überlagerung aufgenommen. Die PIV-Aufnahmen sind im Bericht DiffStrat 1 genauer



beschrieben. Sie wurden oberhalb vom Klöpperboden in einem Bereich mit ca. 23 cm Höhe gemacht. Dieser Bereich ist in den Aufnahmen und in den Simulationsbildern mit grauen Balken begrenzt. Die Strömungen der Messung und der Simulation zeigen beide dasselbe Verhalten. Aussen, am Rande des Klöpperbodens gibt es eine starke Strömung nach oben und in der Mitte eine schwächere Strömung nach unten, welche sich über eine grössere Fläche verteilt. Die Strömungen stimmen nicht überall exakt überein. Kleinere Wirbel, dort wo die Strömung sehr langsam ist, sind eher zufällig und schwierig abzubilden. Die Hauptcharakteristik der Ströme wird mit der Simulation allerdings gut abgebildet. Damit wird das Simulationsmodell als validiert erachtet und mit den gleichen Einstellungen verwendet um im Kapitel 4 weitere Konfigurationen zu simulieren.

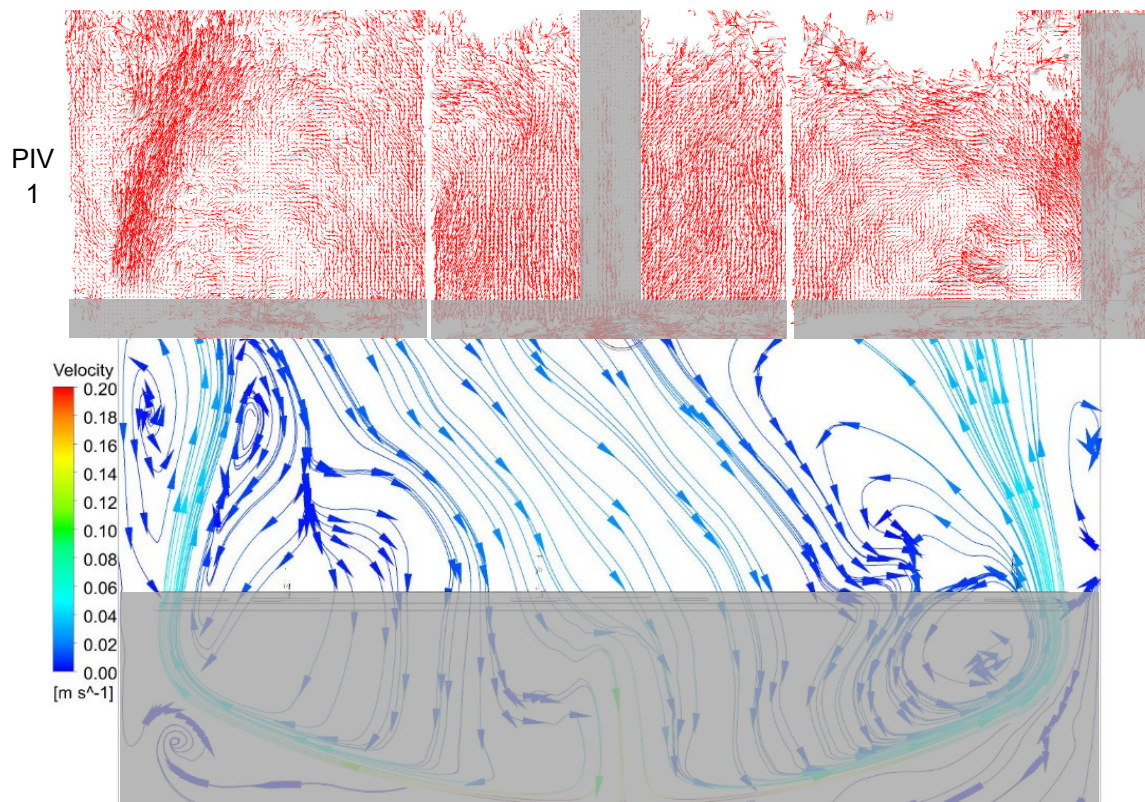


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 1 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 2.

3.2 Bogenrohr mit Lochblech

Das Simulationsmodell für den Aufbau "Bogenrohr mit Lochblech" basiert auf dem Modell für das Bogenrohr ohne Lochblech, mit folgenden Änderungen.

- Das Lochblech wurde hinzugefügt und auf der Höhe des Randes des Klöpperbodens positioniert (siehe Abbildung 6).
- Da das Lochblech kleinskalige Geometrien aufweist, wurde die Vernetzung und Simulation sehr aufwändig. Um dem entgegenzuwirken, wurden folgende zusätzlichen Vereinfachungen gemacht:



- Die angeschweissten Halterungen zur Auflage des Lochblechs wurden weggelassen.
- Die drei Teile mit denen das Lochblech auf die Halterungen gedrückt wurde, wurden nicht gezeichnet. Stattdessen wurden im Lochblech keine Löcher gemacht, dort wo die Teile zu liegen kämen.
- Der Auslaufstutzen unten im Zentrum des Klöpperbodens wurde weggelassen, da dieser verschlossen ist und keinen nennenswerten Einfluss auf die Strömung hat, wie sich bei den Simulationen ohne Lochblech gezeigt hat.
- Die Wasseroberfläche wurde wie alle anderen Flächen als adiabatisch definiert.
- Das initiale Fluidvolumen wurde unterhalb der Thermokline mit der Ausgangstemperatur von 30 °C versehen, das Volumen oberhalb mit 51 °C, wie es bei den Laborexperimenten der Fall war.
- Es wurden 15 Minuten simuliert.

Es wurde nur mit dem Lochblech mit grossen Löchern (\varnothing 10 mm) simuliert. Das Lochblech mit kleinen Löchern (\varnothing 3 mm) konnte nicht simuliert werden. Die Löcher sind so klein und zahlreich, dass das Programm bereits bei der Vernetzung des Modells überlastet war.

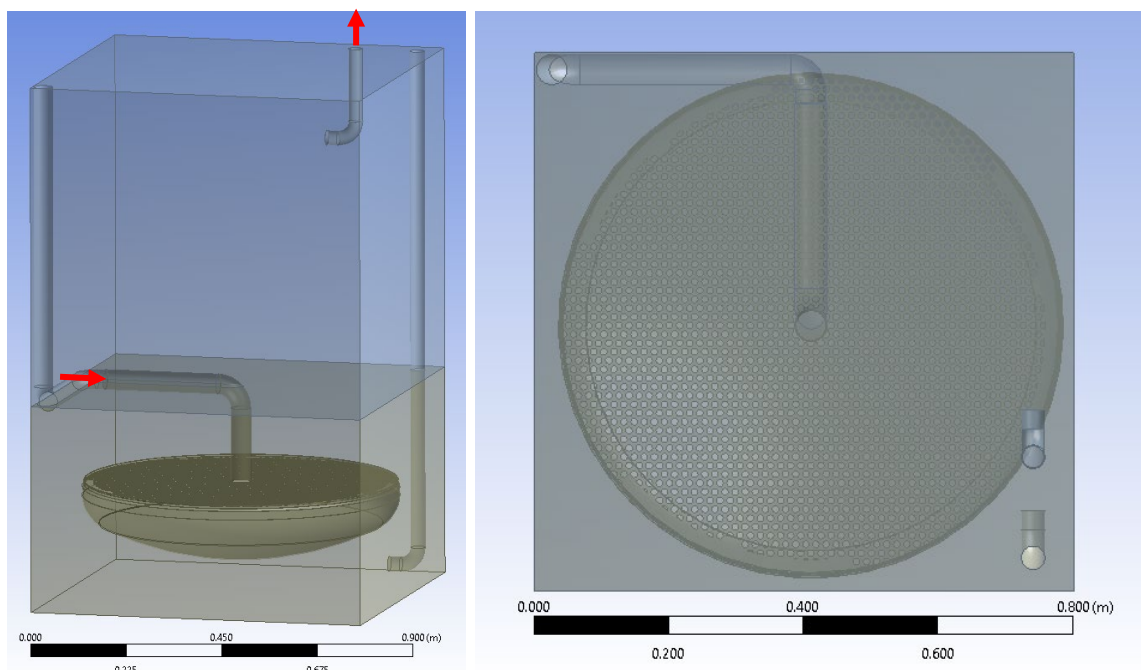


Abbildung 6: Simulationsmodell (Fluidvolumen) des Aufbaus "Bogenrohr mit Lochblech (grosse Löcher)".

Bei der Simulation mit dem Lochblech mit grossen Löchern wurden zwei verschiedene Netzvarianten verglichen gemäss Tabelle 2. Zum einen ein Netz mit maximaler Elementgrösse von 20 mm und zum andern mit max. 10 mm. Die minimale Elementgrösse musste bei beiden auf 0.5 mm eingestellt werden, da sonst das 1 mm dicke Lochblech nicht vernetzt werden konnte. Diese feine Vernetzung führte zu sehr hohem Simulationsaufwand. Die Änderung der maximalen Elementgrösse hatte praktisch keinen Einfluss auf die Simulationszeit.



Tabelle 2: Drei verschiedene Varianten von Netzgrössen.

	Maximale Elementgrösse [mm]	Minimale Elementgrösse [mm]	Gesamte Simulationszeit [h] (Laufzeit * Anz. Prozessoren)
Variante 1	20	0.5	2160
Variante 2	10	0.5	2120

Abbildung 7 zeigt die Temperaturen der Messung und der beiden Simulationen des Bogenrohrs mit Lochblech. Der Vergleich der beiden Netzvarianten zeigt, dass überraschenderweise die Variante 1 mit maximaler Elementgrösse von 20 mm besser mit den Messungen übereinstimmt.

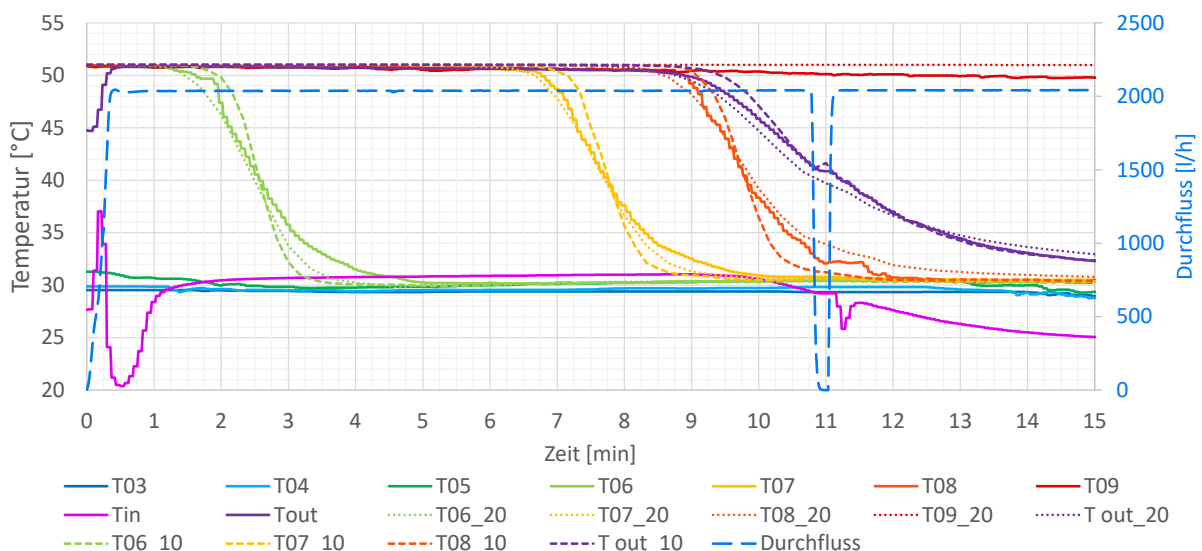


Abbildung 7: Vergleich der Simulationen (punktiert für 20 mm bzw. gestrichelt für 10 mm) mit den Messungen (durchgezogen) am Bogenrohr mit Lochblech (grosse Löcher).

In Abbildung 8 wird das Strömungsbild der Netzvariante 1 mit den PIV-Bildern der ersten Messung verglichen. Die weiteren PIV-Aufnahmen mit entsprechenden simulierten Strömungen sind im Anhang B abgelegt. Die Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb des Lochblechs sind relativ klein was eine genaue Abbildung der zum Teil erratischen Strömungen schwierig macht. Aber auch hier kann die Hauptcharakteristik der Strömung mit der Simulation abgebildet werden. Auf der linken Seite ist die Strömung nach oben etwas stärker ausgeprägt als auf der rechten. Dies liegt daran, dass sich auf der rechten Seite an der Stelle des Schnitts (Laserebene) das Befestigungsteil des Lochblechs befindet, was dort die Strömung stärker behindert.

Die Netzvariante 1 mit maximaler Elementgrösse von 20 mm der Simulation des Aufbaus "Bogenrohr mit Lochblech" wird mit den gleichen Einstellungen für die weiteren Simulationen in Kapitel 4 verwendet.

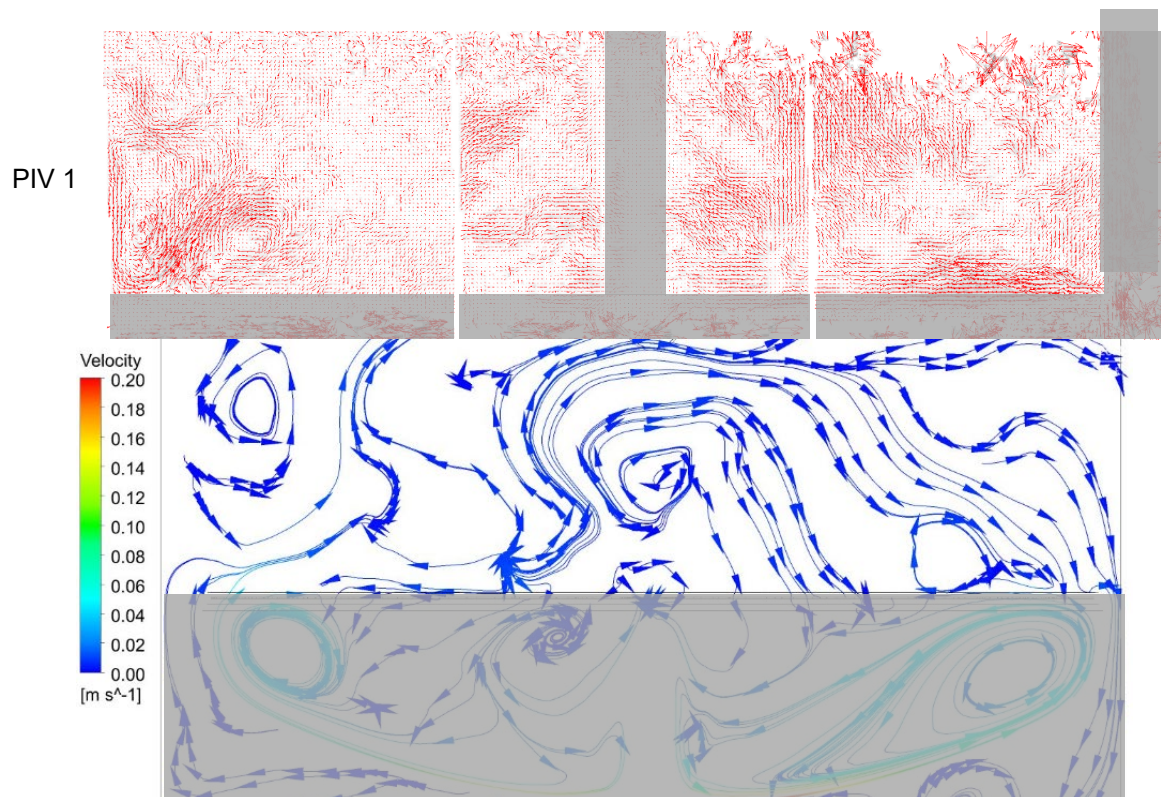


Abbildung 8: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 1 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 1.

3.3 Sprührohr

Das Simulationsmodell für den Aufbau "Sprührohr", dargestellt in Abbildung 9, wurde möglichst genau dem Laborexperiment nachgebildet. Der Fluideintritt erfolgt durch ein horizontales Sprührohr mit Innendurchmesser von 34 mm und 10 Löchern (\varnothing 22.5 mm) auf jeder Seite des Rohrs. Der Austritt aus dem Speicher erfolgt durch den unteren Stutzen. Das Wasser im Glastank ist vorkonditioniert auf 21.5 °C unterhalb, 23.5 °C im Bereich und 51 °C oberhalb des Sprührohrs, gemäss dem Laborexperiment beschrieben im Kapitel 3.1 des DiffStrat-Schlussberichts. Für das Simulationsmodell wurden die gleichen Vereinfachungen und Einstellungen verwendet wie für das Modelle mit Bogenrohr (Kapitel 3.1).

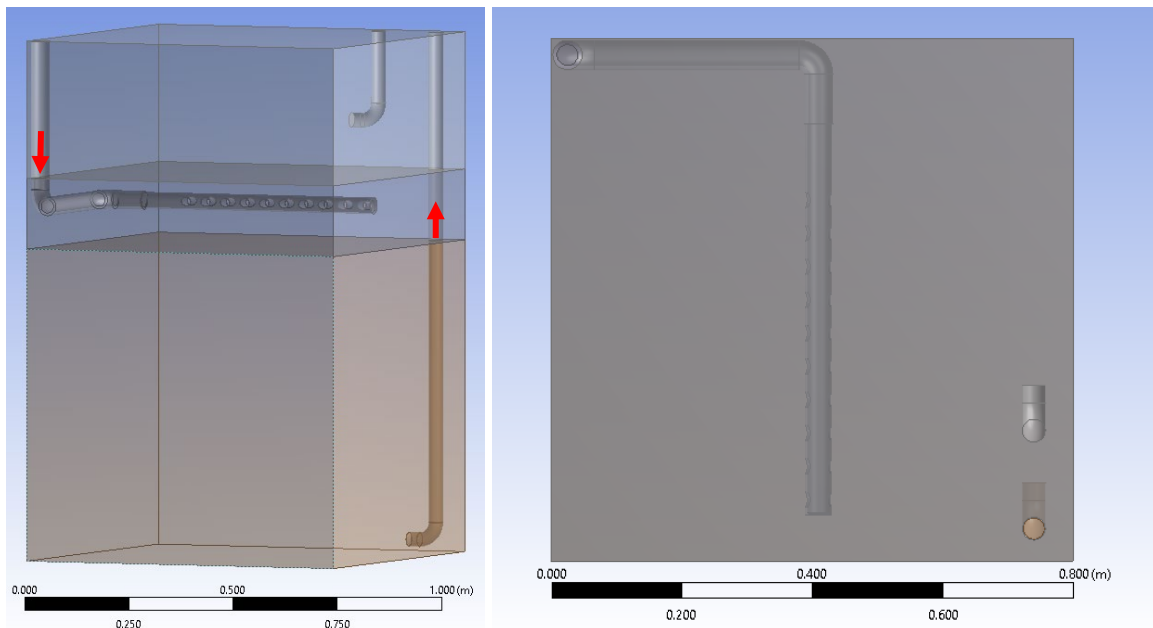


Abbildung 9: Simulationsmodell (Fluidvolumen) des Laboraufbaus mit Sprührohr.

Es wurden verschiedene Feinheitsgrade der Vernetzung sowie detailierungsgrade der CAD-Zeichnung simuliert und verglichen. Die wichtigsten werden in Tabelle 3 dargestellt. Da durch die Verfeinerung der Vernetzung (Variante 1-3) keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten, wurde zusätzlich versucht die Geometrie des Sprührohrs genauer abzubilden (Variante 4). Dazu wurden die Kanten der Löcher gebrochen, da dies eher der Realität entspricht, und die Vernetzung im Bereich des Sprührohrs mittels "Face Sizing" auf 0.5 bis 5 mm Kantenlänge der Elemente reduziert.

Tabelle 3: Verschiedene Netzvarianten um die Messungen vom Sprührohr nachzubilden.

	Maximale Elementgrösse [mm]	Minimale Elementgrösse [mm]	Gesamte Simulationszeit [h] (Laufzeit * Prozessoren)
Variante 1	20	2	212
Variante 2	10	1	552
Variante 3	7	1	1240
Variante 4	10	1 mit weichen Kanten und Detailnetz	768

Der Vergleich der Temperaturen der Messung und der vier verschiedenen Simulationsvarianten in Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigt, dass die Unterschiede der Varianten keine signifikanten Unterschiede in den Temperaturverläufen zur Folge haben. Lediglich anhand der Temperatur T08 könnte man argumentieren, dass die Variante 1 die Messungen etwas weniger gut trifft. Bei allen Varianten der Simulation ist die Trennschärfe der Thermokline (Steilheit der Temperaturkurve) kleiner als bei den Messungen. Es wurde versucht mit der



Netzfeinheit, der Geometrie des Sprührohrs, der Turbulenzintensität und der definierten Temperatur der Volumendomains die Korrelation zwischen Messung und Simulation zu erhöhen, jedoch ohne Erfolg.

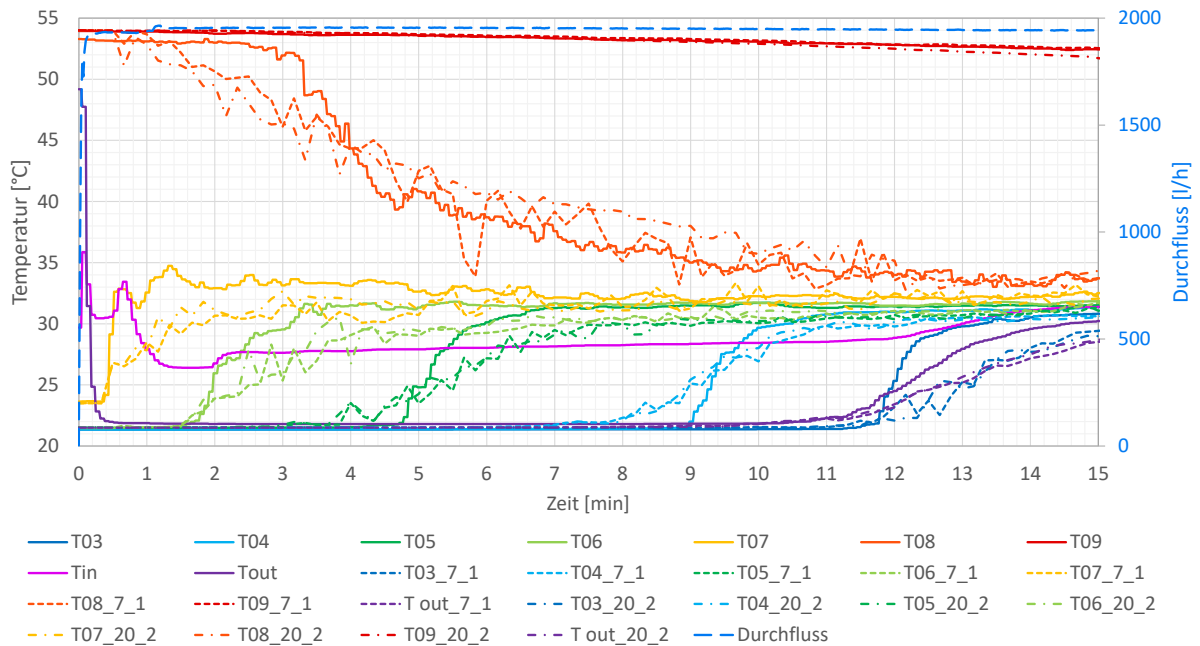


Abbildung 10: Vergleich der Simulationen (gestrichelt für Variante 3 bzw. strichpunktirt für Variante 1) mit den Messungen (durchgezogen) am Sprührohr.

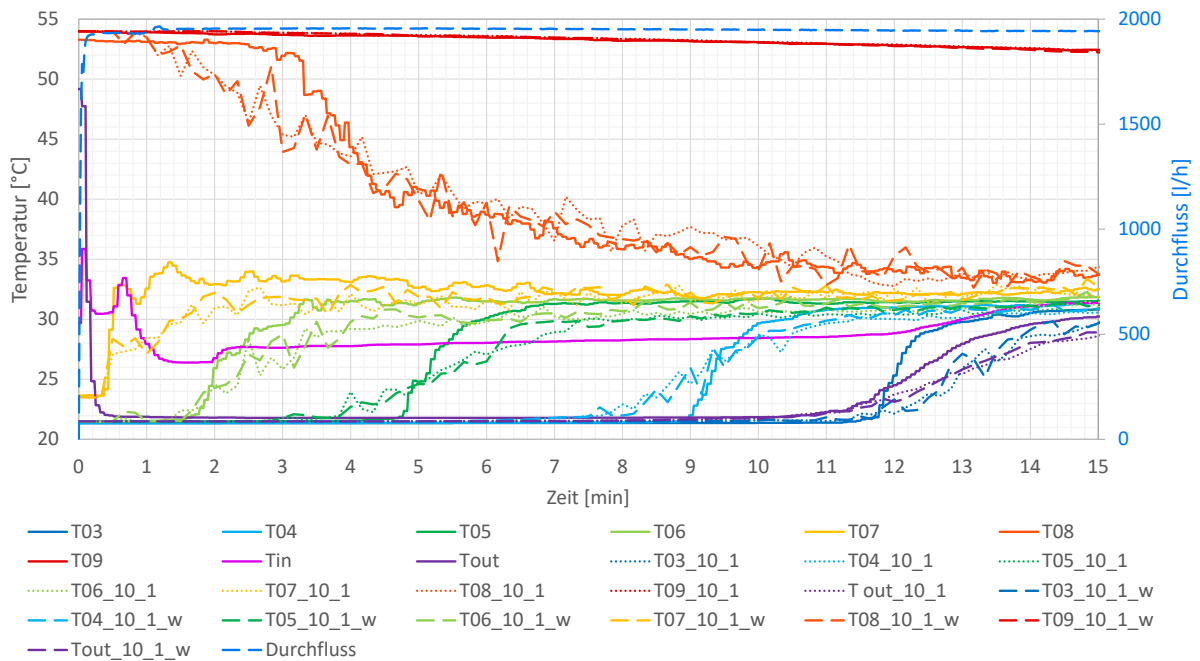
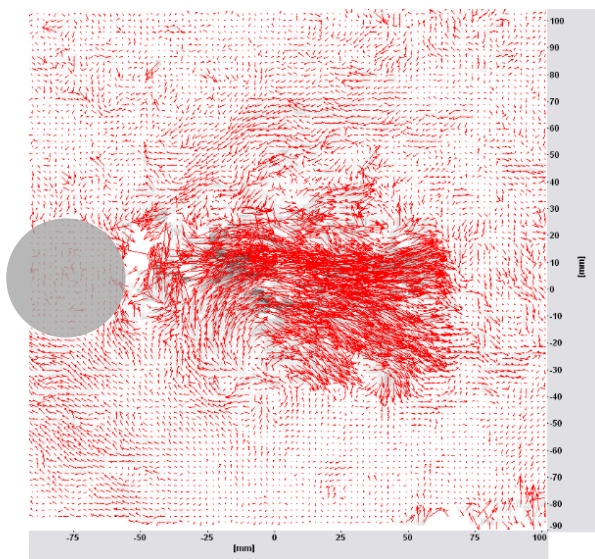


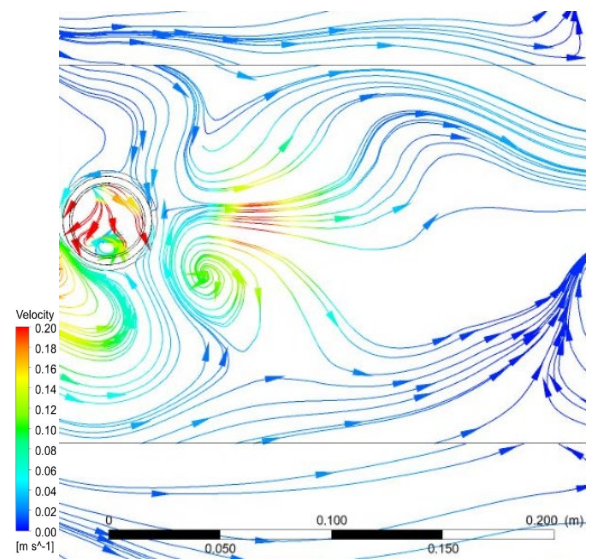
Abbildung 11: Vergleich der Simulationen (punktirt für Variante 2 bzw. langgestrichelt für Variante 4) mit den Messungen (durchgezogen) am Sprührohr.



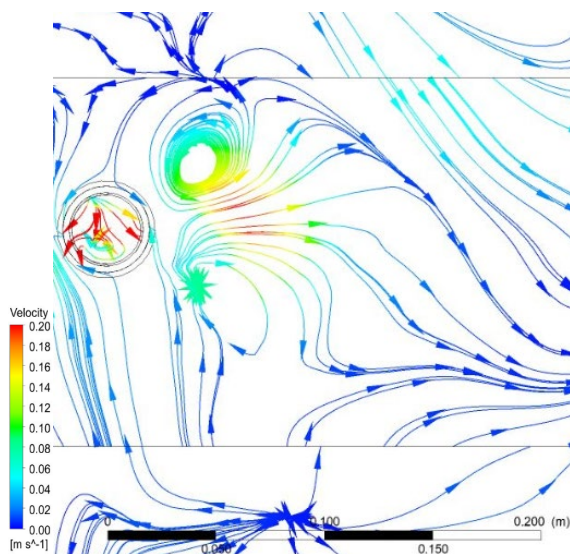
In Abbildung 12 bis Abbildung 14 werden die drei PIV-Bilder (drei Ebenen) der Labormessungen mit den Strömungsbildern der Simulationen verglichen. Die Variante 1 wird hier nicht mehr gezeigt, weil diese bei den Temperaturen bereits die geringste Übereinstimmung mit der Messung hatte. Die horizontalen, schwarzen Linien in den Simulationsbildern sind die Positionen der Thermokline im Ausgangszustand, bzw. die Grenzen der Domains der Simulation. Die Strömung darüber ist kohärent. Die Strömungslinien sind nur unterbrochen, weil diese für jede Domain einzeln generiert werden. Es ist in der Messung, sowie in den Simulationen zu erkennen, dass die Strömung in der Ebene vorne (Abbildung 12), d.h. am Ende des Sprührohres, am stärksten ausgeprägt ist.



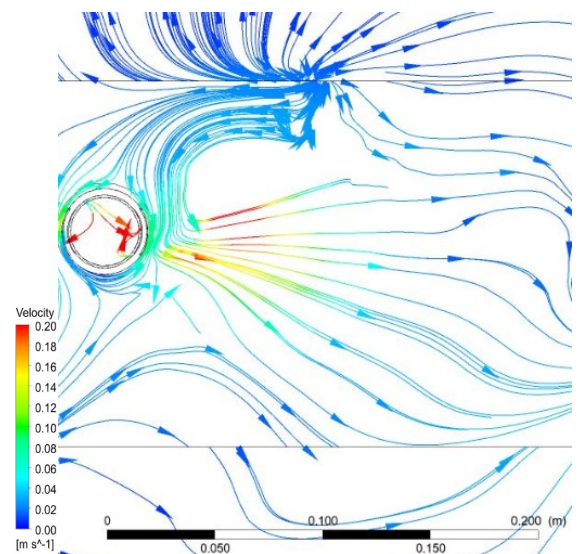
PIV Bild der Messung, vordere Ebene



Variante 2: max 10 mm, min 1 mm



Variante 3: max 7 mm, min 1 mm

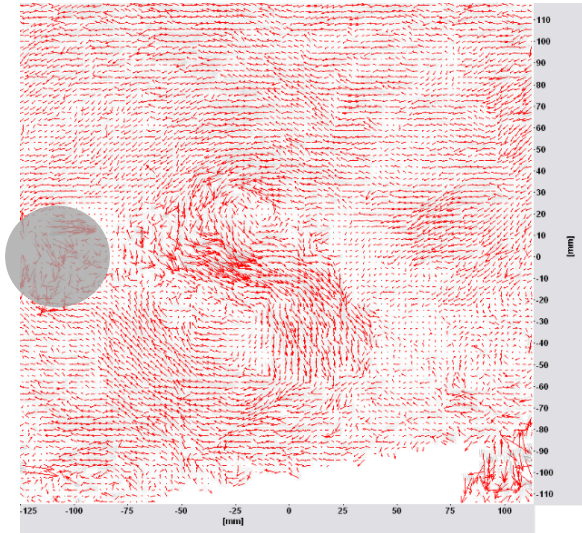


Variante 4: max 10 mm, min 1 mm, weiche Kanten

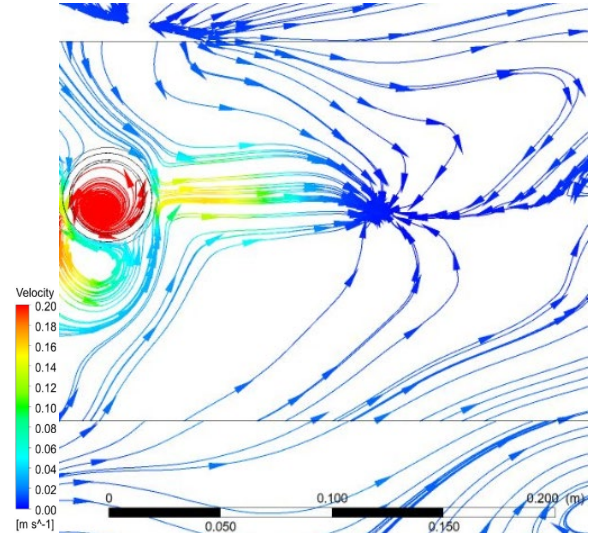
Abbildung 12: Vergleich der PIV Bilder der Messungen mit den Strömungsbildern der Simulation. Ebene vorne, beim letzten Austrittsloch in Strömungsrichtung.



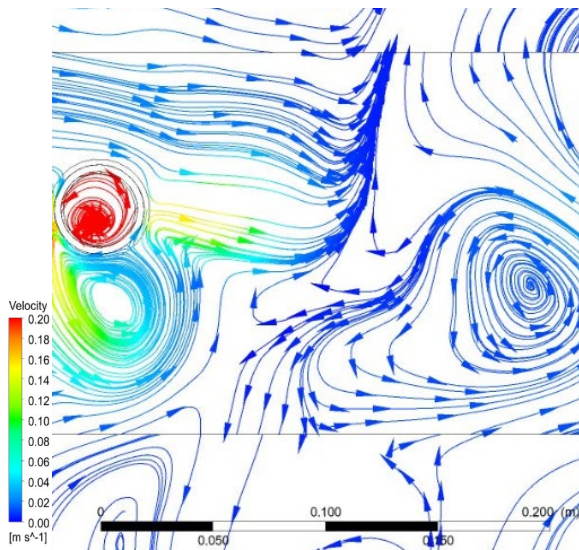
In der Ebene in der Mitte (Abbildung 13) ist sie deutlich weniger ausgeprägt und in der Ebene hinten (Abbildung 14) sieht man praktisch keine Strömung.



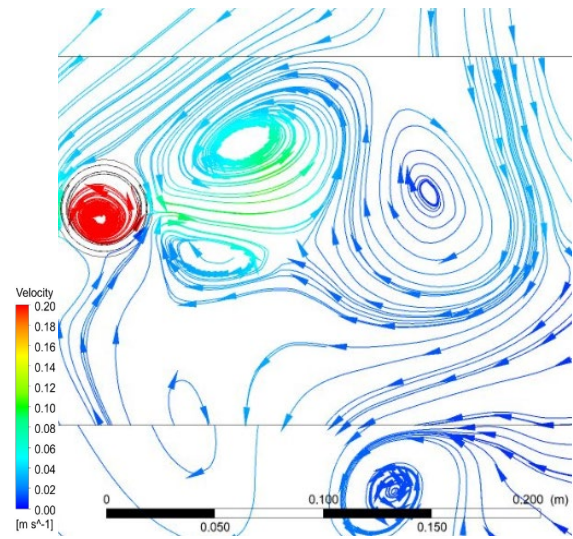
PIV Bild der Messung, mittlere Ebene



Variante 2: max 10 mm, min 1 mm

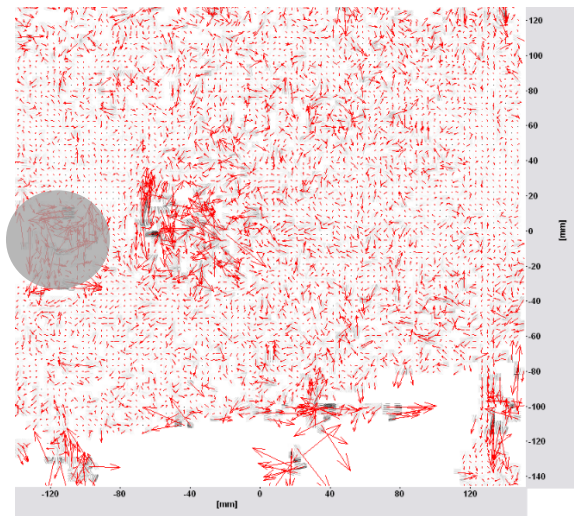


Variante 3: max 7 mm, min 1 mm

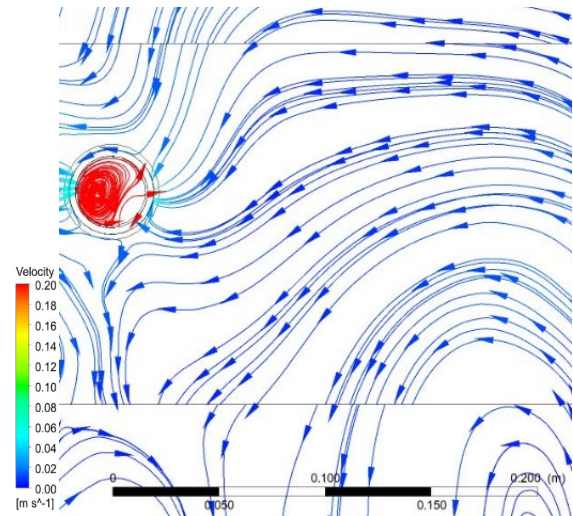


Variante 4: max 10 mm, min 1 mm, weiche Kanten

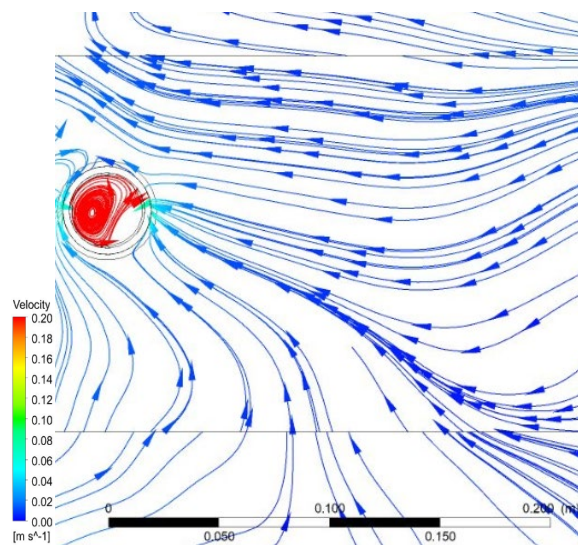
Abbildung 13: Vergleich der PIV Bilder der Messungen mit den Strömungsbildern der Simulation. Ebene Mitte, beim sechsten Austrittsloch in Strömungsrichtung.



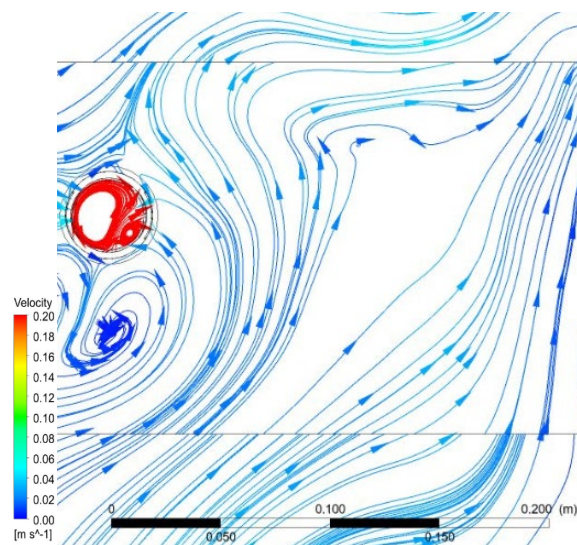
PIV Bild der Messung, hintere Ebene



Variante 2: max 10 mm, min 1 mm



Variante 3: max 7 mm, min 1 mm



Variante 4: max 10 mm, min 1 mm, weiche Kanten

Abbildung 14: Vergleich der PIV Bilder der Messungen mit den Strömungsbildern der Simulation. Ebene hinten, beim ersten Austrittsloch in Strömungsrichtung.

Ein horizontaler Schnitt durch das Sprührohr, in Abbildung 15 beispielhaft dargestellt anhand der Simulationsvariante 2, lässt genauer erkennen wie die Strömung verläuft. Das meiste Fluid strömt aus den letzten Löchern des Sprührohrs in Fließrichtung. Aus den ersten Löchern strömt nur wenig Fluid und nur entlang des Sprührohrs. Eine gleichmässige Verteilung der Strömung über die Löcher stellt sich mit dem getesteten Sprührohr nicht ein.

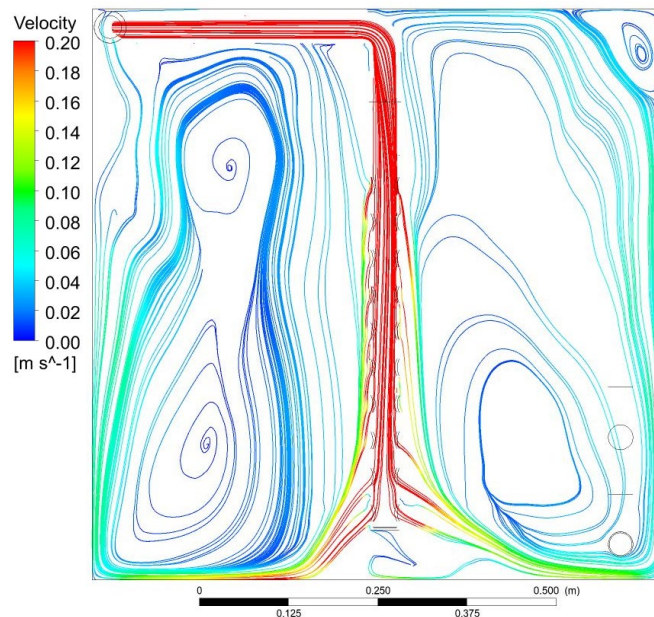


Abbildung 15: Simulierte Strömung (Variante 2) durch das Sprührohr, horizontaler Schnitt.

Anhand der Temperaturen und der Strömungsbilder kann keine Variante der Simulation eindeutig als zutreffender als eine andere bestimmt werden. Deshalb werden die Simulationen der weiteren Konfigurationen in Kapitel 4.4 mit der Variante 2 durchgeführt. Die simulierte Strömung um das Sprührohr kann qualitativ mit den Strömungsbildern der Messung als validiert erachtet werden. Die Temperaturen die im Speicher entstehen, bzw. der Verlauf der Thermokline konnte nur näherungsweise nachgebildet werden mit der Simulation und ist daher mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren.



4 Simulation anderer Konfigurationen

4.1 Methoden

4.1.1 Simulierte Varianten

Mit den validierten Simulationsmodellen von Kapitel 3 werden verschiedene Konfigurationen von Speichereinbauten und Durchflussströmen simuliert für einen Speicher mit Standardgeometrie (800 Liter, $\varnothing = 750$ mm, Klöpperboden und -deckel, Höhe 1.94 m) gemäss Abbildung 16. Die Bogenrohre von Ein- bzw. Austritt sind gleich, d.h. der Speicher ist auf halber Höhe gespiegelt. Eine Liste aller simulierten Konfigurationen mit Bogenrohren ist in Tabelle 4 gegeben. Dabei setzt sich die in der linken Spalte dargestellte Bezeichnung zusammen aus "oLB" oder "mLB" (ohne Lochblech, respektive mit Lochblech) sowie einer Zahl für den Massenstrom des Eintritts in kg/h sowie "u" oder "o" für Einlauf unten oder oben. Die Zahl "2" am Ende der Bezeichnung deutet darauf hin, dass der Speicher in der Simulation zweimal durchgeladen wird.

Für die Simulationen mit Sprührohr wurde dieselbe Speichergeometrie verwendet, aber mit anderer Höhe und anderer Geometrie von Ein- und Austritt (siehe Abbildung 19). Die simulierten Konfigurationen sind in Tabelle 5 gelistet. Dabei setzt sich die in der linken Spalte aufgeführte Bezeichnung zusammen aus "SR" für Sprührohr, gefolgt von der Anzahl Löcher je Seite und dem Durchmesser der Löcher in mm. Als Referenz wurde auch eine Simulation ohne Sprührohr gemacht, d.h. mit Eintritt durch ein einfaches Loch in der Wand. Es wurde jeweils immer derselbe Durchsatz von 2000 kg/h simuliert.

Zunächst wurden die Konfigurationen oLB2000u und oLB2000o simuliert und miteinander verglichen. Für beide Varianten ist die anfängliche Temperatur im Speicher 50 °C oberhalb des Einlaufs und 45 °C unterhalb des Einlaufs, wie in Abbildung 17 dargestellt. Bei oLB2000u ist der Speichereintritt unten wie in den Labormessungen, und erfolgt mit einer Temperatur von 45 °C. Bei oLB2000o ist der Speichereintritt oben mit 50 °C. Mit dem Vergleich der beiden Varianten wird untersucht, ob von den Labormessungen welche mit dem Bogenrohr in Richtung Klöpperboden unten (kalter Eintritt, Entladung) durchgeführt wurden auch auf das Strömungsverhalten mit warmem Eintritt oben, d.h. einer Beladung, geschlossen werden kann auf Grund der Symmetrie der beiden Varianten. Im Weiteren werden verschiedene Massenströme simuliert, jeweils mit und ohne Lochblech.

Bei den Simulationen mit Sprührohr erfolgt der Eintritt des Fluids in der Mitte des Speichers mit 25 °C, gemäss Abbildung 19. Die Thermokline ist 20 cm oberhalb des Sprührohrs. Unterhalb der Thermokline ist die Temperatur anfänglich 20 °C, oberhalb ist sie 55 °C. Es werden drei verschiedene Sprührohre (verschiedene Anzahl und Grösse der Löcher) simuliert. Der Massenstrom bleibt der gleiche bei 2000 kg/h. Das Sprührohr bei SR_10_22 ist dasselbe wie im Laborexperiment. Wenn sich die Strömung über alle Löcher gleichmässig verteilen würde, wäre die Austrittsgeschwindigkeit 0.07 m/s. Damit wären die Voraussetzungen für eine geschichtete Be- oder Entladung gemäss Jenni [25] und Gwerder u.a. [2] gegeben. Bei den anderen beiden (SR_10_9 und SR_15_8) wurde die Anzahl und Grösse der Löcher gemäss



folgender Formel aus BigStrat [23]² gewählt, wobei D_L der Lochdurchmesser, D_R der Rohrdurchmesser und N die Anzahl Löcher auf einer Seite ist.

Gleichung 1
$$D_L \leq 0.9D_R/\sqrt{N}$$

Die Dimensionierung nach dieser Formel führt zu einer gleichmässigen Verteilung der Strömung über die Löcher. Dadurch wird jedoch die Durchschnittsgeschwindigkeit am Lochaustritt auf 0.39 m/s (SR_10_9) bzw. 0.37 m/s (SR_15_8) erhöht.

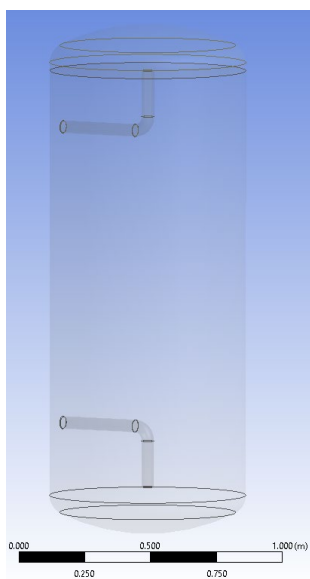


Abbildung 16: Simulationsmodell Speicher.

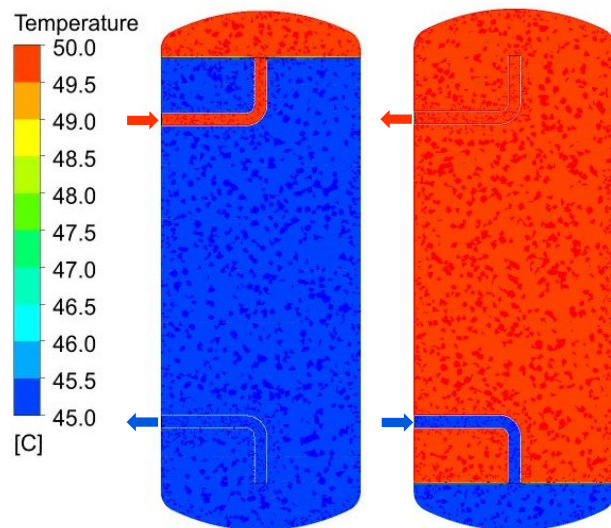


Abbildung 17: Anfängliche Temperaturen für Konfiguration mit warmem Eintritt oben (links) und kaltem Eintritt unten (rechts).

Tabelle 4: Konfigurationen der CFD Simulationen für Bogenrohre ohne (oLB) und mit (mLB) Lochbleche.

Bezeichnung	Beschreibung	Dauer	Temperaturen
mLB1500o	Bogenrohr mit Lochblech, Einlauf oben, 1500 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
mLB2000o	Bogenrohr mit Lochblech, Einlauf oben, 2000 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
mLB2000o_2	Bogenrohr mit Lochblech, Einlauf oben, 2000 kg/h	Bis Thermokline zweimal durch Speicher	Einlauf: 5 K wärmer als Auslauf Speicher anfänglich: 45 °C

² Im Bericht DiffStrat wurde diese Formel auch verwendet, allerdings mit einem Faktor von 0.7, wie sie ursprünglich von Knaebel (1981) vorgeschlagen wurde [Knaebel, K.S., 1981. *Simplified sparger design. Chemical Engineering*, 88(5), S.116–117.]. Die Simulationen im Projekt BigStrat haben gezeigt, dass auch mit einem Faktor von 0.9 eine homogene Strömung erreicht wird, bzw. die Strömung nicht mehr homogener wird wenn der Faktor kleiner als 0.9 ist.



mLB2500o	Bogenrohr mit Lochblech, Einlauf oben, 2500 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
mLB3000o	Bogenrohr mit Lochblech, Einlauf oben, 3000 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
oLB1500o	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf oben, 1500 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
oLB2000o	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf oben, 2000 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
oLB2000o_2	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf oben, 2000 kg/h	Bis Thermokline zweimal durch Speicher	Einlauf: 5 K wärmer als Auslauf Speicher anfänglich: 45 °C
oLB2000u	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf unten, 2000 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 45 °C Speicher anfänglich: 50 °C
oLB2500o	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf oben, 2500 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C
oLB3000o	Bogenrohr ohne Lochblech, Einlauf oben, 3000 kg/h	Bis Thermokline einmal durch Speicher	Einlauf: 50 °C Speicher anfänglich: 45 °C

Tabelle 5: Konfigurationen der CFD Simulationen für Varianten mit Sprührohren (SR) mit 10 oder 15 Löchern und Lochdurchmesser 8 – 22.5 mm.

Bezeichnung	Beschreibung	Dauer	Temperaturen
SR_10_22	Sprührohr: 2x 10 Löcher, Lochdurchmesser: 22.5 mm (oval 21-24 mm), Durchfluss: 2000 kg/h	30 min	Oben: 55 °C, unten 20 °C Einlauf 25 °C
SR_10_9	Sprührohr: 2x 10 Löcher, Lochdurchmesser: 9.5 mm, Durchfluss: 2000 kg/h	30 min	Oben: 55 °C, unten 20 °C Einlauf 25 °C
SR_15_8	Sprührohr: 2x 15 Löcher, Lochdurchmesser: 8 mm, Durchfluss: 2000 kg/h	30 min	Oben: 55 °C, unten 20 °C Einlauf 25 °C
Loch in Wand	Eintritt ohne Sprührohr durch Loch in Wand	30 min	Oben: 55 °C, unten 20 °C Einlauf 25 °C



4.1.2 Auswertung der Temperaturprofile

Die Simulationen werden anhand von Temperaturdiagrammen, sowie Temperatur- und Strömungsbildern analysiert. Die Temperaturen in den Diagrammen werden in verschiedenen Höhen des Speichers als mittlere Temperatur der horizontalen Schnittfläche berechnet.³ Die Temperaturebenen verteilen sich über die ganze Speicherhöhe und sind in Abbildung 18 bzw. Abbildung 19 dargestellt. Sie sind auf halber Höhe des Speichers gespiegelt angeordnet.

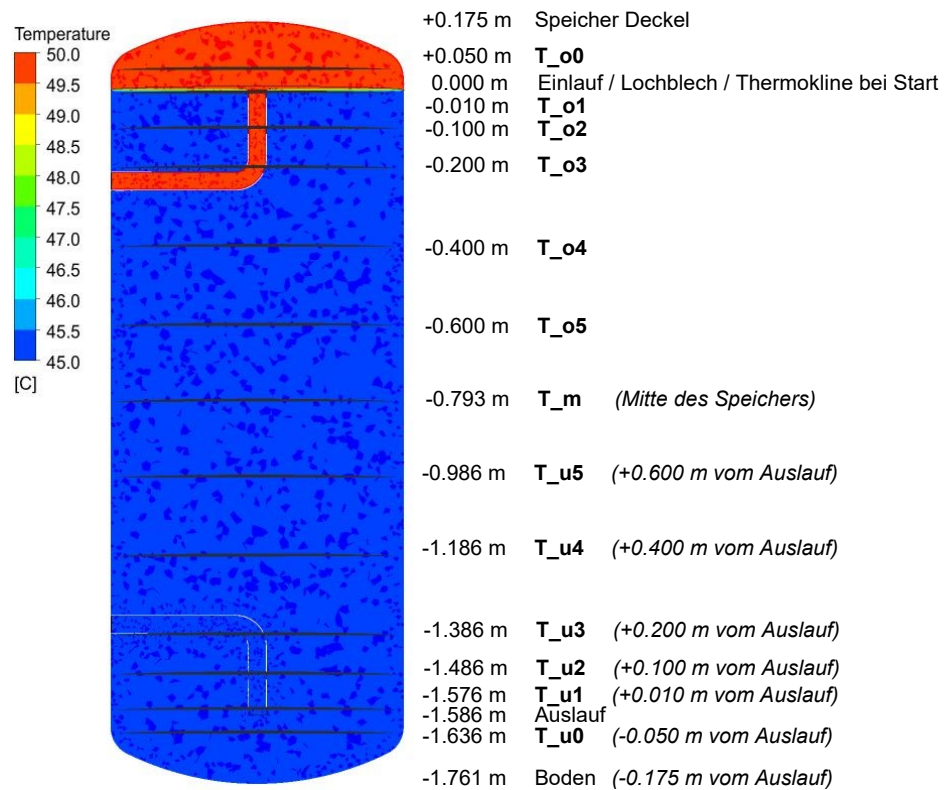


Abbildung 18: Position der Temperaturebenen beim Speicher mit Bogenrohr.

³ Die Ebenen enthalten in manchen Fällen auch einen Anteil des Ein-/Auslaufrohres, entsprechend fließt die Temperatur im Rohr in die Berechnung des Temperaturdurchschnittes ein (T_o1, T_o2, T_o3). Bei einem Temperaturunterschied von 5 K führt dies zu einem Fehler von lediglich 0.02 K und wird daher vernachlässigt.

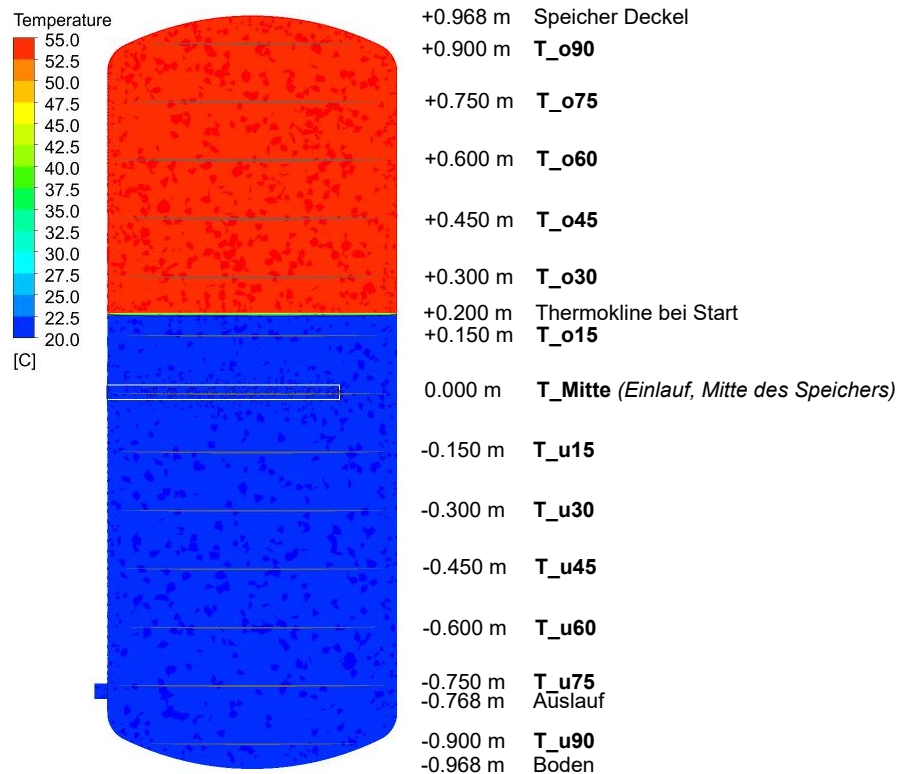


Abbildung 19: Position der Temperaturebenen beim Speicher mit Sprührohr.

4.1.3 Berechnung von Kennzahlen zum Vergleich / Abschätzung energetische Auswirkung

Um den Nutzen verschiedener Speichereinbauten zur Strömungsberuhigung besser vergleichen zu können, wurde versucht die Entropieproduktion ΔS in den simulierten Speichern zu berechnen:

Gleichung 2
$$\Delta S = S_{End} - S_{Start} - (S_{ein} - S_{aus})$$

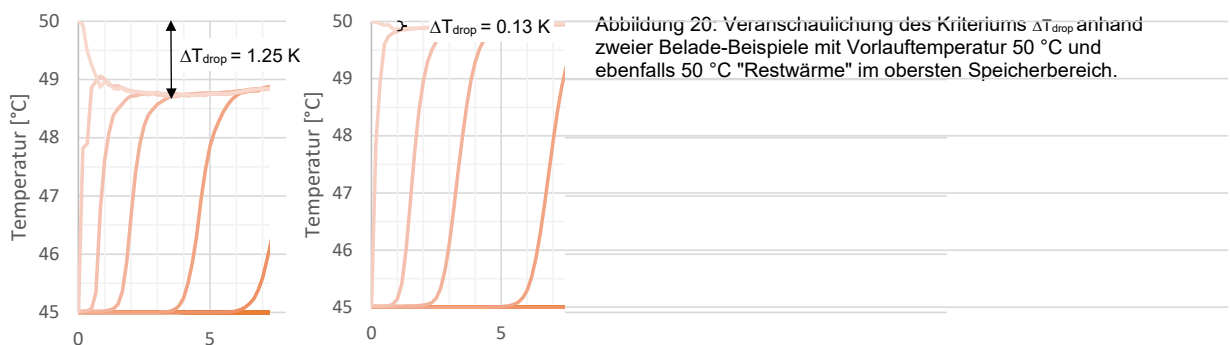
Die Schwierigkeit bei diesem Unterfangen ist, dass sich die Entropiewerte von Anfangs- und Endzustand (S_{Start} und S_{End}), bzw. Einlauf und Auslauf (S_{ein} und S_{aus}) in einer Größenordnung von 10^5 J/K bewegen, während die resultierende Entropiedifferenz sich im Bereich von $10^2 - 10^3$ J/K bewegt. Dies hat zur Folge, dass eine Ungenauigkeit der Ausgangswerte von 1% das Resultat um mehr als 100% verändern kann. In den Speicherschichtungstests, die am SPF durchgeführt und mit dieser Methode ausgewertet werden, wird einerseits sehr genau darauf geachtet, dass der Anfangs- und Endzustand des Speichers praktisch identisch und damit $S_{End} - S_{Start}$ sehr gering ist (Concise Cycle). Zudem wird durch das mehrfache Wiederholen des Messzyklus die Auswirkung zufälliger Messunsicherheiten quantifiziert und reduziert. Insgesamt konnten deshalb bei der Speicherschichtungstestmethode plausible und reproduzierbare Resultate erzielt werden. Bei den hier vorliegenden CFD-Simulationen wurde jedoch weder ein Experiment mit identischem



Anfangs- und Endzustand des Speichers gefahren, noch wurde ein Be- und Entladezyklus mehrfach hintereinander wiederholt. Vermutlich sind dies die Gründe dafür, dass die Auswertung nach der beschriebenen Methode in diesem Falle keine brauchbaren Resultate lieferte.

In der Folge wurden andere Kennzahlen zum Vergleich der Schichtungseffizienz berechnet, deren Resultate im Abschnitt 4.5 präsentiert werden.

Für die Varianten mit Bogenrohr ist der Temperaturabfall ΔT_{drop} im obersten Bereich des Speichers (siehe Abbildung 20) ein Indikator dafür, wie stark der Speicher bei der Beladung durchmischt wird. Je grösser ΔT_{drop} , desto grösser ist die Durchmischung. Im Anhang C wird anhand dieser Kennzahl versucht eine Abschätzung der energetischen Auswirkung zu machen. Da diese aber auf den Simulationen beruhen, die nur einen Ausschnitt des Beladezyklus beinhalten und nicht den ganzen Be- und Entladezyklus, sind diese Berechnungen vorsichtig zu interpretieren.



Die CFD-Simulationen mit Sprührohr stellen einen anderen Fall der Beladung dar. Hier wird nicht ein Speicher von oben bis unten mit warmem Wasser beladen, wie bei den Simulationen mit Bogenrohr, sondern es wird der untere Bereich eines Speichers möglichst so aufgewärmt, dass der darüber liegende wärmere Teil ungestört bleibt. Dies entspricht einer Beladung des Raumheizungsbereichs in einem Kombispeicher für Warmwasser und Raumheizung. Die beiden Fälle können nicht direkt miteinander verglichen werden, und die Kennzahl für die Varianten mit Bogenrohr eignet sich nicht um den Fall mit Sprührohr zu beschreiben. Hier wird also eine andere Kennzahl berechnet. Ein Indikator, wie stark die warme Schicht oberhalb der Thermokline gestört wird, ist die Zeit $t_{\Delta T-20\%}$. Dies ist die Zeitspanne bis zu welcher die Temperaturdifferenz ΔT zwischen der mittleren Temperatur des Volumens oberhalb der anfänglichen Thermokline (anfangs 55°C) und der Temperatur des Einlaufs (hier 25°C) um 20% gesunken ist. Je höher diese Zeit $t_{\Delta T-20\%}$, desto länger bleibt die Schichtung im Speicher erhalten.

Ein weiterer Kennwert ist das Verhältnis $\eta_{\Delta T}$ zwischen der mittleren Temperaturdifferenz des Speicherbereichs über der Thermokline und dem eintretenden Fluid jeweils am Ende ΔT_{Ende} und am Anfang ΔT_{Anfang} eines CFD-Experiments von 30 Minuten Dauer. Dies gibt an wie gut die Temperatur und somit die Wärme im oberen Bereich erhalten geblieben ist. Bei 100% wäre keine Wärme aus dem oberen Bereich verloren gegangen.



Gleichung 3 $\eta_{\Delta T} = \Delta T_{Ende} / \Delta T_{Anfang}$

Auch für die Varianten mit Sprührohr wird im Anhang C eine Abschätzung der energetischen Auswirkungen gegeben. Sie ist ebenfalls vorsichtig zu interpretieren, da keine vollständigen Be- und Entladezyklen simuliert wurden.

4.2 Vergleich Einlauf oben / unten

Die Abbildung 21 zeigt die Temperaturverläufe im Speicher der beiden Simulationen mit Einlauf oben (oLB2000o) und Einlauf unten (oLB2000u). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturverläufe nahezu perfekt bei 47.5 °C (halbes Temperaturniveau) gespiegelt sind. Dies scheint zu bestätigen, dass das Strömungsverhalten bei warmem Einlauf in kalten Speicher von oben ähnlich ist wie bei kaltem Einlauf in warmen Speicher von unten, wenn der Temperaturunterschied und das Temperaturniveau dieselben sind⁴. Dies ist auch in den Strömungs- und Temperaturbildern in Tabelle 6 zu erkennen. Somit kann vom einen Fall auf den anderen geschlossen werden und es müssen nicht beide simuliert werden. Die weiteren Simulationen mit Bogenrohr werden daher nur noch mit warmem Einlauf oben simuliert.

Ausserdem zeigen die Bilder in Tabelle 6, dass die Strömung rechts und links symmetrisch ist. Deshalb werden in der Folge die Simulationen mit Lochblech nur mit halbem Speicher und einer vertikalen Symmetrieebene durchgeführt um den Rechenaufwand zu reduzieren.

⁴ Diese Schlussfolgerung ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen. Auf Grund der in Strömungssimulationen oft – und auch hier – getroffenen Vereinfachung, dass die Volumenausdehnung auf Grund von Temperaturänderungen nicht simuliert wird, und nur die Auftriebskräfte auf Grund des Dichtegradienten bei einer gewählten Referenztemperatur berücksichtigt werden (Boussinesq-Approximation), könnten grössere Unterschiede als die hier dargestellten resultieren, wenn anstatt der gewählten Referenztemperatur (hier 47.5 °C) der Dichtegradient zwischen allen Volumenelementen einzeln berücksichtigt würde. Da sich der Dichtegradient von Wasser jedoch im Temperaturbereich von 45 – 50 °C nur um 6% ändert, kann angenommen werden, dass die sich daraus ergebenden eventuellen Unterschiede im dargestellten Fall sehr gering sind. Es kann jedoch daraus NICHT geschlossen werden, dass die Einströmung von 90 °C heissem Wasser in den Deckel eines 70 °C heissen Speichers symmetrisch ablaufen würde zu einer Einströmung von 10 °C kaltem Wasser in den Boden eines 30 °C warmen Speichers.

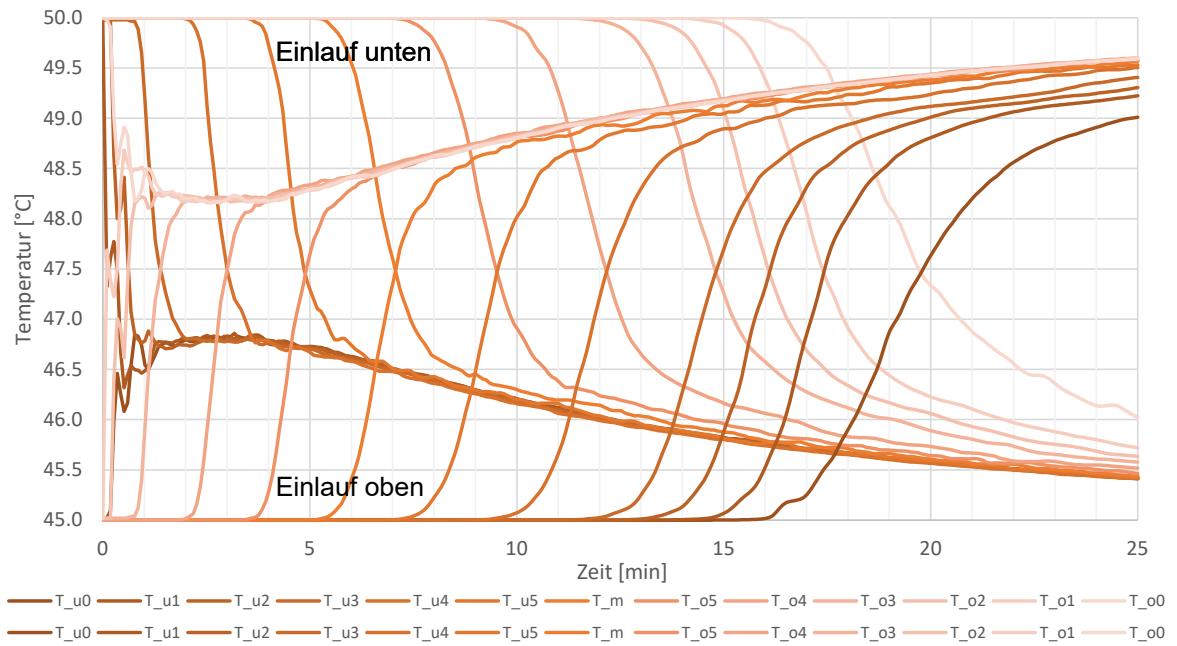
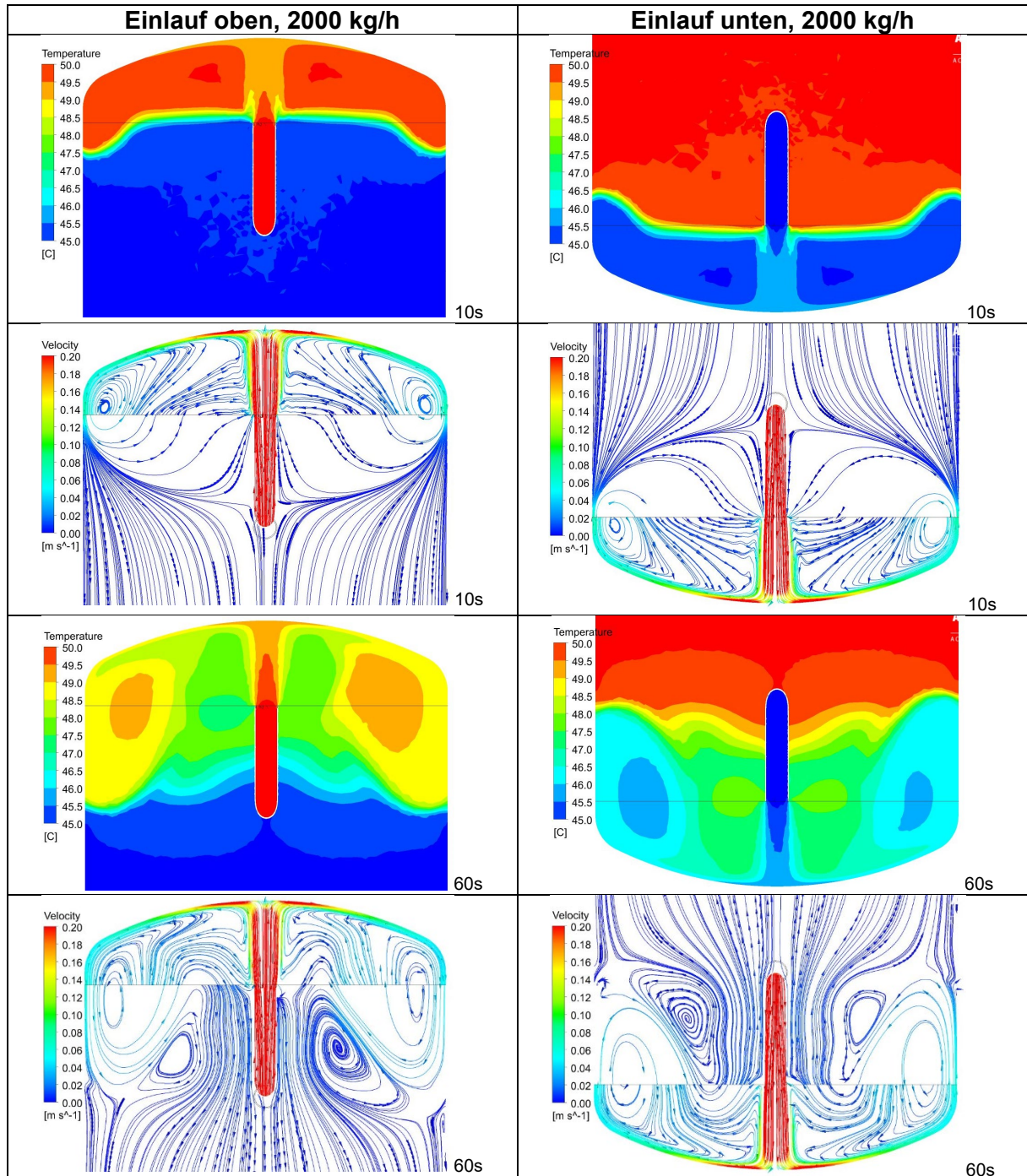


Abbildung 21: Vergleich der Simulationen mit warmem Einlauf oben gegenüber kaltem Einlauf unten.



Tabelle 6: Vergleich von warmem Einlauf oben und kaltem Einlauf unten 10 und 60 Sekunden nach Start der Strömung.



4.3 Resultate Bogenrohr

Die Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Temperaturverläufe der Simulation ohne und mit Lochblech bei einem Durchfluss von 1500 kg/h und 50 °C warmem Einlauf oben. Die Ausdehnung der Thermokline ist ohne Lochblech viel grösser (flachere S-Kurven) als mit Lochblech. Ausserdem bewegt sich die Thermokline mit Lochblech langsamer und hat das



untere Ende des Speichers ca. 4 Minuten später erreicht als bei der Simulation ohne Lochblech. Die Temperaturen oben im Speicher sinken ohne Lochblech anfänglich um etwa 1.3 K auf ca. 48.7 °C ab. Dies liegt daran, dass sich das einströmende 50-gradige Wasser entlang der Speicherwand bewegt und eine Strömungswalze bildet. Dabei durchmischt es sich mit dem kälteren Wasser unterhalb der Thermokline. Dies ist in den Temperatur- und Strömungsbildern in Tabelle 7 genauer zu beobachten. Später steigt die Temperatur wieder an, da sich die Thermokline und somit das kältere Wasser nach unten verschiebt. Durch das Lochblech wird die Strömungswalze daran gehindert sich bis in den kälteren Bereich unten auszudehnen. Es findet kaum Durchmischung statt und es entsteht eine weitgehend homogene Kolbenströmung unterhalb des Lochblechs. Dadurch bleibt die Temperatur oben im Speicher bei nahezu 50°C.

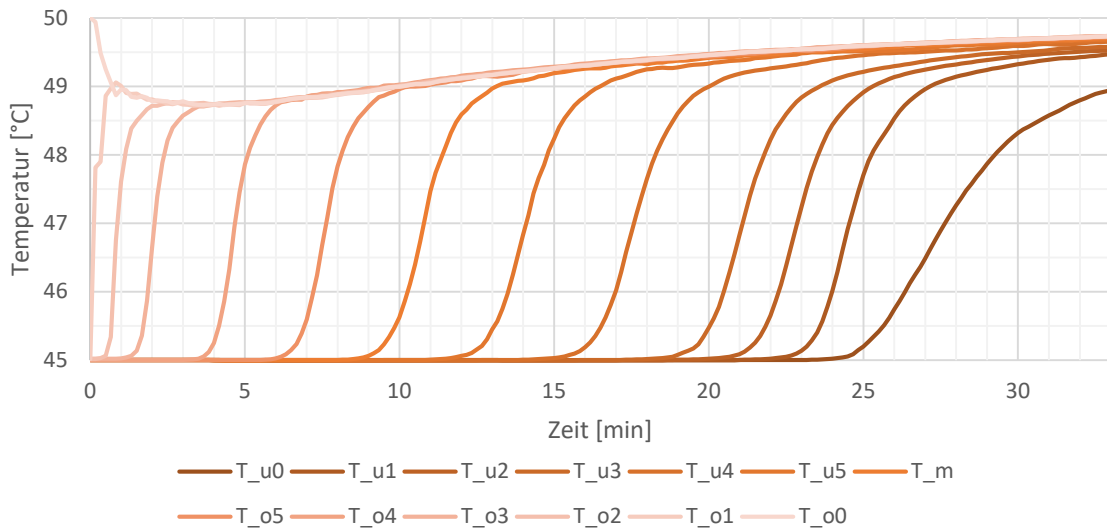


Abbildung 22: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr ohne Lochblech, 1500 kg/h (oLB1500o).

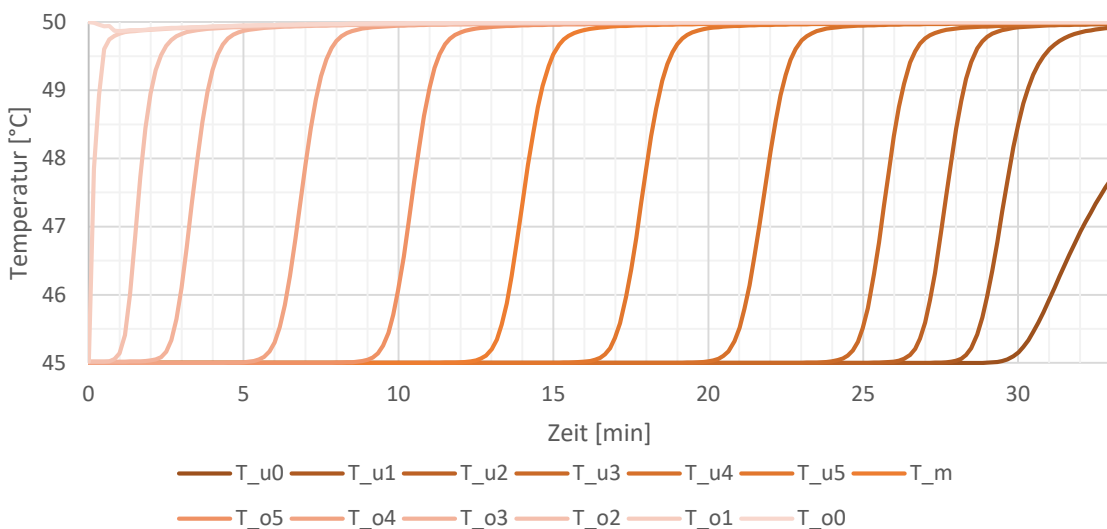


Abbildung 23: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr mit Lochblech, 1500 kg/h (mLB1500o).



Mit höherem Durchfluss nimmt der Unterschied zwischen Lochblech und keinem Lochblech zu. Die Temperaturverläufe für Durchflussraten von 2000, 2500 und 3000 kg/h sind in Abbildung 24 bis Abbildung 29 dargestellt. Die Ausdehnung der Thermokline (Breite der S-Kurve) vergrößert sich bei steigendem Durchfluss ohne Lochblech, während sie sich mit Lochblech kaum verändert. Auch die Durchmischungseffekte sind ohne Lochblech zunehmen stärker, dargestellt in den Temperatur- und Strömungsbildern in Tabelle 8 bis Tabelle 10. Die Temperatur oben im Speicher sinkt dadurch ohne Lochblech anfänglich um bis zu 2.5 K bei 3000 kg/h. Mit Lochblech sinkt sie in diesem Fall um lediglich 0.37 K.

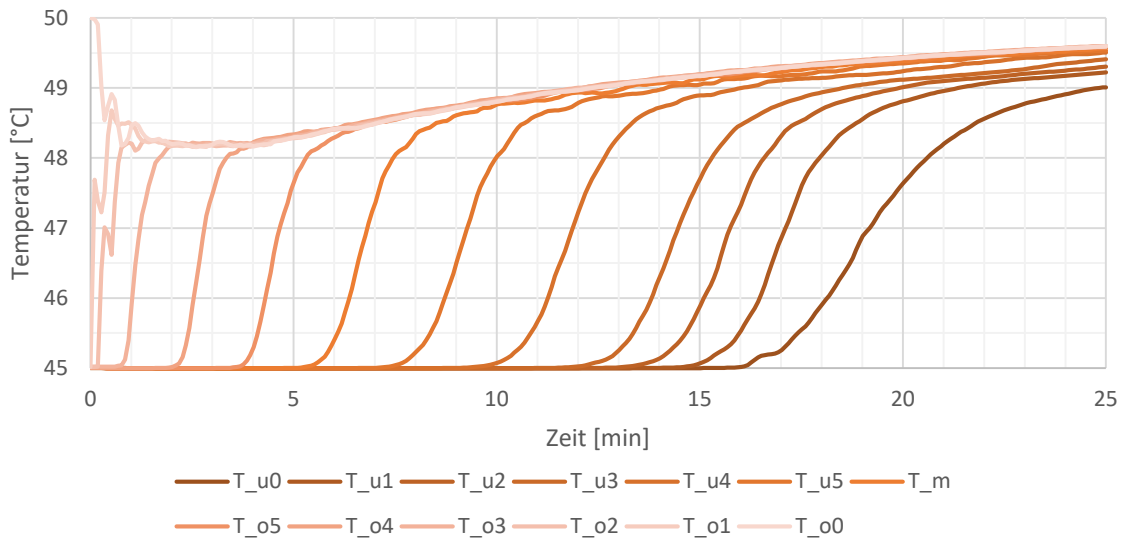


Abbildung 24: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr ohne Lochblech, 2000 kg/h (oLB2000o).

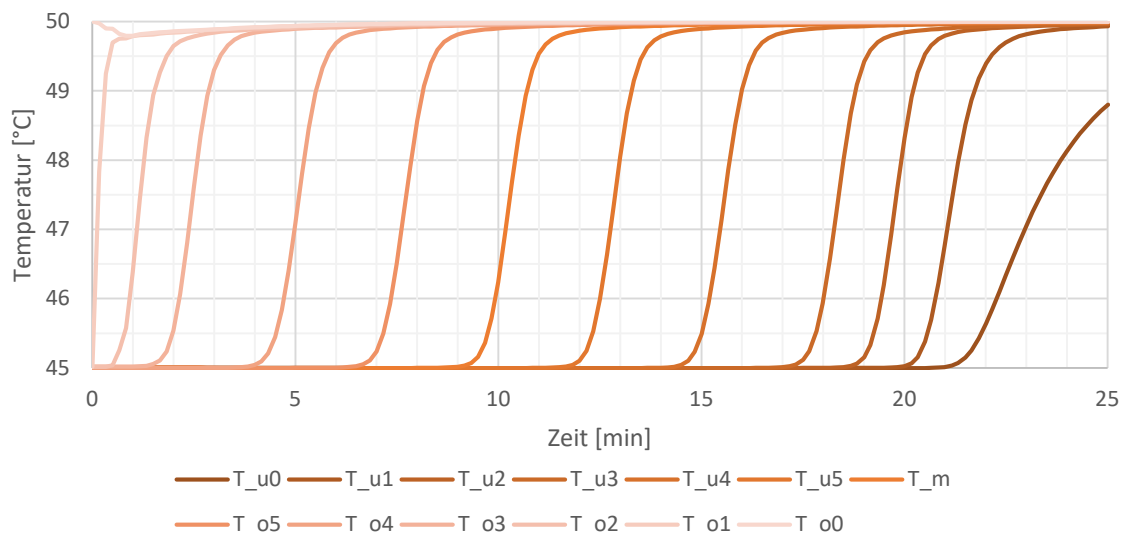


Abbildung 25: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr mit Lochblech, 2000 kg/h (mLB2000o).

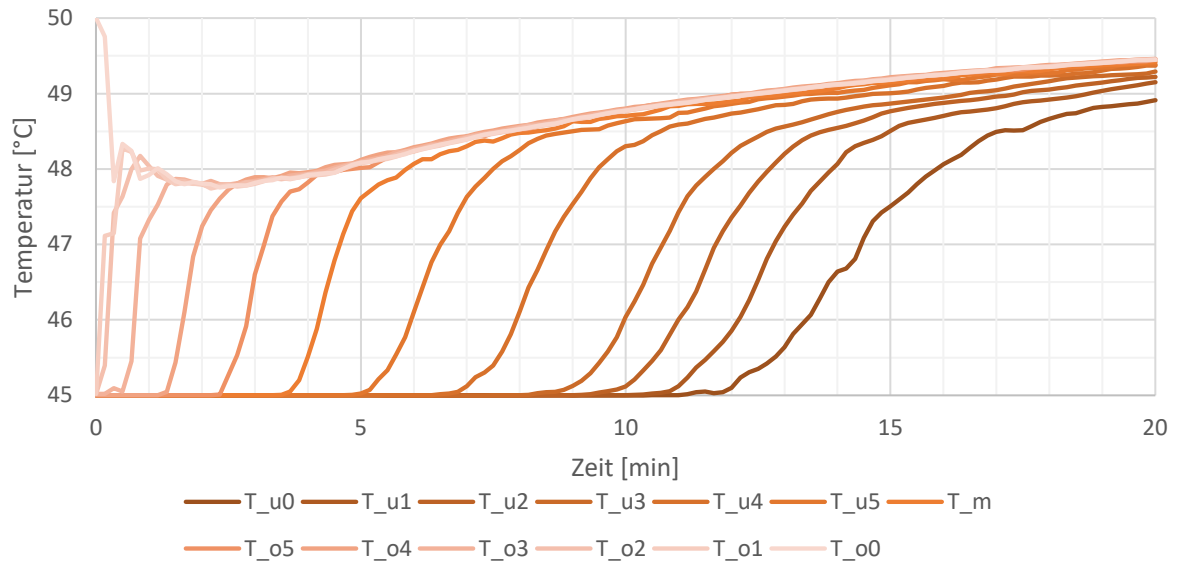


Abbildung 26: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr ohne Lochblech, 2500 kg/h (oLB2500o).

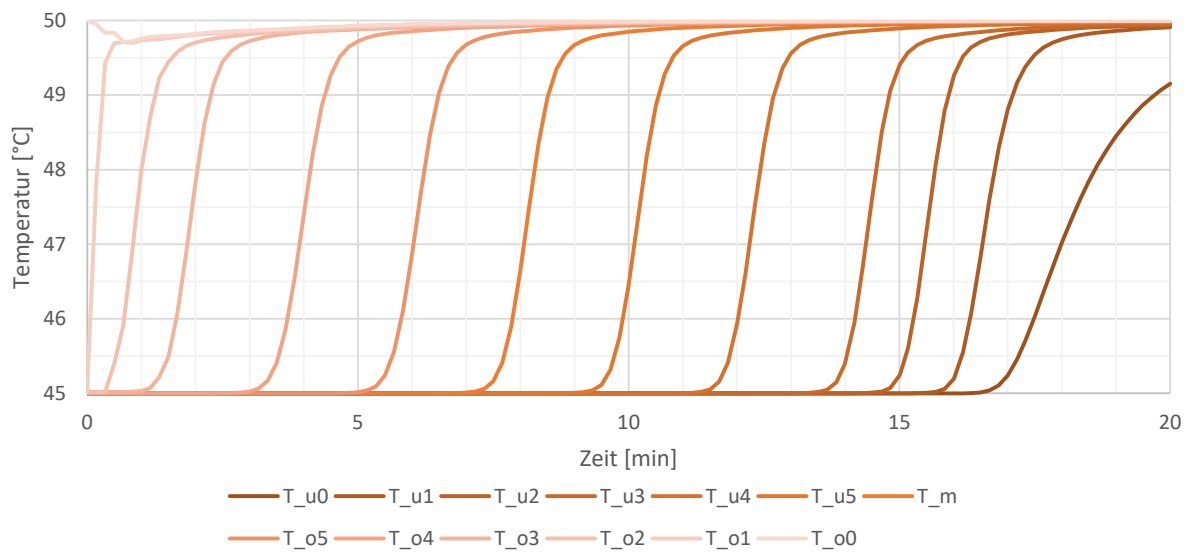


Abbildung 27: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr mit Lochblech, 2500 kg/h (mLB2500o).

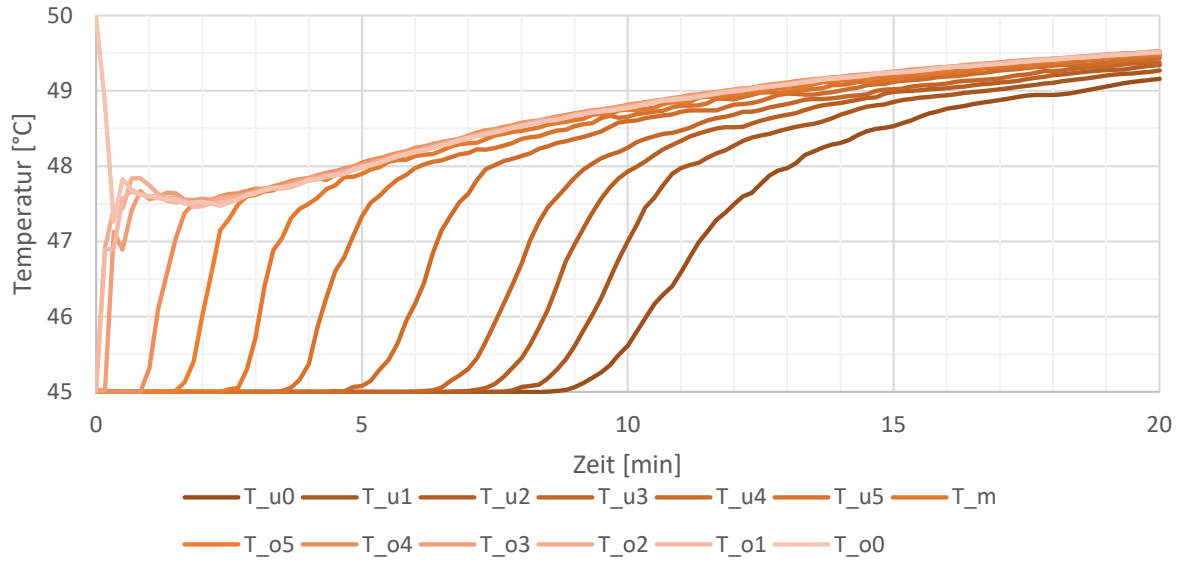


Abbildung 28: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr ohne Lochblech, 3000 kg/h (oLB3000o).

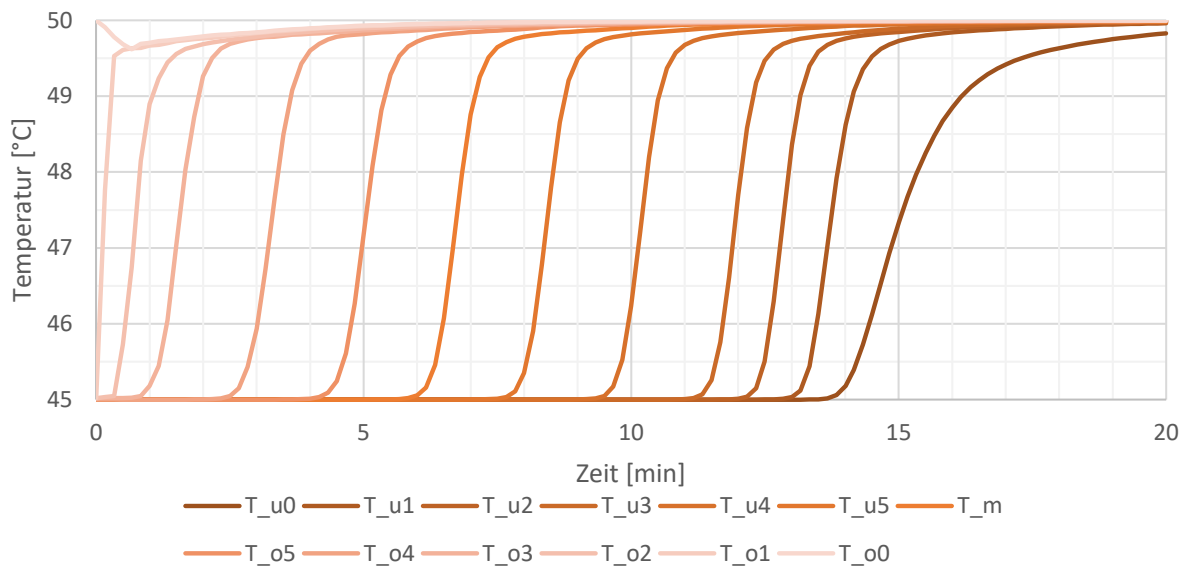
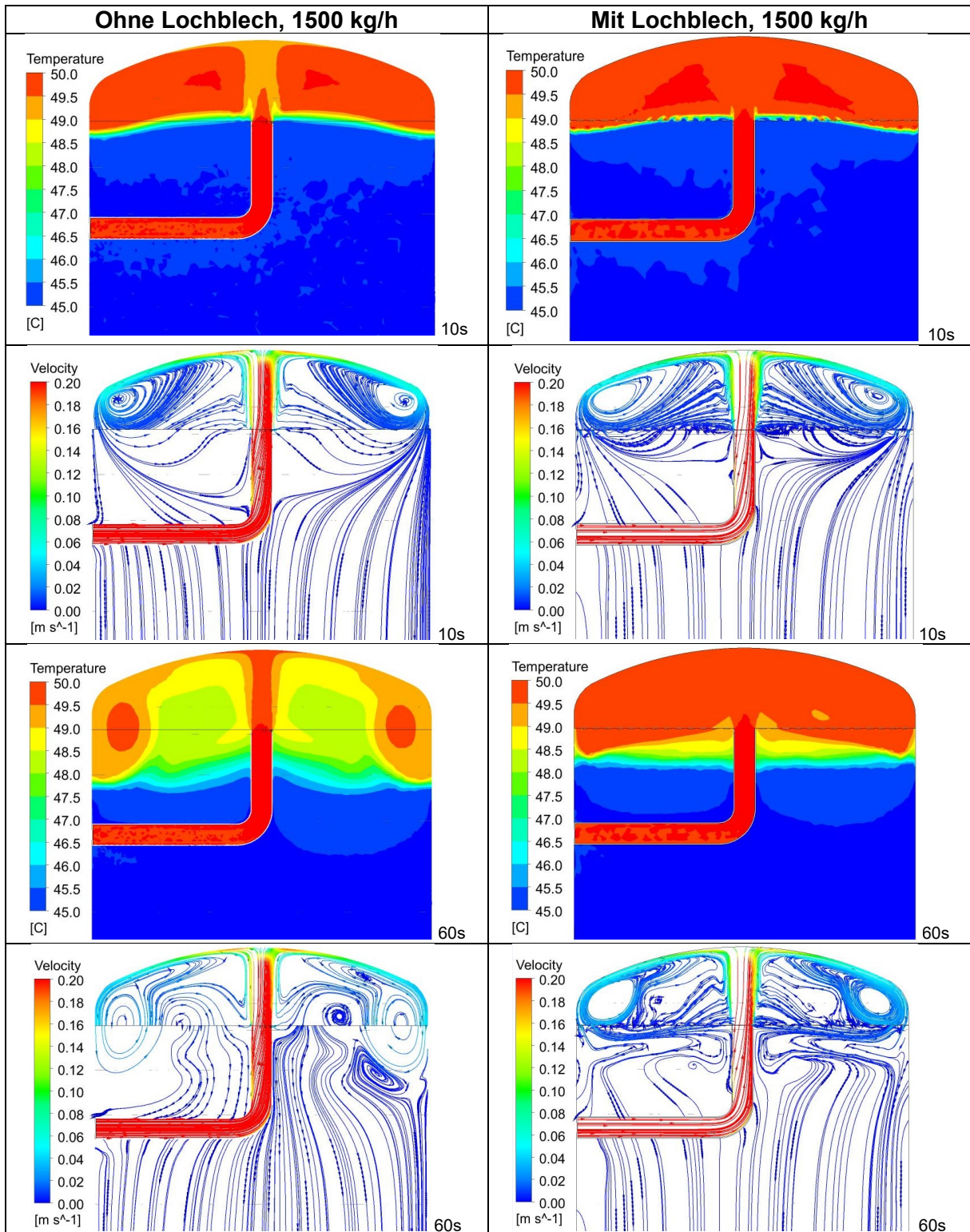


Abbildung 29: Simulierte Temperaturen der Konfiguration Bogenrohr mit Lochblech, 3000 kg/h (mLB3000o).



Tabelle 7: Temperatur- und Strömungsbilder bei 1500 kg/h, 10, 60 und 240 Sekunden nach Beginn des Zuflusses. Links ohne und rechts mit Lochblech.



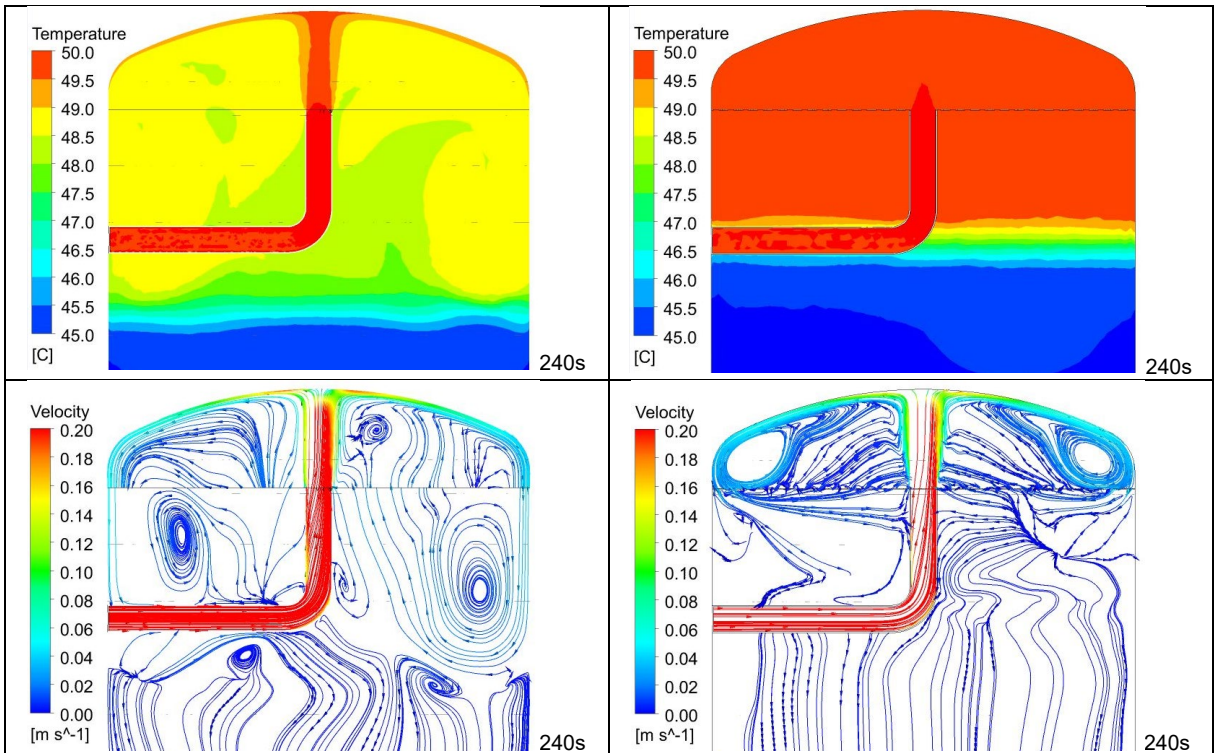
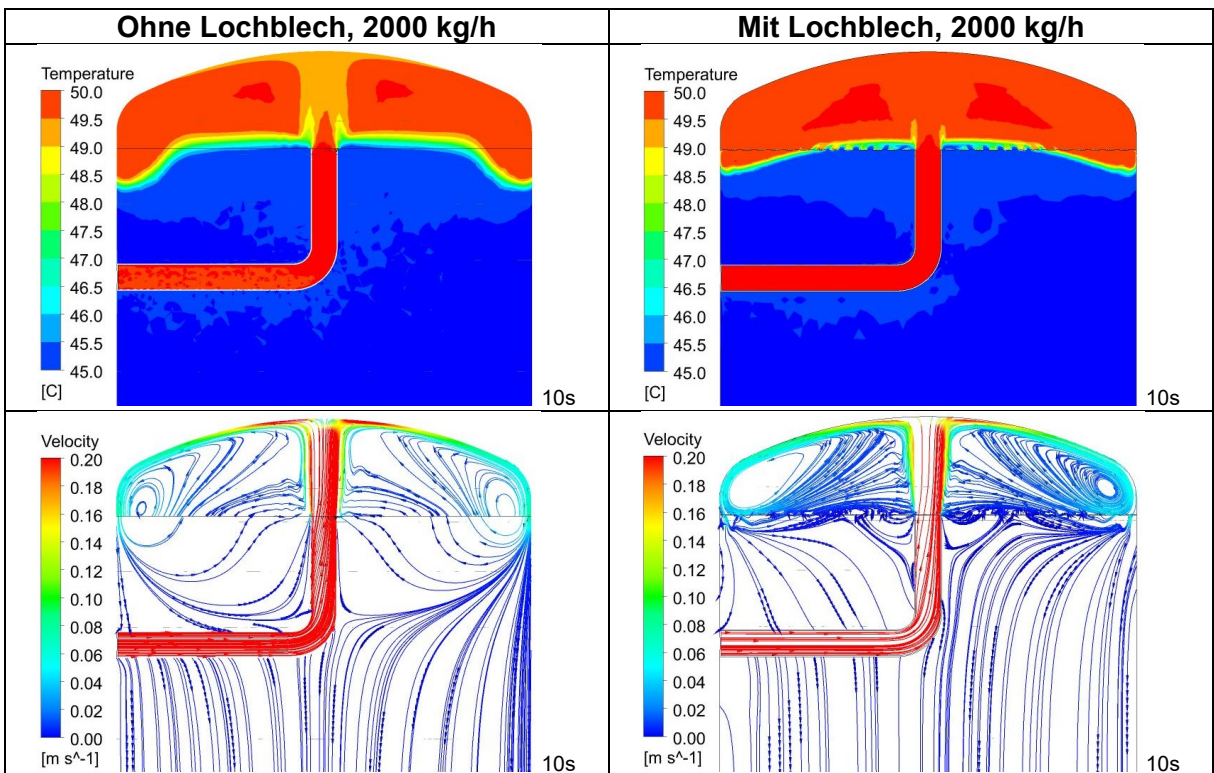


Tabelle 8: Temperatur- und Strömungsbilder bei 2000 kg/h, 10, 60 und 240 Sekunden nach Beginn des Zuflusses. Links ohne und rechts mit Lochblech.



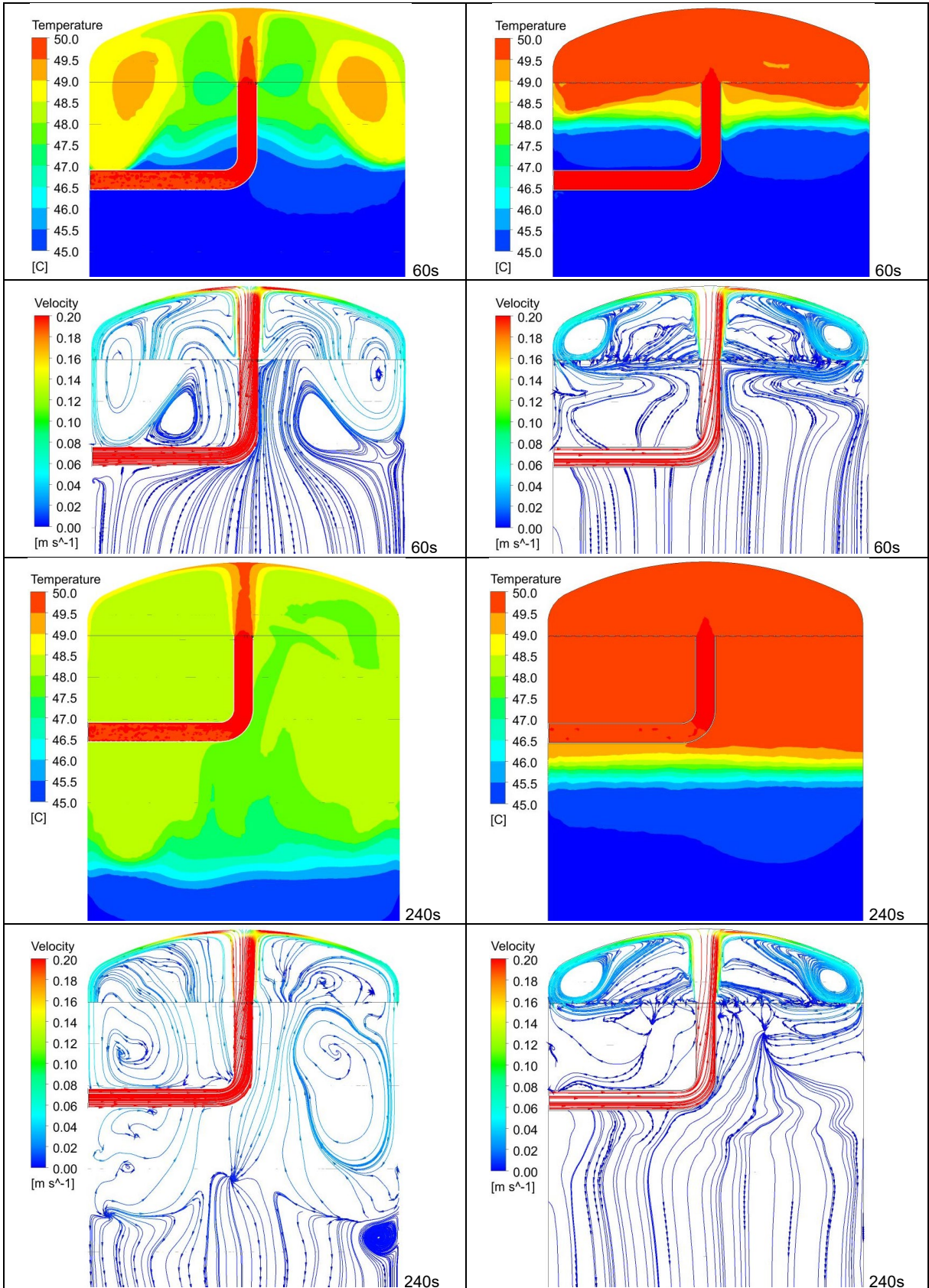
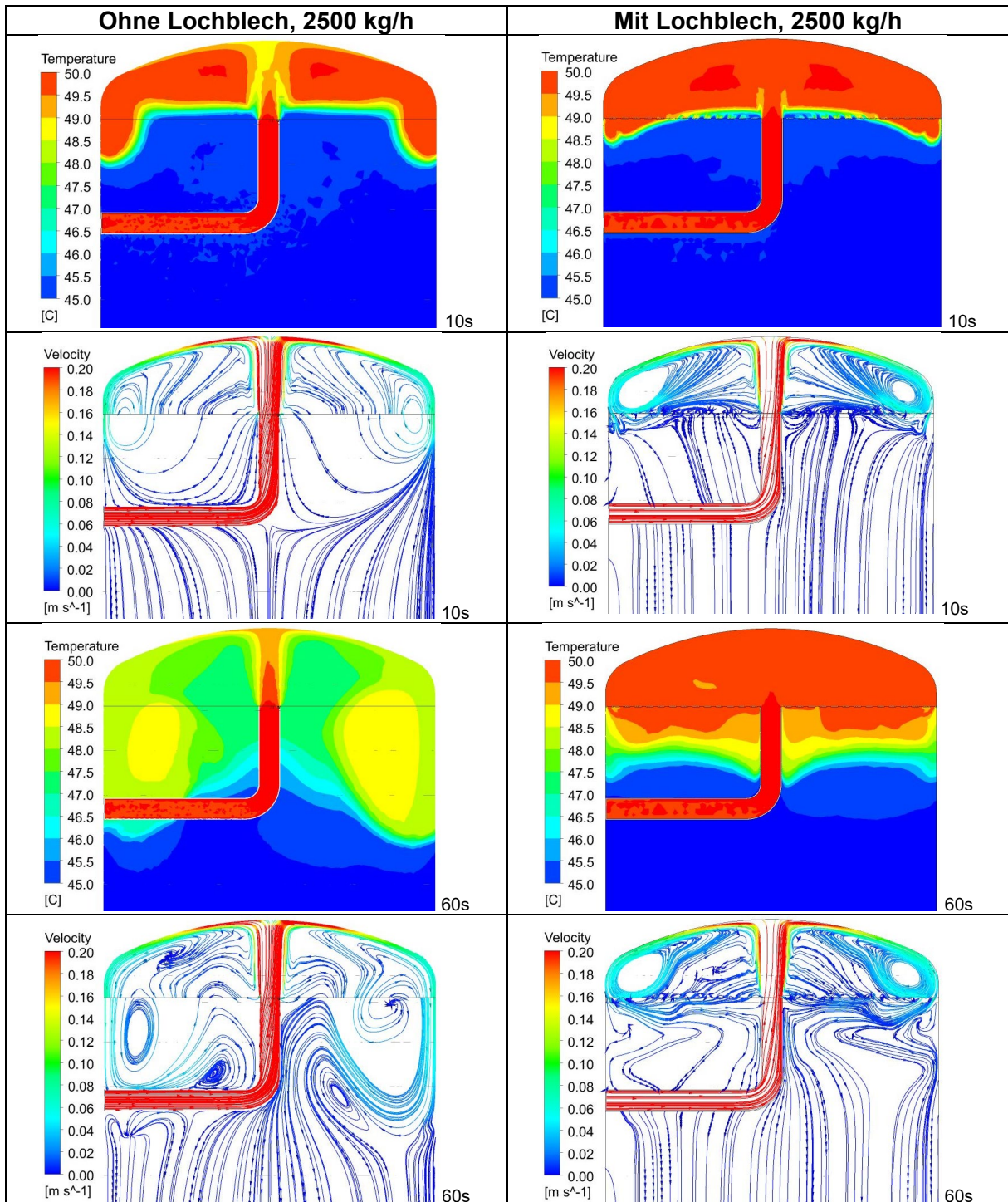




Tabelle 9: Temperatur- und Strömungsbilder bei 2500 kg/h, 10, 60 und 240 Sekunden nach Beginn des Zuflusses. Links ohne und rechts mit Lochblech.



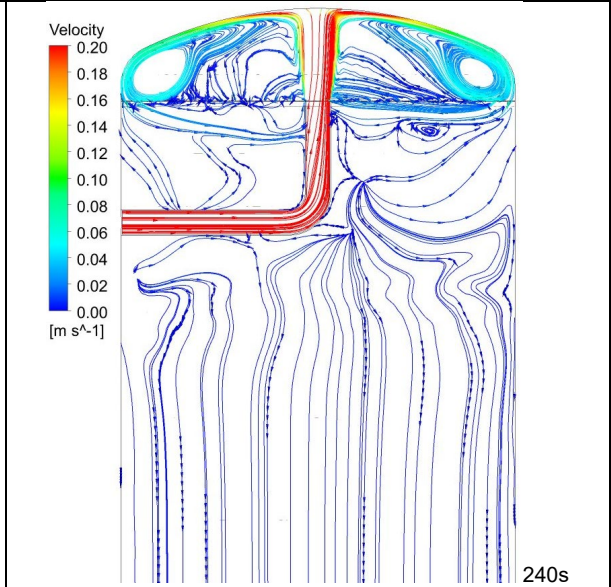
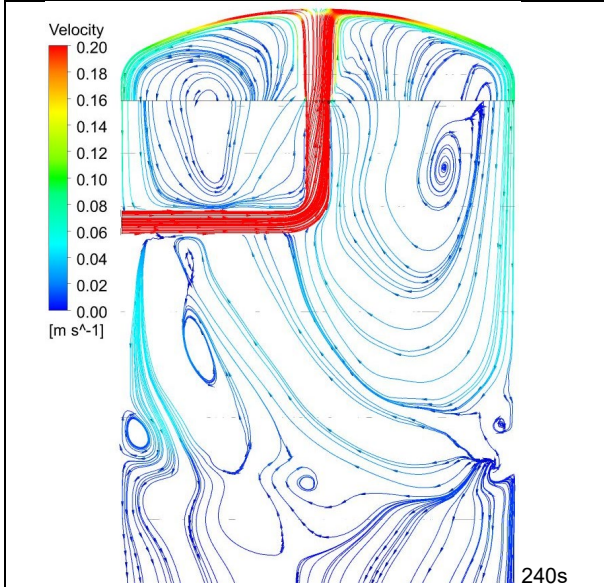
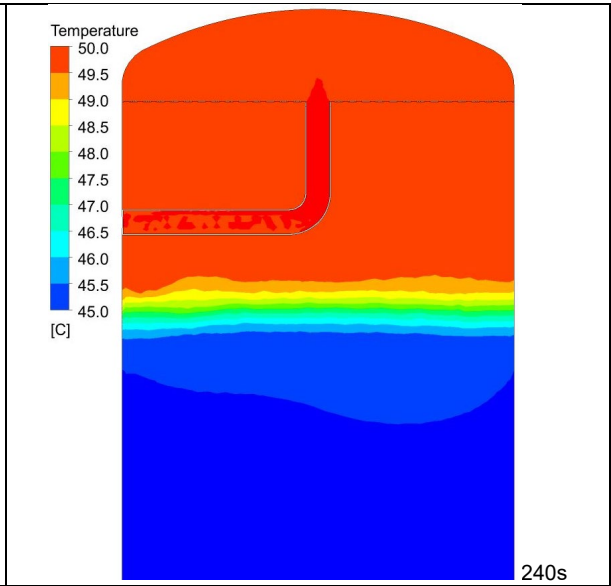
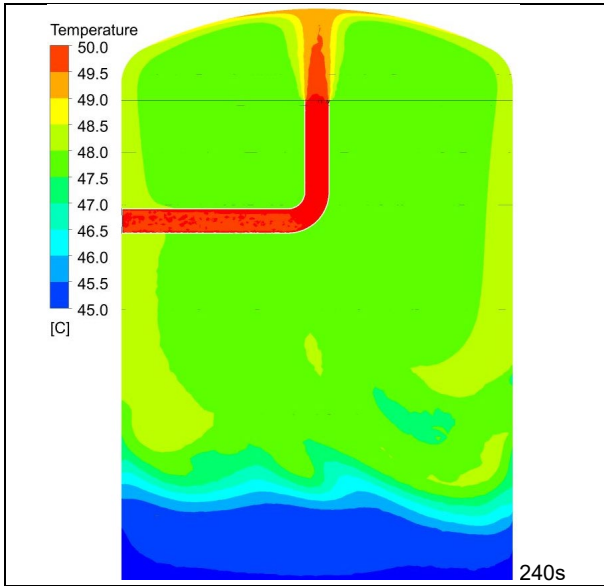
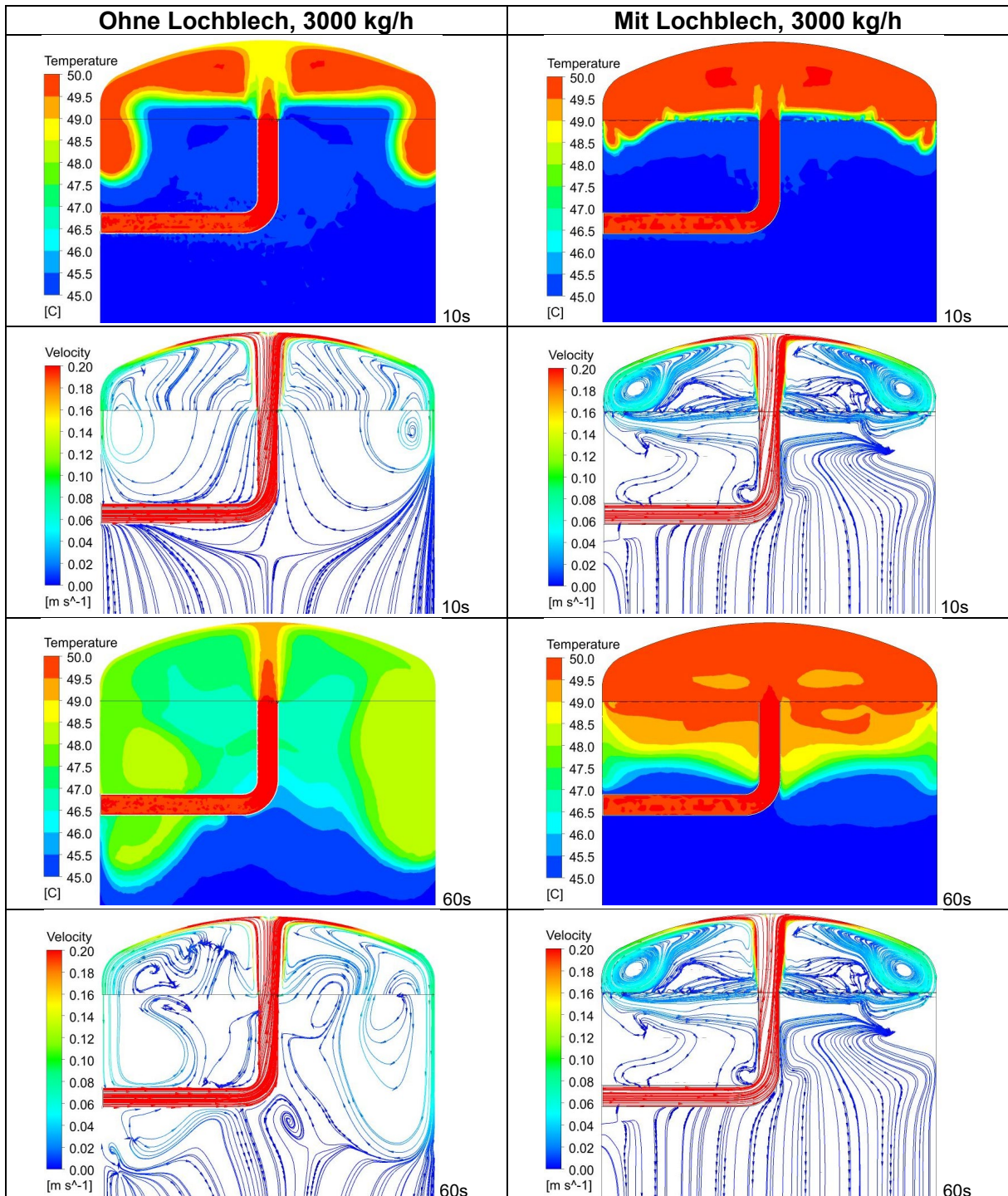
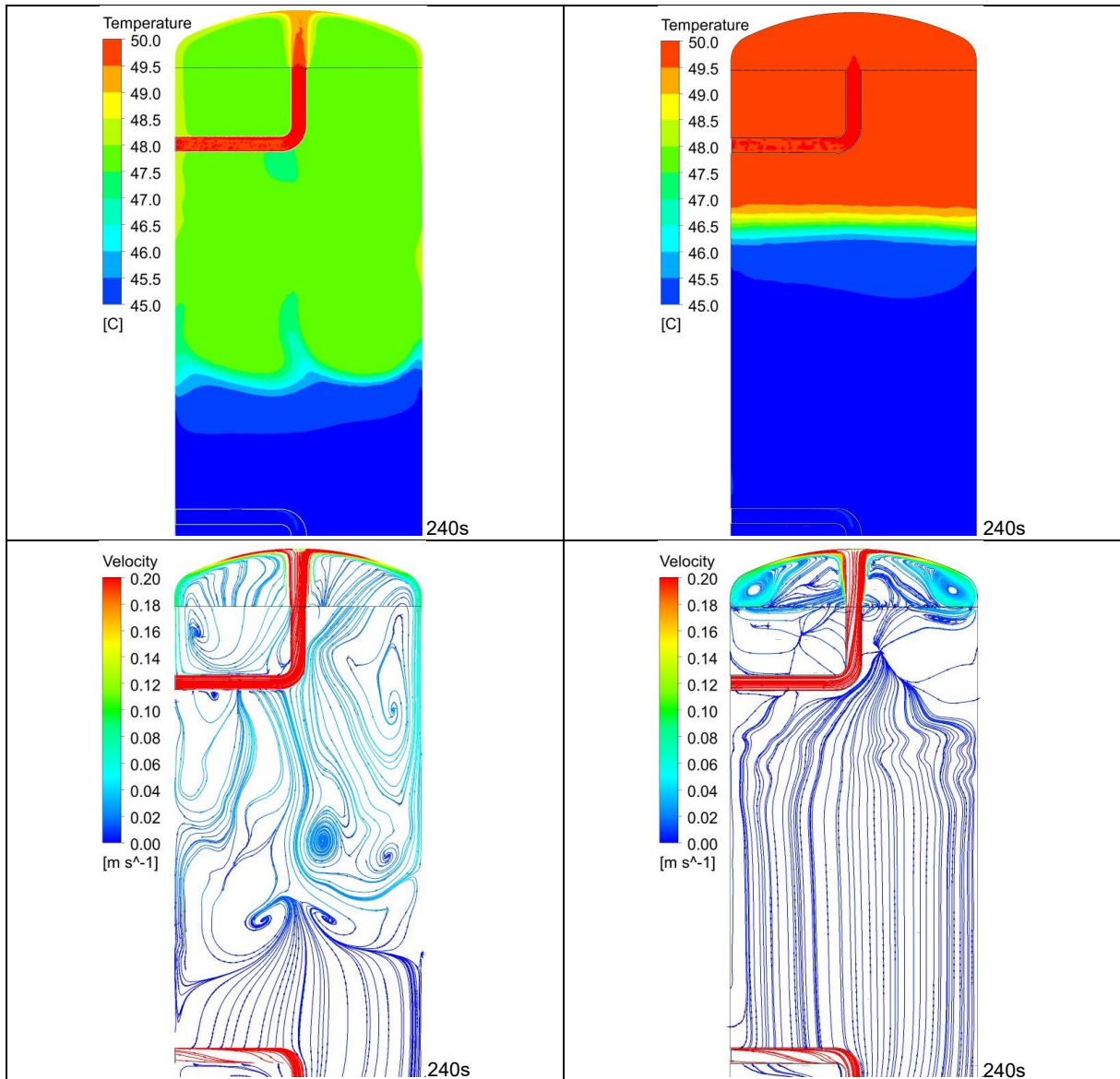




Tabelle 10: Temperatur- und Strömungsbilder bei 3000 kg/h, 10, 60 und 240 Sekunden nach Beginn des Zuflusses. Links ohne und rechts mit Lochblech.





Mit einem Durchfluss von 2000 kg/h wurden zusätzlich die Konfigurationen oLB2000o_2 und mLB2000o_2 simuliert. Dabei ist die Eintrittstemperatur nicht konstant bei 50 °C, wie bei den bis anhin besprochenen Fällen, sondern immer 5 K wärmer als die Austrittstemperatur. Sobald die Thermokline also den Austritt erreicht, erhöht sich die Eintrittstemperatur. Es wurde so lange simuliert, bis die Thermokline theoretisch zweimal durch den Speicher gewandert ist. In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die Temperaturverläufe dieser Simulationen einmal ohne und einmal mit Lochblech dargestellt. Mit dem Lochblech ist eine neue Thermokline beim zweiten Durchgang durch den Speicher noch deutlich zu erkennen, wenn auch nicht mehr so scharf wie beim ersten Durchgang. Die Temperatur im oberen Bereich bleibt bei 50 °C und erhöht sich beim zweiten Durchlauf auf fast 55 °C. Ohne Lochblech ist beim zweiten Durchlauf bereits keine Thermokline mehr zu erkennen, es besteht nur noch ein Temperaturgradient durch die Höhe des Speichers.

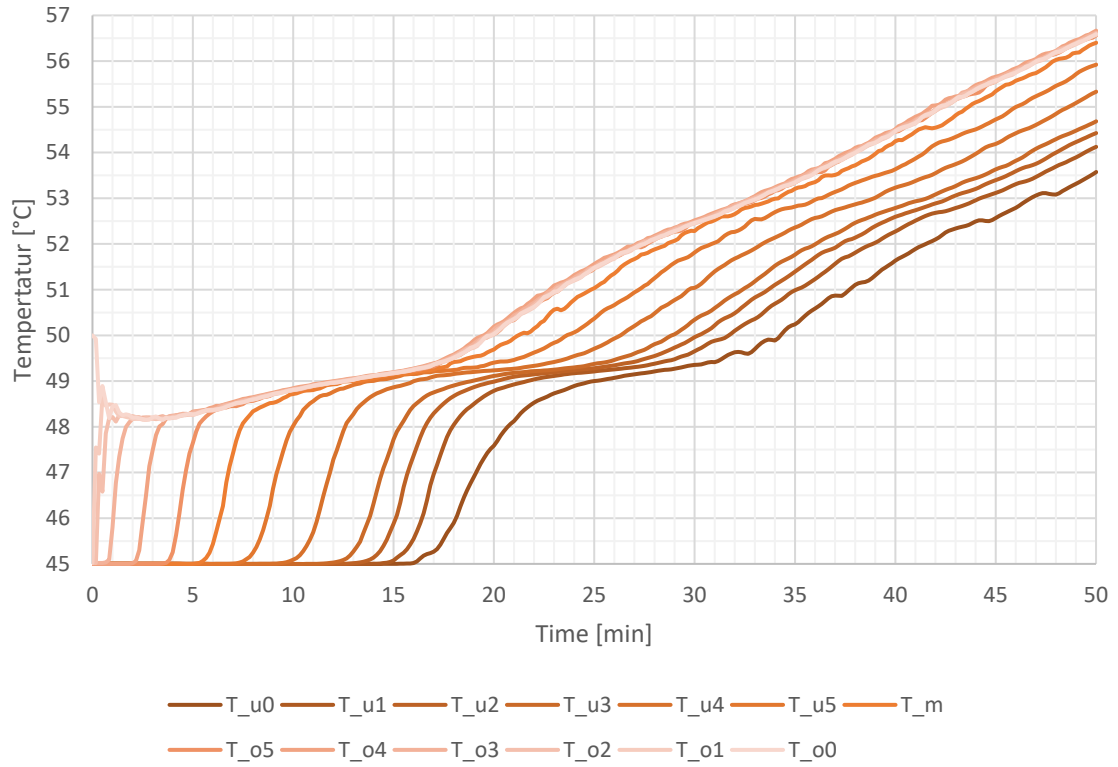


Abbildung 30: Bogenrohr ohne Lochblech, 2000 kg/h mit Delta-T von 5 K zwischen Ein- und Austritt (oLB2000o_2).

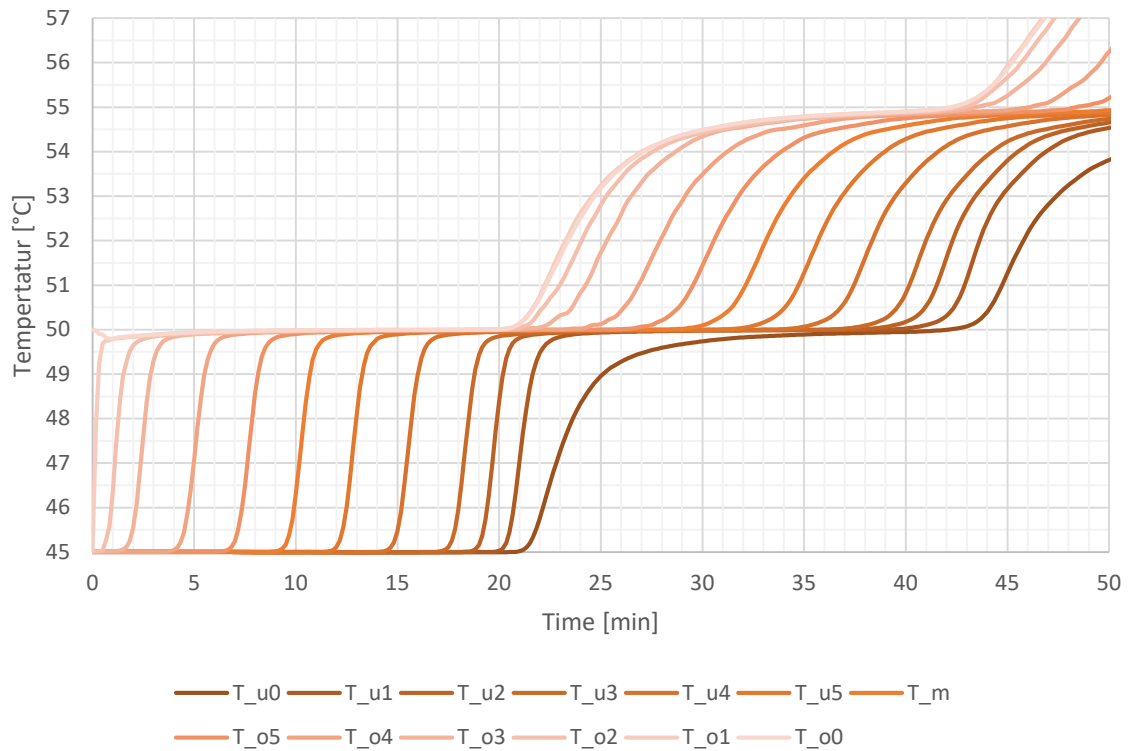


Abbildung 31: Bogenrohr mit Lochblech, 2000 kg/h mit Delta-T von 5 K zwischen Ein- und Austritt (mLB2000o_2).



4.4 Resultate Sprührohr

Abbildung 32 zeigt die Temperaturverläufe der Referenzsimulation ohne Sprührohr. Die Temperaturen der Simulationen mit Sprührohr sind in Abbildung 33 bis Abbildung 35 dargestellt. Die Temperaturkurven zeigen, wie stark die Schichtung oberhalb des Einlaufs gestört wird. Die Schicht bei T_{o45} , 45 cm oberhalb des Sprührohrs, wird bei SR_10_22 erst nach 30 min langsam von der Durchmischung erreicht. Dies zeigt also eine Verbesserung des Schichtungsverhaltens verglichen mit der Referenz ohne Sprührohr, wo diese Schicht bereits nach ca. 10 Minuten gestört wird. Bei SR_10_9 und SR_15_8 reicht die Störung nach 30 Minuten bis über 60 cm über dem Sprührohr (T_{o60}), sogar etwas höher als bei der Referenz. Diese Varianten sind also ähnlich oder gar schlechter schichtend als die Referenz mit einem einfachen Loch in der Wand.

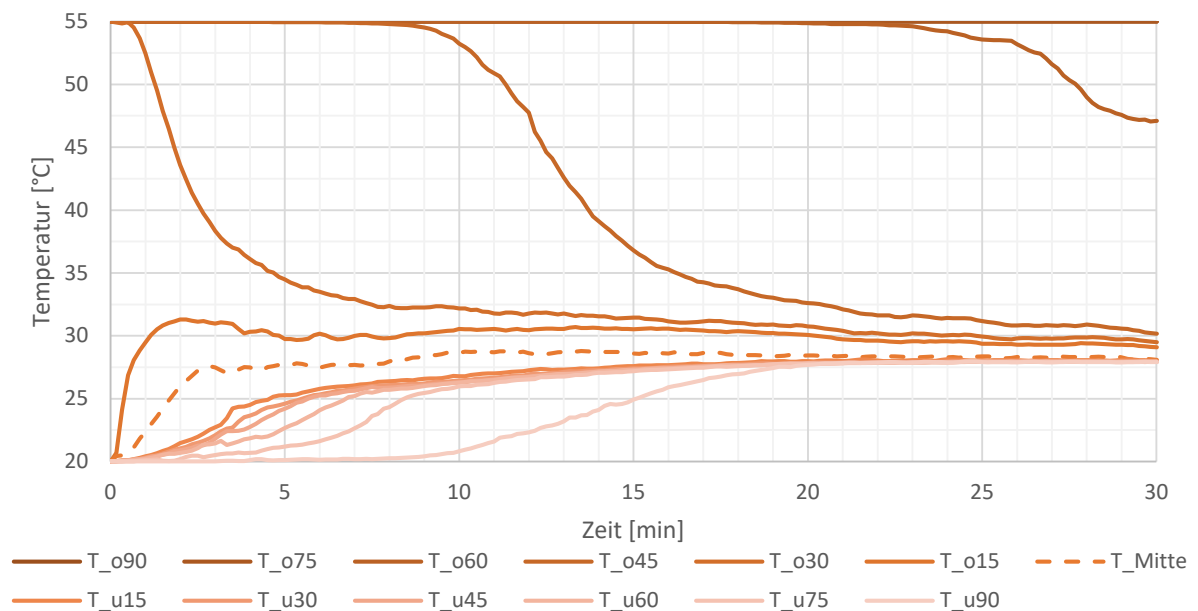


Abbildung 32: Einströmung über Loch in der Wand: Temperaturverlauf im simulierten Speicher ohne Sprührohr, Durchfluss 2000 kg/h.

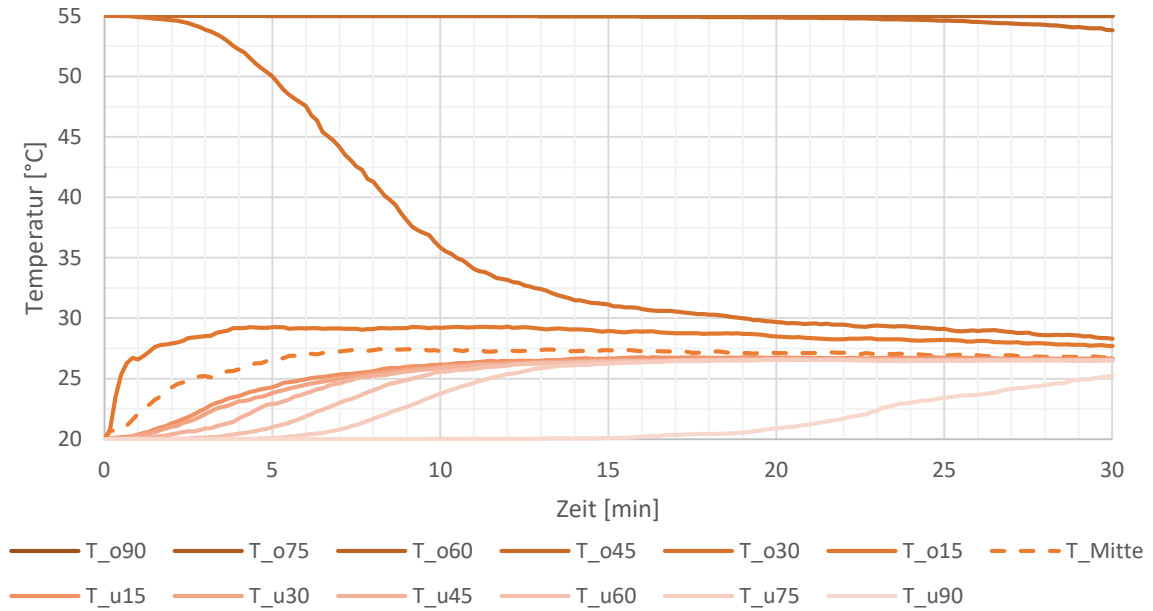


Abbildung 33: SR_10_22: Temperaturverlauf im simulierten Speicher mit Sprührohr: 2x 10 Löcher, \varnothing 22.5 mm, Durchfluss 2000 kg/h.

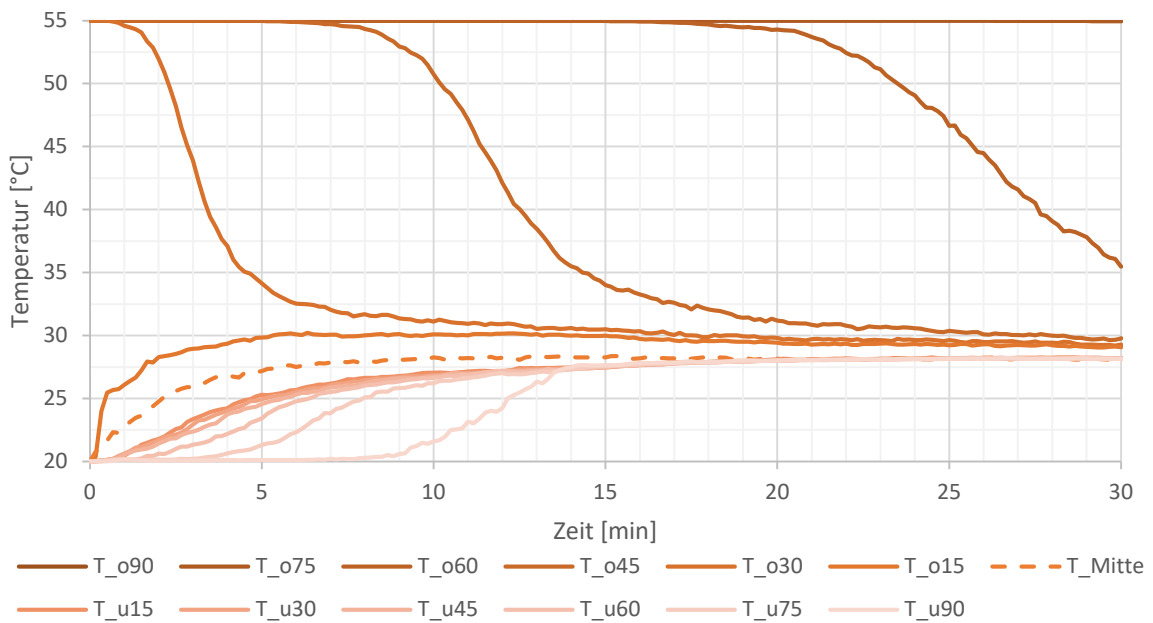


Abbildung 34: SR_10_9: Temperaturverlauf im simulierten Speicher mit Sprührohr: 2x 10 Löcher, \varnothing 9.5 mm, Durchfluss 2000 kg/h.

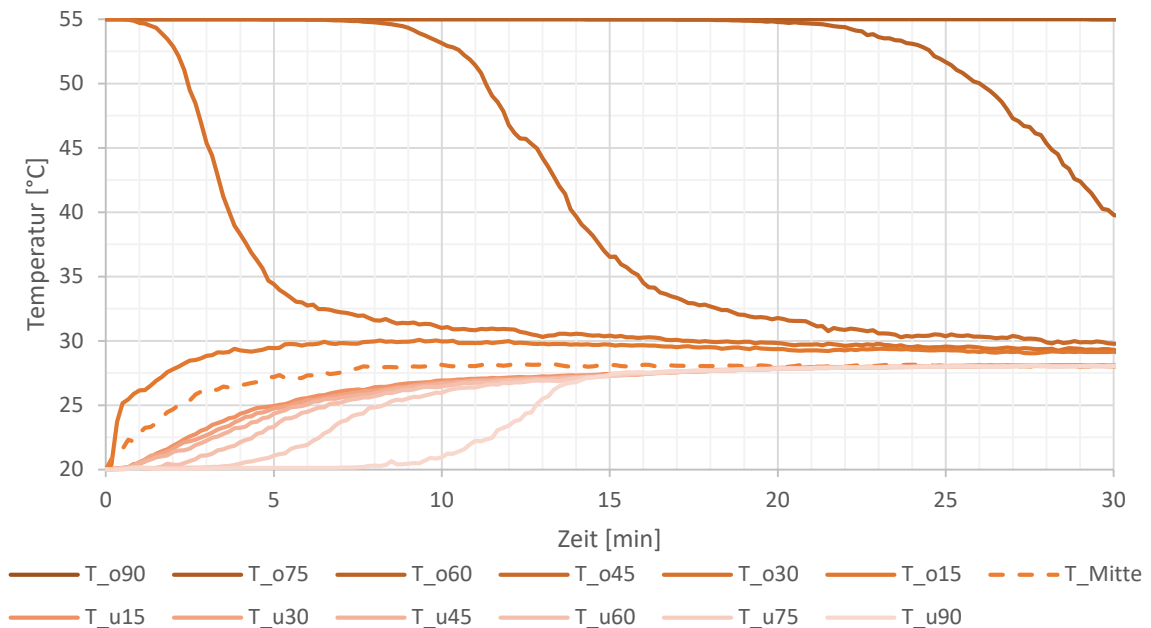


Abbildung 35: SR_15_8: Temperaturverlauf im simulierten Speicher mit Sprührohr: 2x 15 Löcher, \varnothing 8 mm, Durchfluss 2000 kg/h.

Anhand der Strömungsbilder in Abbildung 36 und Abbildung 37 lässt sich die Ursache für die oben beschriebenen Effekte erklären. Bei SR_10_22 ist die Strömung sehr ungleichmässig über die Löcher verteilt und nach vorne gerichtet (Abbildung 36). Sie ist aber leicht gebremst, wenn sie auf die Speicherwand trifft und verteilt sich eher horizontal, während sie sich bei der Referenz ohne Sprührohr beim Aufprall auf die Wand in alle Richtungen (horizontal und vertikal) gleichmässig ausbreitet (siehe Abbildung 37, oben). Bei SR_10_9 und SR_15_8 wird durch die kleinen Löcher eine homogene Verteilung der Strömung über alle Löcher erreicht. Dadurch werden aber die Austrittsgeschwindigkeiten grösser. So entsteht eine Strömungsebene die sich horizontal bis zur Speicherwand ausbreitet. Weil die Strömung eine horizontale Ebene bildet, kann sie sich nur in die Vertikale ausbreiten, wenn sie auf die Wand trifft (siehe Abbildung 37). Das führt zu mehr Durchmischung und Störung der Speicherschichtung. Die Variante SR_15_8 mit mehr Löchern scheint noch etwas besser zu funktionieren, der Unterschied zu SR_10_9 ist aber marginal.

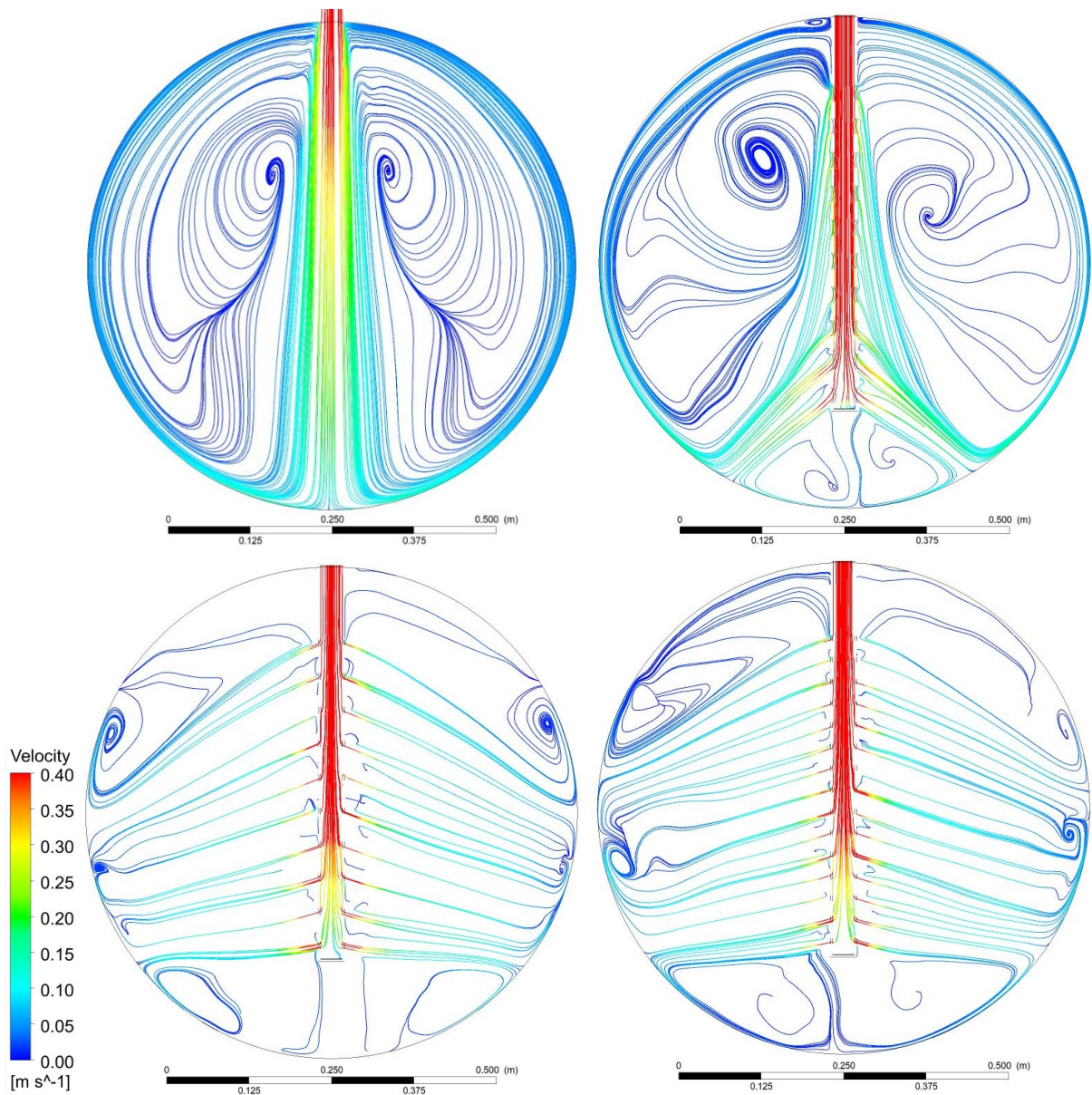


Abbildung 36: Strömung in horizontaler Schnittebene mit und ohne Sprührohr. Referenz ohne Sprührohr (oben links). Drei verschiedene Sprührohre: 2x 10 Löcher, \varnothing 22.5 mm (oben rechts); 2x 10 Löcher, \varnothing 9.5 mm (unten links); 2x 15 Löcher, \varnothing 8 mm (unten rechts).

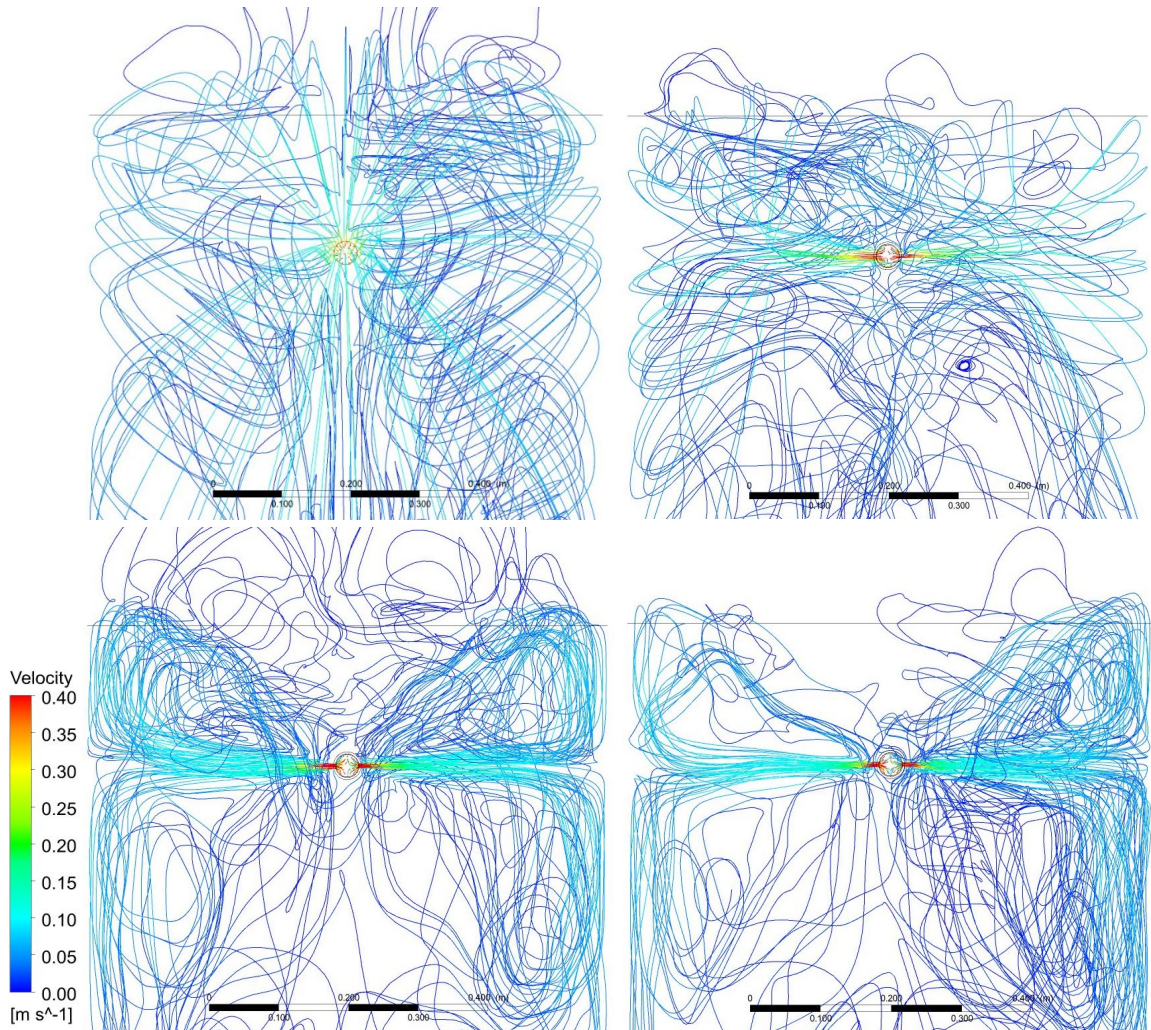


Abbildung 37: 3D-Strömungsbilder von vorne (Verlängerung des Sprührohrs). Referenz ohne Sprührohr (oben links). Drei verschiedene Sprührohre: 2x 10 Löcher, \varnothing 22.5 mm (oben rechts); 2x 10 Löcher, \varnothing 9.5 mm (unten links); 2x 15 Löcher, \varnothing 8 mm (unten rechts).



4.5 Kennzahlen zum Vergleich der Varianten

Die Kennzahl ΔT_{drop} ist in Tabelle 11 und Abbildung 38 dargestellt. Sie dient dem Vergleich der simulierten Varianten mit Bogenrohr mit und ohne Lochblech. Je tiefer die Kennzahl, desto weniger wird der Speicher durchmischt. Ein perfekt schichtender Speicher, hätte die Kennzahl $\Delta T_{\text{drop}} = 0$ K. Ohne Lochblech ist die Durchmischung deutlich höher als mit Lochblech. Mit kleinerem Durchfluss wird weniger durchmischt.

Tabelle 11: Kennzahlen zum Vergleich der Varianten mit Bogenrohr.

Variante	ΔT_{drop} [K]	Massenstrom [kg/h]
oLB3000o	2.50	3000
oLB2500o	2.20	2500
oLB2000o	1.80	2000
oLB1500o	1.25	1500
mLB3000o	0.37	3000
mLB2500o	0.30	2500
mLB2000o	0.20	2000
mLB1500o	0.13	1500
<i>Referenz perfekt schichtend</i>	<i>0.00</i>	<i>beliebig</i>

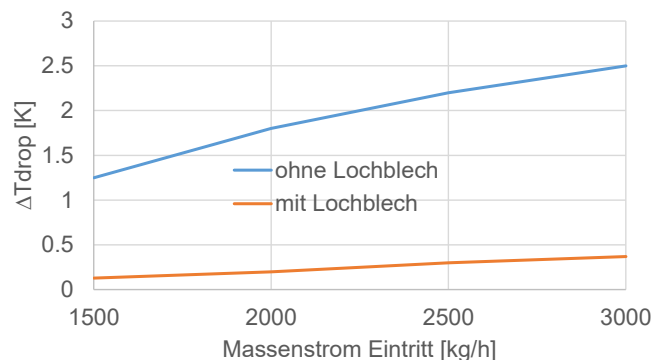


Abbildung 38: Abhängigkeit von ΔT_{drop} vom Massenstrom sowie vom Vorhandensein eines Lochblechs.

In der Tabelle 12 sind die Kennzahlen $t_{\Delta T-20\%}$ und $\eta_{\Delta T}$ dargestellt. Sie dienen dem Vergleich der simulierten Varianten mit bzw. ohne Sprührohr. Bei der Variante SR_10_22 mit 10 Löchern (\varnothing 22.5 mm) auf jeder Seite des Rohrs bleibt die Schichtung am besten erhalten. Die Temperatur im oberen Warmwasserbereich sinkt nach ca. 20 min um 20 %. Nach 30 Minuten behält der obere Bereich noch 75 % seiner anfänglichen Temperaturdifferenz zur Einlaufftemperatur. 25 % der Energie des Warmwasserbereichs wurden also in den unteren Bereich verschoben. Bei den anderen beiden Sprührohrvarianten sind es sogar knapp 50 % Wärmeumschichtung aus dem oberen Bereich. Dies ist sogar leicht mehr als bei der Variante ohne Sprührohr, wo



der Eintritt durch ein einfaches Loch in der Wand stattfindet. Abbildung 39 zeigt den Verlauf der mittleren Temperaturen im Warmwasserbereich oben im Speicher. Daraus können die Kennzahlen abgelesen werden. Insgesamt kann keine der Varianten mit Sprührohr überzeugen, denn bei allen Varianten sinkt die Temperatur oberhalb der Ursprungsposition der Thermokline bereits in den ersten 30 Minuten sehr stark ab.

Tabelle 12: Kennzahlen zum Vergleich der Varianten mit Sprührohr.

Variante	$t_{\Delta T-20\%}$ [min]	$T_{\text{avg,oben, 30min}}$ [°C]	$\Delta T_{\text{Ende, 30min}}$ [K]	$\eta_{\Delta T}$
Loch in Wand	8.46	41.53	16.53	0.55
SR_10_22	20.33	47.56	22.56	0.75
SR_10_9	7.25	40.01	15.01	0.50
SR_15_8	7.95	40.63	15.63	0.52
<i>perfekt schichtend</i>	∞	55	30	1.0

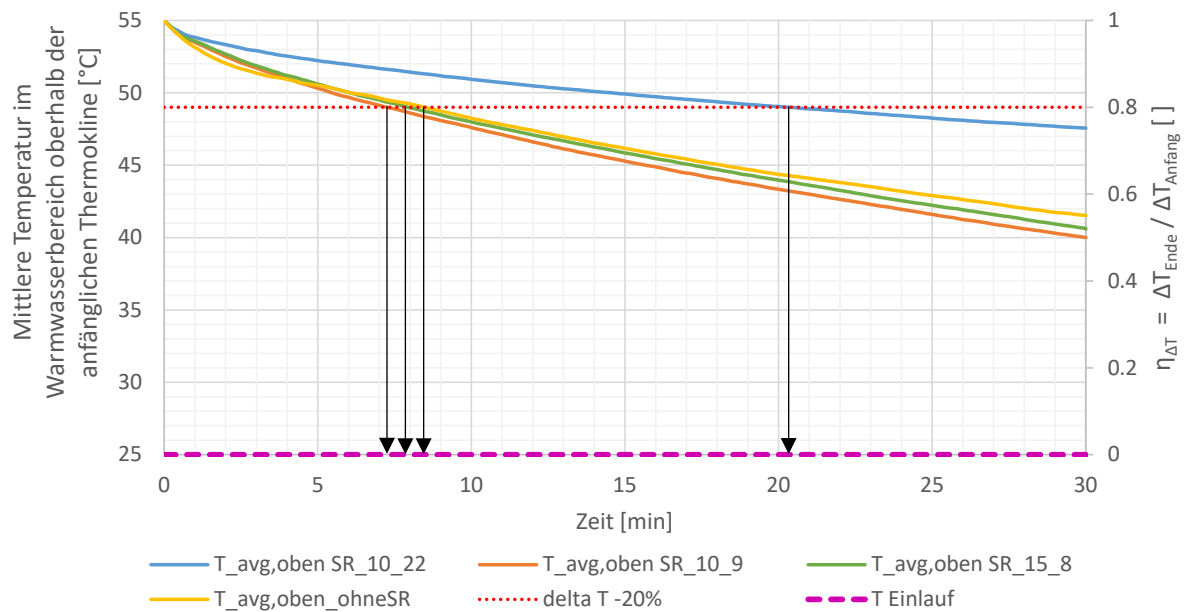


Abbildung 39: Kennzahlen zum Vergleich der Sprührohrvarianten.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Laborexperimente aus dem Projekt DiffStrat wurden in diesem Projekt mit CFD Simulationen nachgestellt um die Simulationsmodelle zu validieren. Für die Laboraufbauten mit Bogenrohr konnten die Strömungen und die Temperaturverläufe sehr gut nachgebildet und die Simulation somit validiert werden. Das Modell mit Lochblech hat dabei zu äusserst aufwändigen Simulationen mit langen Simulationszeiten geführt. Die Simulation mit dem Sprührohr konnte zwar die Strömung, die mit den PIV-Aufnahmen gemessen wurden, qualitativ gut nachstellen, bei den entstehenden Temperaturverläufen im Speicher gab es jedoch noch grössere Differenzen. Das Simulationsmodell ist daher nur bedingt validiert.

Mit den Simulationsmodellen konnten weitere Konfigurationen von Einströmgeometrien und Durchflussraten untersucht werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Verwendung eines Lochblechs bei der Einströmung durch ein Bogenrohr in den Klöpperboden oder -deckel die Strömung stark beruhigt. Die Temperaturschichtung wird selbst bei einer Einströmung mit 3000 kg/h kaum durchmischt und es wird eine homogene Kolbenströmung durch den Speicher erreicht, während beim Speicher ohne Lochblech starke Durchmischungen bereits bei 1500 kg/h stattfinden. Diese nehmen zu mit erhöhten Durchflussraten.

Auf Grund der Schwierigkeiten, Lochbleche mit kleinen (\varnothing 3 mm) Löchern abzubilden, wurde nur mit einem Lochblech mit Löchern von \varnothing 10 mm simuliert. Ob ein Lochblech mit kleineren Löchern zu noch besserem Schichtungsverhalten führen würde, kann nicht gesagt werden. Für die simulierten Fälle war jedoch die Schichtung bereits mit dem Lochblech mit \varnothing 10 mm sehr ausgeprägt, so dass eine wesentliche Verbesserung mit kleineren Lochdurchmessern nicht zu erwarten ist.

Die Simulationen vom Speichereintritt durch ein Sprührohr zeigten, wie sich die Strömung über die Löcher des Sprührohrs verteilt. Wenn die Löcher genügend gross sind um bei homogener Ausströmung Geschwindigkeiten von < 0.1 m/s zu erreichen, entsteht keine gleichmässige Verteilung über die Löcher. Dies konnte bereits mit den PIV-Bildern der Laborexperimente gezeigt werden und bestätigt Ergebnisse der Studie BigStrat [23]. Die Simulationen zeigen für diesen Fall, dass das meiste Fluid bei den letzten Löchern in Strömungsrichtung austritt und nur wenig aus den ersten Löchern. Es bildet sich eine kegelförmige Strömung entlang des Sprührohrs. Die Speicherschichtung wird dabei deutlich beeinträchtigt. Ein Sprührohr mit kleineren Löchern führt zwar zu einer homogenen Strömungsverteilung über die Löcher, die dadurch erhöhten Geschwindigkeiten führen jedoch zu noch stärkeren Durchmischungseffekten im Speicher. Im Vergleich zu einer Einströmung durch ein einfaches Loch in der Wand, konnte nur das Sprührohr mit grossen Löchern das Schichtungsverhalten verbessern. Auch diese Variante blieb jedoch weit hinter den Erwartungen an ein gut schichtendes System zurück. Als Referenz für eine gute Schichtung bei seitlicher Einströmung können hier die Resultate von Gwerder et al. 2016 [2] herangezogen werden.

Es wurden sowohl für die Varianten mit Bogenrohr als auch für jene mit Sprührohr Kennzahlen zum Vergleich der Varianten berechnet. Eine genaue Berechnung der exergetischen Effizienzen war nicht möglich, da die Simulationen nur einen Ausschnitt des ganzen Be- und Entladezyklus darstellen. Im Anhang wurden aber Berechnungen präsentiert um erste Abschätzungen diesbezüglich machen zu können.



Alle Ergebnisse basieren auf Speichergrößen von ca. 900 Liter Volumen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auf grössere Speicher übertragbar sind. Zur Skalierung des Speicherschichtungsverhaltens auf grössere Speicher sei an dieser Stelle auf das Projekt BigStrat⁵ verwiesen, insbesondere auf das Kapitel 4 des entsprechenden Schlussberichtes [23].

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Ergebnisse dieses Projekts und jene des Vorgängerprojekts wurden im Januar 2021 den Autoren des Planungshandbuchs Fernwärme [26] präsentiert und mit ihnen besprochen. Ausserdem werden die Resultate im April 2021 am 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme in Bad Staffelstein, Deutschland präsentiert.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Haller MY, Haberl R, Persdorf P, Reber A. StorEx - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern. Bundesamt für Energie BFE; 2015.
- [2] Gwerder C, Lötscher L, Podhradsky J, Kaufmann M, Huggenberger A, Boller S, et al. Horizontal Inlets of Water Storage Tanks With Low Disturbance of Stratification. *J Sol Energy Eng* 2016;138:051011–9. <https://doi.org/10.1115/1.4034228>.
- [3] Bahnfleth WP, Song J. Constant Flow Rate Charging Characteristics of a Full-Scale Stratified Chilled Water Storage Tank with Double-Ring Slotted Pipe Diffusers. *Applied Thermal Engineering* 2005;25:3067–82. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.03.013>.
- [4] Karim MA. Experimental investigation of a stratified chilled-water thermal storage system. *Applied Thermal Engineering* 2011;31:1853–60. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.019>.
- [5] Tang JL, OuYang ZR, Shi YY. Experimental analysis and FLUENT simulation of a stratified chilled water storage system. *Eur Phys J Plus* 2019;134:118. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12579-0>.
- [6] Kocijel L, Mrzljak V, Glažar V. Numerical analysis of geometrical and process parameters influence on temperature stratification in a large volumetric heat storage tank. *Energy* 2020;194:116878. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116878>.
- [7] Tang J, OuYang Z, Shi Y. Diffuser design and experimental research of a large-scale chilled water storage system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2020;0:1–12. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1804013>.
- [8] Fernández FJ, Díaz J, Folgueras MB, Suárez IM. Stratification Analysis and Behaviour of a Real Industrial Thermocline Thermal Energy Storage Tank for Cogeneration Purposes. *Processes* 2021;9:120. <https://doi.org/10.3390/pr9010120>.
- [9] Al-Maraffie A, Al-Kandari A, Ghaddar N. Diffuser design influence on the performance of solar thermal storage tanks. *International Journal of Energy Research* 1991;15:525–34. <https://doi.org/10.1002/er.4440150702>.
- [10] Nelson JEB, Balakrishnan AR, Srinivasa Murthy S. Experiments on stratified chilled-water tanks: Expériences menées avec des réservoirs d'accumulation d'eau glacée à stratification. *International Journal of Refrigeration* 1999;22:216–34. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00055-3).



- [11] Chung JD, Cho SH, Tae CS, Yoo H. The effect of diffuser configuration on thermal stratification in a rectangular storage tank. *Renewable Energy* 2008;33:2236–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.013>.
- [12] Ghajar AJ, Zurigat YH. Numerical Study of the Effect of Inlet Geometry on Stratification in Thermal Energy Storage. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 1991;19:65–83.
- [13] Musser A, Bahnfleth WP. Parametric Study of Charging Inlet Diffuser Performance in Stratified Chilled Water Storage Tanks with Radial Diffusers: Part 2–Dimensional Analysis, Parametric Simulations and Simplified Model Development. *HVAC&R Research* 2001;7:51–65. <https://doi.org/10.1080/10789669.2001.10391429>.
- [14] Zachar A, Farkas I, Szlivka F. Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows. *Solar Energy* 2003;74:287–302. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00188-9).
- [15] Shah LJ, Furbo S. Entrance Effects in Solar Storage Tanks. *Solar Energy* 2003;75:337–48.
- [16] Shin M-S, Kim H-S, Jang D-S, Lee S-N, Lee Y-S, Yoon H-G. Numerical and experimental study on the design of a stratified thermal storage system. *Applied Thermal Engineering* 2004;24:17–27. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00242-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00242-4).
- [17] Huhn R. Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. PhD. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2007.
- [18] Yu Y, et al. CFD Analysis on Thermal Storage Performance of Temperature-stratified Water TES Tank with New Type Diffuser. SET2010 - 9th international Conference on Sustainable Energy Technologies, Shanghai, China: 2010.
- [19] Lavan Z, Thompson J. Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks. *Solar Energy* 1977;19:519–24.
- [20] Al-Najem NM, Al-Marafie AM, Ezuddin KY. Analytical and experimental investigation of thermal stratification in storage tanks. *International Journal of Energy Research* 1993;17:77–88.
- [21] Hegazy AA. Effect of inlet design on the performance of storage-type domestic electrical water heaters. *Applied Energy* 2007;84:1338–55. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.014>.
- [22] Zurigat YH, Liche PR, Ghajar AJ. Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1991;34:115–25.
- [23] Battaglia M, Züllig L, Haller M. BigStrat - Schichtung grosser Wärmespeicher. 2018.
- [24] Haberl R, Amstad D, Caduff I, Reber A, Haller M. DiffStrat - Stratification of Thermal Storage Tanks by Diffusor Design. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2019.
- [25] Jenni J. Speicher in Theorie und Praxis. Oberburg Bei Burgdorf: Jenni Energietechnik AG; 2000.
- [26] Nussbaumer T, Thalmann St, Jenni A, Ködel J. Planungshandbuch Fernwärme - Version 1.2. Bern: EnergieSchweiz und QM Fernwärme; 2018.



Anhang A: Bogenrohr ohne Lochblech: PIV-Aufnahmen und simulierte Strömung

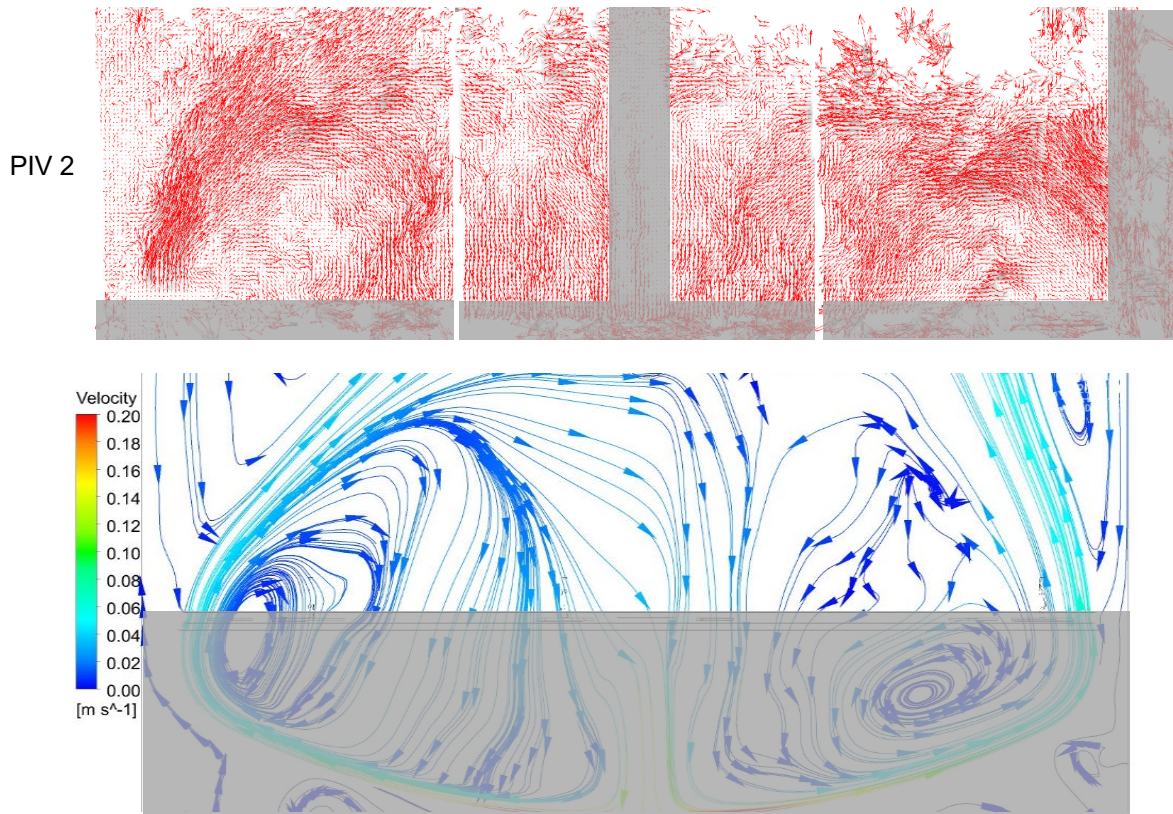


Abbildung 40: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 2 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 2.



PIV 3

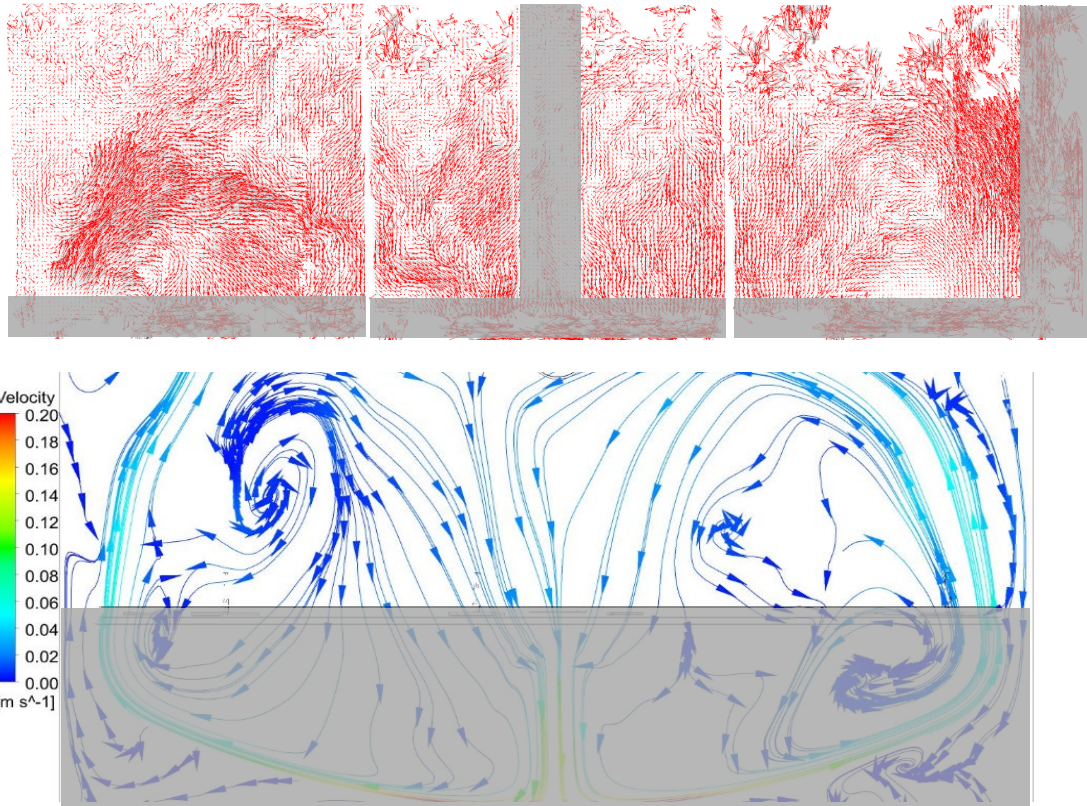


Abbildung 41: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 3 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 2.



PIV 4

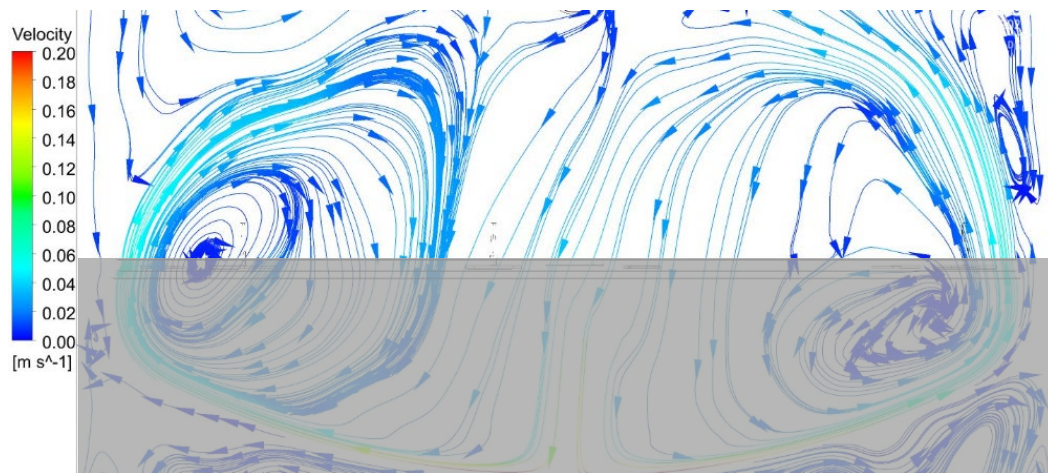
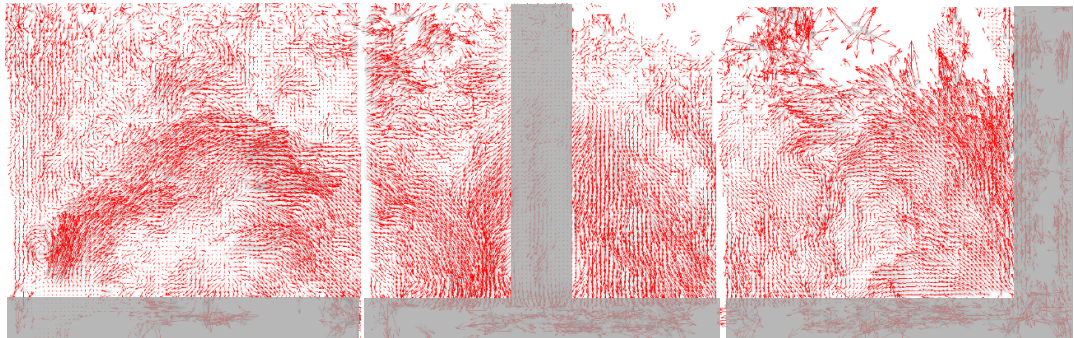


Abbildung 42: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 4 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 2.



Anhang B: Bogenrohr mit Lochblech: PIV-Aufnahmen und simulierte Strömung

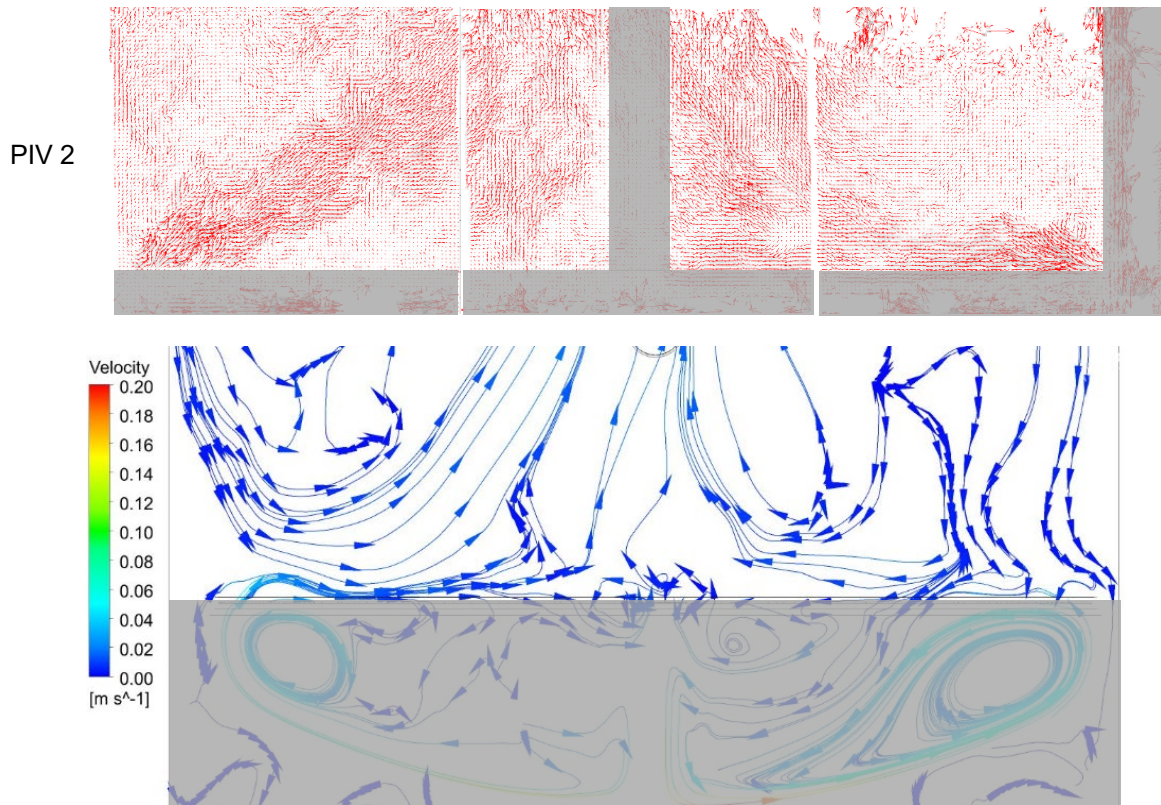


Abbildung 43: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 2 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 1.



PIV 3

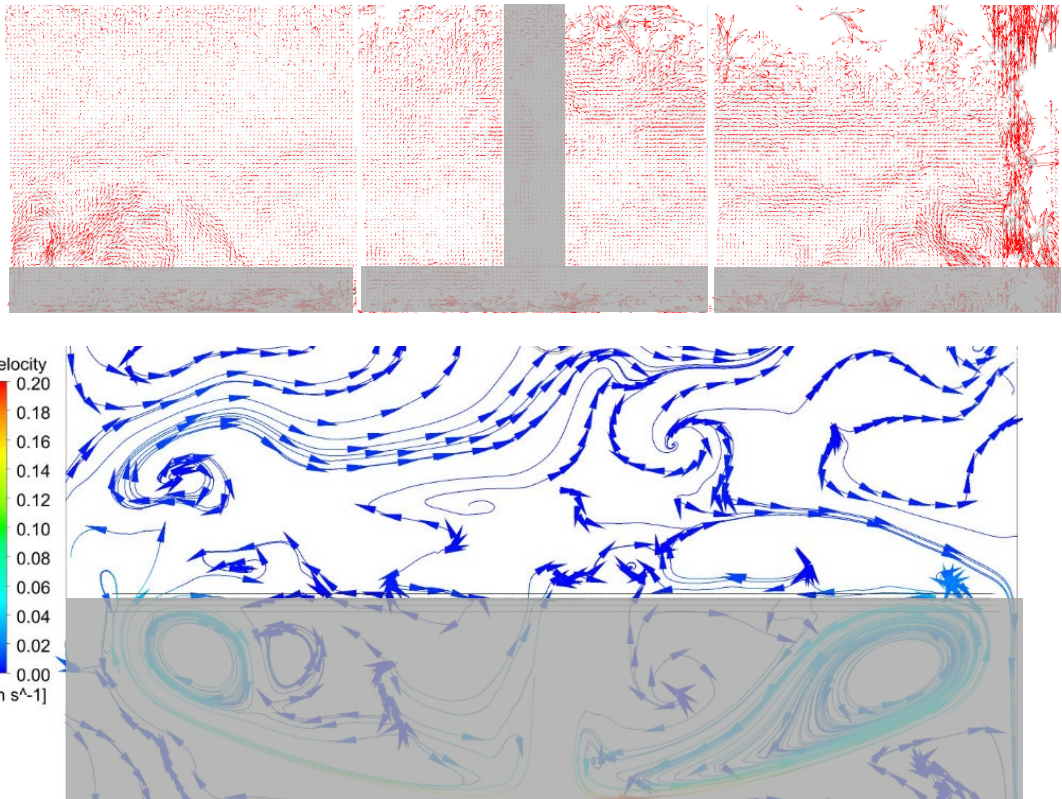


Abbildung 44: Vergleich der gemessenen PIV-Aufnahme 3 (oben) und dem simulierten Strömungsbild (unten) der Netzvariante 1.



Anhang C: Abschätzung der Auswirkungen auf Energieeffizienz

C1: Berechnungen für Simulationen mit Bogenrohr

Um die Auswirkung der verschiedenen Bogenrohrvarianten auf die Effizienz einer Wärmepumpe abzuschätzen, wurde der Carnot-Wirkungsgrad der Beladung gemäss Gleichung 4 berechnet.

Gleichung 4
$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Senke}}{T_{Senke} - T_{Quelle}}$$

Die Quelltemperatur wurde dabei auf 2 °C festgelegt. Die Senktemperatur ist die mittlere Temperatur von Ein- und Austritt des Wärmepumpen-Kondensators (wasserseitig) während eines Beladevorgangs. Hier wird angenommen, dass für die Wärmeversorgung der Last eine Vorlauftemperatur von 50 °C vorgegeben ist, welche nicht unterschritten werden darf. Zur Kompensation des temporären Temperaturverlustes ΔT_{drop} muss entsprechend die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe um diese Temperaturdifferenz erhöht werden: $T_{WP,VL} = 50 \text{ °C} + \Delta T_{drop}$. Der Beladevorgang dauert so lange, bis der Temperatursensor T_{u1} direkt oberhalb des Austritts aus dem Speicher im Experiment 49 °C erreicht hat ($t_{u1>49}$). Die Rücklauftemperatur zur Wärmepumpe $T_{WP,RL}$ wird gemittelt während eines Beladevorgangs $t_{u1>49}$. Die Werte sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Temperaturen für die COP-Berechnung für Bogenrohrvarianten.

Variante	$t_{u1>49}$ [min]	$T_{WP,VL}$ [°C] 50°C + ΔT_{drop}	$T_{WP,RL}$ [°C] Mittel während $t_{u1>49}$	T_{avg} [°C] Mittel VL und RL
oLB3000o	16.83	52.50	46.33	49.41
oLB2500o	18.83	52.20	46.04	49.12
oLB2000o	21.35	51.80	45.61	48.70
oLB1500o	27.16	51.25	45.25	48.25
mLB3000o	14.16	50.37	45.10	47.74
mLB2500o	17.17	50.30	45.10	47.70
mLB2000o	21.65	50.20	45.07	47.64
mLB1500o	30.33	50.13	45.07	47.60
Referenz perfekt schichtend	abhängig vom Durchfluss	50.00	45.00	47.50



Der aus diesen Temperaturen berechnete COP_{Carnot} wird mit einem üblichen Gütegrad von 0.4 multipliziert um den COP zu erhalten. Daraus wird die elektrische Leistungsaufnahme pro kW thermische Leistung gemäss Gleichung 5 berechnet.

Gleichung 5
$$P_{el} = \frac{1 kW_{th}}{COP}$$

Werden diese Leistungen jeweils mit der perfekt schichtenden Referenz verglichen, so erhält man die zusätzliche elektrische Leistung in Prozent, welche ein Resultat der Durchmischungsverluste ist. Die Werte sind in Tabelle 14 dargestellt. Wird die Berechnung des COP basierend auf einer Senkentemperatur berechnet, die der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe entspricht, so sind diese Werte etwas höher, als wenn der Durchschnitt von Vor- und Rücklauf als Senkentemperatur angenommen wird.

Tabelle 14: COP und elektrische Leistung für Bogenrohrvarianten.

Variante	COP_{Carnot}	COP	el. Leistung pro 1 kW _{th} [kW _{el}]	el. Leistungs-zunahme [%] T _{Senke} = T _{avg}	el. Leistungs-zunahme [%] T _{Senke} = T _{WP,VL}
oLB3000o	6.80	2.72	0.367	+3.6	+4.4
oLB2500o	6.84	2.74	0.366	+3.0	+3.9
oLB2000o	6.89	2.76	0.363	+2.3	+3.2
oLB1500o	6.95	2.78	0.360	+1.4	+2.2
mLB3000o	7.02	2.81	0.356	+0.4	+0.7
mLB2500o	7.02	2.81	0.356	+0.4	+0.5
mLB2000o	7.03	2.81	0.356	+0.3	+0.4
mLB1500o	7.03	2.81	0.355	+0.2	+0.2
<i>Referenz perfekt schichtend</i>	7.05	2.82	0.355	0.0	0.0

Diese Werte dienen nur zur groben Abschätzung der effektiven Effizienzen und Leistungen, da zum einen die angenommenen, um ΔT_{drop} erhöhten Einlaufemperaturen nicht simuliert wurden, und zum andern nur ein Beladevorgang und nicht ein ganzer Zyklus von Be- und Entladung simuliert wurde.

Zusätzlich ergeben sich bei besserer Schichtung auch deutlich längere Einschaltzyklen der Wärmepumpe, was wiederum zu weniger Kompressorstarts und damit zu einer höheren Lebensdauer der Wärmepumpe führt. Dieser Einfluss wird jedoch an dieser Stelle nicht weiter Quantifiziert.



C2: Berechnungen für Simulationen mit Sprührohr

Für die energetische Abschätzung der Sprührohrvarianten wird ein Beladevorgang des unteren Speicherbereichs ausgewertet. Ein Beladevorgang dauert so lange, bis der untere Bereich des Speichers bis zum Temperatursensor T_{u75} beim Auslauf um 5 K angestiegen ist ($t_{T_{u75}>25}$). Im Fall der Simulationen ist dies von 20 auf 25 °C. Die Energie die während dieser Zeit im oberen Warmwasserbereich (oberhalb der ursprünglichen Thermokline) verloren geht, kann mit dem Abfall der mittleren Temperatur in diesem Bereich vom Anfang (55 °C) bis zum Zeitpunkt $t_{T_{u75}>25}$ berechnet werden, gemäss Gleichung 6.

$$\text{Gleichung 6} \quad Q_{\text{Verluste,oben}} = m_{\text{oben}} * c_p * (T_{\text{oben,Anfang}} - T_{\text{oben,Ende}})$$

Tabelle 15: Zeit des Beladevorgangs und Energieverlust im oberen Bereich des Speichers für Sprührohrvarianten.

Variante	$t_{T_{u75}>25}$ [min] bis $T_{u75} > 25^\circ\text{C}$	$T_{\text{oben,Ende}}$ [°C] Mittel nach $t_{u75>25}$	$Q_{\text{Verluste,oben}}$ [kJ]
Loch in Wand	8.50	48.97	7859
SR_10_22	11.50	50.60	5739
SR_10_9	8.00	48.61	8333
SR_15_8	8.33	48.80	8083
Referenz ungestört	12.38	55.00	0

Hier muss beachtet werden, dass die Energie, welche aus dem oberen Speicherbereich verloren geht, im System erhalten bleibt. Sie geht also nicht ganz verloren, sondern wird nur in den unteren Bereich des Speichers gemischt. Der effektive Effizienzverlust ist zu berechnen auf Grund der elektrischen Energie, welche die Wärmepumpe braucht um den Energieverlust im oberen Speicherbereich zu kompensieren, abzüglich der elektrischen Energie die sie einspart, weil die Verluste von oben im unteren Bereich gewonnen werden, siehe Gleichung 7. Diese beiden elektrischen Energien werden, gemäss Gleichung 8, auf Grund der Verlustenergie des oberen Bereichs, dem $\text{COP}_{\text{Carnot}}$ gemäss Gleichung 4 und dem Gütegrad von 0.4 berechnet. Die Quelltemperatur für den $\text{COP}_{\text{Carnot}}$ wird dabei als 2 °C angenommen. Die Senktemperatur ist für den oberen Bereich 55 °C und für den unteren Bereich 25 °C.

$$\text{Gleichung 7} \quad E_{\text{el,Mehraufwand}} = E_{\text{el,Mehraufwand,oben}} - E_{\text{el,Minderaufwand,unten}}$$

$$\text{Gleichung 8} \quad E_{\text{el,Mehraufwand}} = \frac{Q_{\text{Verlust,oben}}}{\text{COP}_{\text{Carnot},55^\circ\text{C}} * \text{Gütegrad}} - \frac{Q_{\text{Verlust,oben}}}{\text{COP}_{\text{Carnot},25^\circ\text{C}} * \text{Gütegrad}}$$



Tabelle 16: COP und elektrischer Mehraufwand für Sprührohrvarianten.

Variante	COP _{Carnot,55°C} (A2W55)	COP _{Carnot,25°C} (A2W25)	E _{el,Mehraufwand,oben} [kJ _{el}]	E _{el,Minderaufwand,unten} [kJ _{el}]	E _{el,Mehraufwand} [kJ _{el}]
Loch in Wand	6.19	12.96	3173	1516	1658
SR_10_22	6.19	12.96	2317	1107	1210
SR_10_9	6.19	12.96	3365	1607	1758
SR_15_8	6.19	12.96	3264	1559	1705
Referenz ungestört	6.19	12.96	0	0	0

Um diesen effektiven elektrischen Mehraufwand in Relation zu setzen, wird er mit der elektrischen Energie verglichen, die während des Beladevorgangs gebraucht wird um den unteren Bereich des Speichers zu heizen. Zunächst wird die thermische Energie, gemäss Gleichung 9, mit der Differenz zwischen Einlauf- und mittleren Auslauftemperatur berechnet.

Gleichung 9
$$Q_{unten} = \dot{m} * t_{T_{u75>25}} * c_p * (T_{in} - T_{out,avg})$$

Die elektrische Energie für die Beladung wird mit dem COP bei Senktemperatur von 25°C berechnet. Dividiert man nun den elektrischen Mehraufwand von Gleichung 7 durch diese elektrische Energie zur Beladung des unteren Bereichs, so erhält man den prozentualen Mehraufwand an elektrischer Energie, der durch die Durchmischung im Speicher während des Beladevorgangs entstehen. Für die Variante SR_10_22 ist dieser Mehraufwand etwa gleich gross wie die elektrische Energie für die Beladung. Für die anderen beiden Varianten ist er sogar doppelt so hoch. Das liegt zum einen daran, dass durch die Durchmischung die Temperatur im unteren Bereich steigt und dadurch die Beladeenergie reduziert wird. Zum anderen liegt es daran, dass die Beladetemperatur unten bei den simulierten Varianten bei 25 °C liegt und der COP daher sehr hoch ausfällt. Nach dem der untere Bereich des Speichers die 25 °C erreicht, würde sich in einer realen Anwendung die Eintrittstemperatur erhöhen und der COP sinken. Dadurch würde die Beladeenergie steigen und der prozentuale Mehraufwand würden sinken. Abbildung 45 zeigt den prozentualen Mehrbedarf an elektrischer Energie in Abhängigkeit der Beladetemperatur. Dieser ist mit der simulierten Verlustenergie des oberen Bereichs berechnet worden. Diese würden sich leicht ändern, wenn sich die Beladetemperatur erhöht. Daher ist diese Grafik mit Vorsicht zu interpretieren.



Tabelle 17: Beladungsenergie und Zusatzenergie für Sprührohrvarianten.

Variante	$T_{out,avg}$ [°C] Mittel während $t_{u75>25}$	Q_{unten} [kJ _{th}]	$E_{el,unten}$ [kJ _{el}]	el. Mehraufwand aufgrund Durchmischung [%]
Loch in Wand	21.13	4585	884	187.5
SR_10_22	21.03	6363	1227	98.7
SR_10_9	21.15	4289	827	212.5
SR_15_8	21.17	4454	859	198.5
Referenz ungestört	20	8630	1664	0

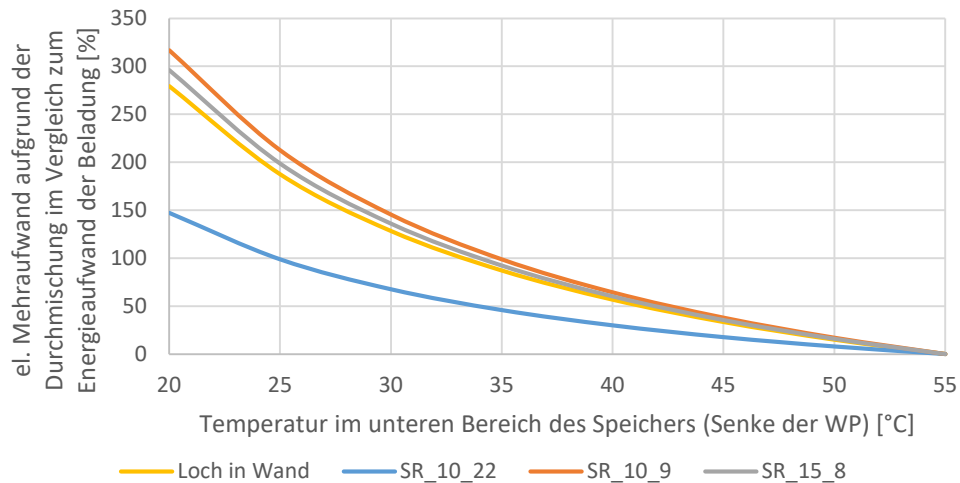


Abbildung 45: Prozentualer elektrischer Mehraufwand in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur.