Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE
LUZERN

Technik & Architektur

Diplomarbeit Herbstsemester 2018

Aufbau und thermische Charakterisierung eines Speichers zur Untersuchung von makro-verkapselten PCM-Systemen

Verfasser:	Reto Hendry
Betreuer:	Prof. Dr. Jörg Worlitschek Remo Waser Marcel Troxler
Experten:	Dr. Kai Lieball
Industriepartner:	-
Abgabedatum:	07. Januar 2019

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Aufbau und thermische Charakterisierung eines Speichers zur Untersuchung von makro-verkapselten PCM-Systemen**
Diplomandin/Diplomand	**Hendry, Reto**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Maschinentechnik**
Semester	**HS18**
Dozentin/Dozent	**Prof. Dr. Jörg Worlitschek**
Expertin/Experte	**Dr. Kai Lieball**

Abstract Deutsch

Eine zentrale Herausforderung bei Latentspeichern ist eine effektive Wärmeübertragung. Ein mögliches Wärmeübertragungskonzept besteht darin, das Phasenwechselmaterial (PCM) zu verkapseln und die Kapseln mit einem Wärmetransferfluid (WTF) zu umströmen. Die Kapseln dienen dann als Trennung wie auch als Wärmeaustauschfläche zwischen WTF und PCM. Ein Forschungsteam des Kompetenzzentrums Thermische Energiespeicher an der Hochschule Luzern optimiert und entwickelt derzeit makro-verkapselte PCM-Systeme. In einem nächsten Schritt müssen deren computergestützte Simulationen an einem experimentellen Prüfstand validiert werden.
In der vorliegenden Arbeit soll ein Prüfstand zur Untersuchung von makro-verkapselten PCM-Systemen aufgebaut werden. Nach dem Aufbau soll der Prüfstand in einem ersten Schritt ohne Kapseln thermisch und strömungstechnisch charakterisiert werden. Dazu werden die Wärmeverluste des Wärmespeichers bestimmt sowie eine Energiebilanz und Quantifizierung der Durchmischung ausgeführt.
Der Prüfstand konnte erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Die erstellte Bedienungsanleitung liegt in einem separaten Dokument vor. Nach der Inbetriebnahme wurden Messungen für die Charakterisierung des Prüfstands durchgeführt.
Die Ergebnisse zeigen, dass wenn das kältere WTF von unten in den Wärmespeicher einströmt sich eine deutliche thermische Schichtung bildet. Wenn das kältere WTF hingegen von oben in den Wärmespeicher einströmt, wird der Wärmespeicher stark durchmischt. Eine mit Lebensmittelfarbe durchgeführte Strömungsvisualisierung bestätigt dieses Ergebnis.

Abstract English

A key challenge with a latent thermal energy storage is an effective overall heat transfer. One possibility to achieve an efficient over all heat transfer is to encapsulate the phase change material (PCM). A heat transfer fluid (HTF) will then pass through a packed bed of capsules. The capsules then serve as a separation as well as a heat exchange surface between HTF and PCM. A research team at the Competence Center Thermal Energy Storage at Lucerne University of Applied Sciences is currently optimizing and developing a macro-encapsulated PCM system. In a next step, their computer-based simulations must be validated with an experimental test bench.
In the present work, a test bench for the investigation of the macro-encapsulated PCM systems will be set up. After the construction, the test bench shall be characterized thermally and fluidically with only water in the system. For this purpose, the heat losses of the thermal storage are determined. An energy balance and quantification of the mixing shall be carried out too.
The test bench was successfully set up and put into operation. The created user manual is available in a separate document. After commissioning, measurements were carried out for the characterization of the test bench.
The results show that when the colder HTF flows from below into the thermal storage a distinct thermal stratification forms. On the other hand, if the colder HTF flows from above into the thermal storage, it gets mixed up. A carried-out flow visualization with food colorant confirms this result.

Ort, Datum Horw, 7. Januar 2019

© Reto Hendry, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Bachelor-Thesis. Durch den Aufbau des Prüfstands konnte ich viel praktisches Wissen aufbauen. Dies war eine tolle Erfahrung und bereitete mir oftmals viel Spass neben den meist theoretischen Vorlesungen. Ich bedanke mich hiermit herzlich bei meinem Betreuer Remo Waser, welcher mich mit seinem fachmännischen Wissen inspirierte und durch die komplette Arbeit begleitete. Ein weiter Dank geht an den technischen Mitarbeiter vom Labor, Peter Brun auf welchen immer Verlass war und mich mit Rat und Tat unterstützte. Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Jörg Worlitschek, Leiter des Kompetenzzentrums Thermische Energiespeicher der diese Arbeit überhaupt erst ermöglichte.

Luzern, Januar 2019

Reto Hendry

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 2
1.1 Hintergrund ... 2
1.2 Ziele ... 3
2 Stand der Technik ... 4
2.1 Thermische Energie Speicher Systeme ... 4
2.2 Latentwärmespeicher ... 4
2.3 Verkapselung von PCM ... 5
2.4 Verkapselte PCM in einem Festbett-Energiespeicher ... 6
2.5 Experimentelle Arbeiten im Bereich makroverkapselter Systeme ... 6
3 Methodik ... 7
3.1 Experimenteller Prüfstand ... 7
3.1.1 Hydraulische Verschaltung ... 8
3.1.2 Auslegung ... 10
3.1.3 Datentransfer, Sensoren und Aktoren ... 15
3.2 Messunsicherheitsanalyse nach GUM ... 16
3.3 Experimentelle Kampagne ... 17
3.3.1 Bestimmung der Wärmeverluste ... 18
3.3.2 Energiebilanz ... 19
3.3.3 Quantifizierung des Mischverhaltens ... 19
4 Resultat und Diskussion ... 21
4.1 Bestimmung der Wärmeverluste ... 21
4.2 Energiebilanz ... 22
4.3 Quantifizierung des Mischverhaltens ... 26
5 Fazit und Ausblick ... 30
Symbolverzeichnis ... 31
Abbildungsverzeichnis ... 33
Tabellenverzeichnis ... 34
Literaturverzeichnis ... 35

Anhänge

A1 Lastenheft
A2 Schemata der Hauptbetriebsarten
A3 Impressionen des Prüfstands

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

In vielen Energiesystemen besteht ein Ungleichgewicht zwischen Energiebedarf und -Angebot. Eine von vier Säulen der Energiestrategie 2050 beschäftigt sich mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien. Mit der somit zunehmenden Integration erneuerbarer Energien, wird das Ungleichgewicht von Energiebedarf und -Angebot noch ausgeprägter. Zum Beispiel ist Solarenergie im Sommer in Form von Wärme meist überschüssig vorhanden, wobei im Winter bei weniger Sonneneinstrahlung lediglich ein kleiner Teil des Wärmebedarfs gedeckt werden kann. Laut Schweizer Bundesamt für Energie wird ca. 80% des Endenergieverbrauchs in Schweizer Privathaushalten für Wärme aufgewendet (siehe Abb. 1). Wärmespeichersystemen wurde unter anderem aus den vorab genannten Gründen in den letzten Jahrzenten grosse Aufmerksamkeit gewidmet. Thermische Energiespeicher Systeme (TESS) sind somit eine attraktive Lösung um Wärme und Kälte zu Speichern.

Das Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher (CC TES) an der Hochschule Luzern optimiert und entwickelt Materialien, Komponenten und Systeme für Gebäude-, Industrie- und Energieversorgungsanwendungen. Ein Forschungsteam ist derzeit damit beschäftigt einen Latentwärmespeicher für Gebrauchswasser zu konzipieren. Dabei kommt es zum Einsatz von verkapselten Phasenwechselmaterialien, kurz PCM (engl. Phase Change Material) welche das Team entwickelt hat. CFD (computational fluid dynamics) Simulationen mit den neuartigen PCM-Kapseln wurden von der Forschungsgruppe des CC TES durchgeführt und müssen in einem nächsten Schritt experimentell validiert werden.

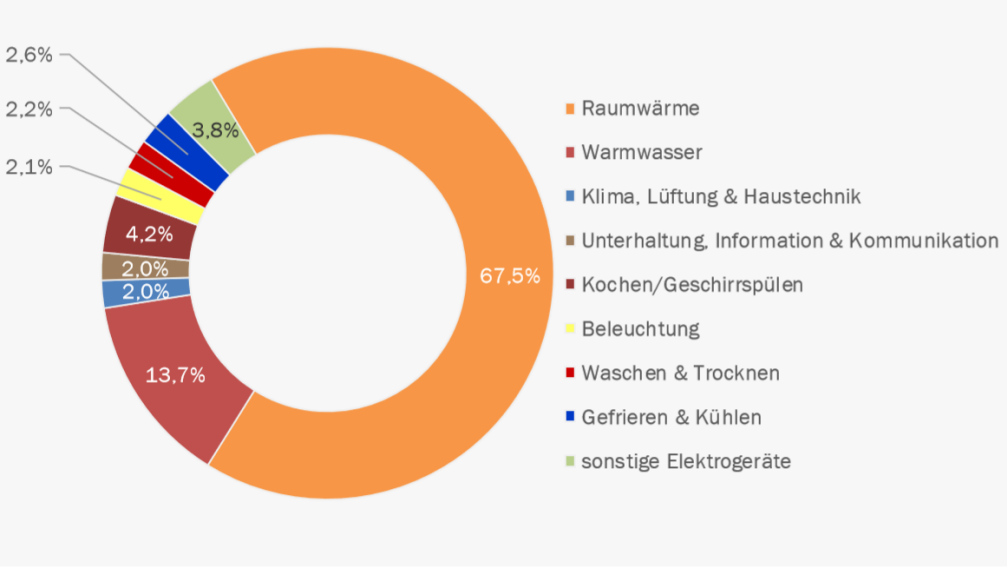


Abb. 1: Anteile am Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszwecken in 2017 [1].

1.2 Ziele

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit sollen nebst der Literaturrecherche über latente Wärmespeicher und der Verkapselung von PCM die folgenden Ziele erreicht werden:

- Aufbau eines Prüfstands: Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde ein Plexiglastank vom CC TES bereitgestellt, welcher für den Prüfstand verwendet werden soll. Die Aufgabe dieses Arbeitspaket ist es einen Prüfstand auszulegen, welcher den Ansprüchen des CC TES entspricht. Der Prüfstand soll aufgebaut und die hydraulischen sowie messtechnischen Komponenten montiert werden. Ebenfalls soll die auf LabVIEW basierende Steuerung und Regelung konzipiert werden.
- Inbetriebnahme des Prüfstands: Nach der Fertigstellung des Prüfstands soll dieser in Betrieb genommen und die Komponenten auf deren Funktionalität getestet werden. Mit dem Abschluss dieses Arbeitspaket soll ein fertiger und in Betrieb genommener Prüfstand vorliegen.
- Durchführung und Auswertung von Messungen ohne PCM-Kapseln: Es sollen erste Messungen mit Wasser (ohne Kapseln) durchgeführt werden. Eine Energiebilanz sowie Druckverluste sollen anhand gemessener Temperaturen und Drücke bestimmt werden. Eine Messunsicherheitsanalyse nach GUM soll bei der Auswertung durchgeführt werden.
- Durchführung und Auswertung von Messungen mit PCM-Kapseln: In diesem Arbeitspaket folgen Messungen mit PCM-Kapseln, sofern diese bis zu diesem Zeitpunkt hergestellt sind. Analog zu den Messungen ohne Kapseln, sollen die Energiebilanz sowie die Druckverluste bestimmt werden. In einem letzten Schritt, sollen die Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen des CC TES verglichen werden.

2 Stand der Technik

Nachfolgend soll der Stand der Technik bezüglich TESS erläutert werden.

Ein wesentlicher Teil vom Inhalt dieses Kapitels wurde aus dem Review Paper von Schroeteler et al. [2] über Makroverkapselte PCM Systeme entnommen.

2.1 Thermische Energie Speicher Systeme

Thermische Energiespeicher Systeme sind Systeme welche Wärme oder Kälte aufnehmen, abgeben und speichern können. Das Ziel eines solchen Systems ist es, Energie in Form von Wärme oder Kälte zu speichern, um diese zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben.

Wird ein Thermischer Energiespeicher (TES) unterteilt nach der Speicherart/dem Medium, so gibt es drei verschiedene Arten von Speichern: (i) Sensible TES, bei welchen die Energie durch Erwärmen oder Abkühlen eines flüssigen oder festen Mediums gespeichert wird. (ii) Latente TES, bei welchen die Energie in einem Phasenübergang, üblicherweise von fest zu flüssig gespeichert wird. (iii) Thermochemische Systeme, bei welchen beim Laden/Entladen des Speichers ein reversibler chemischer Prozess oder Sorptionsprozess stattfindet. In der Praxis sind sensible TES (meist Schichtspeicher), die am meist anzutreffende Speicherart der drei genannten Varianten. Dies ist damit zu begründen, dass es eine relativ einfache sowie kostengünstige Technologie ist, da im Gebäudebereich typischerweise Wasser als Speichermedium verwendet wird. Latente und thermochemische TES sind derzeit noch in einem weniger ausgereiften Stadion, zurückzuführen auf deren Komplexität. Deren Investitionskosten sind um einiges höher. So ist jedoch auch die Energiedichte und der Wirkungsgrad eines solchen TESS höher [3].

2.2 Latentwärmespeicher

Das Medium bei einem Latentwärmespeicher ist das sogenannte Phasenwechselmaterial, kurz PCM (engl. Phase Change Material). Die gesamte Wärmezufuhr/-abgabe an/aus dem PCM besteht aus sensibler Wärme und latenter Wärme. Die während des Phasenwechsels gespeicherte Wärmeenergie wird als latente Wärme bezeichnet. In Abb. 2 ist der Vergleich zwischen einem latenten und sensiblen TES aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei gleicher Temperaturdifferenz, der Latentwärmespeicher deutlich mehr Wärmeenergie aufnehmen und speichern kann. Typischerweise können Latentwärmespeicher, im Vergleich zu sensiblen Wärmespeicher, bei gleicher Temperaturdifferenz etwa eine zwei bis vier Mal höhere Wärmeenergie speichern. Der Phasenwechsel beinhaltet dabei das grösste Potential der Speicherung. Der Phasenwechsel ist in den meisten Fällen derjenige von fest zu flüssig und umgekehrt. Der Schmelzpunkt hängt dabei vom Material und der chemischen Zusammensetzung des PCM ab. Die derzeit am häufigsten verwendeten PCM in einem Temperaturbereich von 10°C bis 120°C sind Paraffine, und Salzhydrate sowie Ester für einen Temperaturbereich von 0°C bis 200°C [3].

PCM weisen jedoch auch einige Einschränkungen auf, wie zum Beispiel Supercooling, Phasentrennung, Entflammbarkeit, niedrige Wärmeleitfähigkeit und thermische Instabilität. Supercooling beschreibt den Zustand eines PCM, welches bei einer Temperatur unterhalb seines Gefrierpunktes stets in der flüssigen Phase verbleibt. Für latente TES ist die niedrige Wärmeleitfähigkeit vom PCM die Hauptproblematik. Daher sind Verbesserungen der effektiven Wärmleitfähigkeit erforderlich. Die bekanntesten Methoden um die Wärmeleitfähigkeit von PCM zu erhöhen sind folgende. Lamellenkonfigurationen, Einsetzen einer Metallstruktur (Metallkügelchen) in das PCM, die Dispersion von thermisch leitfähigen Nano- oder Mikroteilchen (Kohlenstoffnanoröhrchen), sowie die Verkapselung der PCM auf welche im nächsten Unterkapitel 2.3 eingegangen wird [4]. Alle diese Techniken sind nicht nur teuer, sondern auch mit bestimmten Nachteilen behaftet. Darunter die Verringerung der latenten Schmelzwärme, die Dämpfung des natürlichen Konvektionsprozesses und das Absetzen/Aufschwimmen der Additive in den flüssigen PCM.

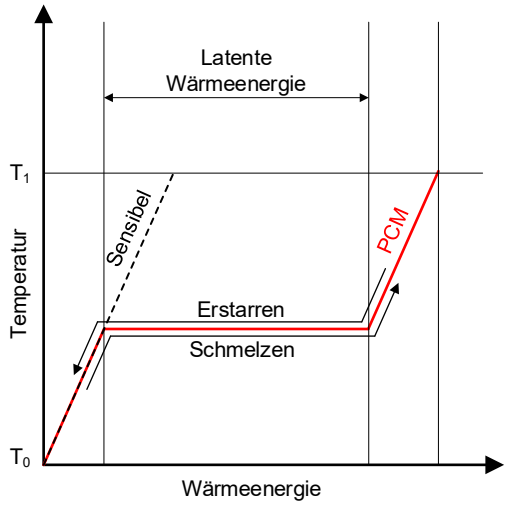


Abb. 2: Vergleich zwischen sensiblem und latentem TES bei gleicher Temperaturdifferenz, rote Linie: PCM mit Phasenwechsel, gestrichelte Linie: sensibles Medium ohne Phasenwechsel

2.3 Verkapselung von PCM

Von einer Verkapselung eines PCM wird gesprochen, wenn das PCM von einer Hülle oder einem Überzug umgeben ist. Die Kapsel dienen dann als Trennung wie auch als Wärmeaustauschfläche zwischen Wärmetransferfluid und PCM. Die Materialien für die Verkapselung variieren stark. Einige Beispiele sind Kupfer, Aluminium, Nickel, Stahl, Silikon und Polymer. Die thermische Wärmeleitfähigkeit der Hülle ist eine entscheidende Grösse bei der Wärmeübertragung zwischen PCM und Wärmetransferfluid (WTF). Metallische Materialien werden bevorzugt, wenn eine hohe Wärmleitung gefordert ist, sowie für Anwendungen im Hochtemperaturbereich. Ansonsten werden meist Kunststoffe eingesetzt. [5]

Werden die Kapseln nach der Grösse unterteilt, so wird zwischen Makro- (>1mm), Mikro- (1-1000µm) und Nanoverkapselung (<1000nm) unterschieden. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich auf die Makroverkapselung eingegangen. Es ist zu beachten, dass nicht alle Eigenschaften von Makroverkapselungen auch auf die Mikro- und Nanoverkapselung zutreffen.

Die Vorteile der Verkapselung sind eine Verringerung des Supercooling Effektes, eine grosse Wärmeübertragungsfläche und die kontrollierte Volumenänderung des PCM beim Phasenübergang.

Die am häufigsten anzutreffenden Formen der Kapseln sind Kugeln, Zylinder, Röhren und Quader. Das Verhältnis von Kern zu Hülle, sowie die Dicke der Hülle sind entscheidende Parameter der Verkapselung. Ein kleines Verhältnis von Kern zu Hülle, führt zu einer übermässigen Hüllendicke, was wiederum die Menge an enthaltenem PCM verringert und die Wärmleitung verschlechtert. Ein grosses Verhältnis von Kern zu Hülle, verschlechtert die Festigkeit der Kapsel und kann dazu führen, dass PCM austritt. Bei einer grossen Kapsel gibt es grössere Differenzen zwischen Hüll- und Kerntemperatur. Beim Erstarren ist so beispielsweise die Randregion bereits erstarrt wobei der Kern stets flüssig verbleibt. Dies führt zu einer enormen Verringerung der Wärmeleistung.

Die drei Hauptprobleme verkapselter PCM sind: (i) Einerseits die Volumenausdehnung des PCM beim Erstarren. Um diesem Problem entgegen zu wirken wird oft eine Luftblase mit in die Kapsel eingeschlossen, welche dem PCM Raum gibt um sich auszudehnen. Jedoch führt diese Luftblase zum zweiten Problem. (ii) Der Druckaufbau in der Kapsel infolge Expansion der Luft bei erhöhter Temperatur. (iii) Die dritte Problematik liegt bei der Reaktionsfähigkeit des PCM gegenüber dem Kapselmaterial.

2.4 Verkapselte PCM in einem Festbett-Energiespeicher

Ein Festbett-Energiespeicher (engl. Packed Bed) besteht aus einer Vielzahl makroverkapselter PCM welche in einem Tank festgehalten werden. Dieser Tank wird vom Wärmetransferfluid durchströmt und stellt somit den Wärmespeicher dar. Damit die Kapseln nicht vom WTF davon geschwemmt werden, sind am Ein- und Auslass des Tanks Lochbleche oder ähnliches angebracht. Die Wärme wird zu oder von einem WTF den Kapseln übertragen indem es durch die Hohlräume der Schüttung aus PCM-Kapseln strömt. Beim Ladezyklus eines Festbett-Wärmespeichers durchströmt warmes WTF die Schüttung, wodurch das PCM in den Kapseln zu schmelzen beginnt. Dadurch nimmt es latente Wärme auf und speichert diese. Beim Entladezyklus strömt kaltes WTF durch die Schüttung, wodurch das PCM erstarrt und somit dem WTF Wärme abgibt. Um eine hohe Wärme/Kälteleistung des Systems zu erhalten, muss eine effiziente Wärmeübertragung zwischen WTF und PCM gewährleitet sein.

Die Porosität des Festbetts, die Einlasstemperatur und der Massenstrom vom WTF haben einen signifikanten Einfluss auf die vollständige Verfestigungs- und Schmelzzeit des PCM. Eine höhere WTF Einlasstemperatur führt zu einer wesentlich verringerten Schmelzzeit, wo hingegen ein höherer Massenstrom und eine höhere Porosität des Festbettes zu einer erheblichen Verringerung der Erstarrungs- und Schmelzzeit führen [5].

Mehrere numerische und experimentelle Studien wurden in den letzten Jahrzenten über makroverkapselte PCM in Festbett-TES durchgeführt. Die Wärmeübertragung und die Strömungsbedingungen in einer zufällig angeordneten Schüttung zu modellieren, stellt sich als äusserst komplex dar. Eine präzise Vorhersage der sich bewegenden Fest-Flüssig-Grenze im PCM während des Phasenübergangs stellt sich stets als grosse Herausforderung heraus.

2.5 Experimentelle Arbeiten im Bereich makroverkapselter Systeme

Sebastian Pinnau [6] schreibt in seinem Abschlussbericht über Strömungs- und kältetechnische Optimierung von Latentkältespeichern. Dabei untersucht er verschiedene Varianten der Verkapselung des Speichermediums auf ihre Eignung hinsichtlich strömungs- und kältetechnischer Aspekte. Unter anderem wurden Berechnungen sowie Messungen der auftretenden Druckverluste des Speichers durchgeführt. Pinnau hat in seiner Arbeit unter anderem Schlauchbeutelschüttungen untersucht. Diese sind laut Pinnau eine sinnvolle Alternative zu den häufig verwendeten Kugelschüttungen aufgrund der gleichen oder leicht verbesserten Wärmeübertragungsleistung, sowie aus Gründen der geringen Materialkosten.

3 Methodik

In diesem Kapitel wird die in der vorliegenden Arbeit angewandte Methodik beschrieben um die in Kapitel 1.2 definierten Ziele zu erreichen.

3.1 Experimenteller Prüfstand

Um die Simulationen welche das CC TES durchführte, validieren zu können, wird ein experimenteller Prüfstand aufgebaut. Mit diesem Prüfstand soll es möglich sein, die Simulationen zu validieren sowie weitere experimentelle Untersuchen mit verkapselten PCM durchzuführen. Das Lastenheft des Prüfstands wurde anhand der Anforderungen des CC TES entworfen. In Tabelle 1 ist ein Ausschnitt des Lastenhefts mit den relevantesten Punkten für die Auslegung des Prüfstands abgebildet. Im Anhang A1 ist das ausführliche Lastenheft abgebildet. Im ausführlichen Lastenheft sind ebenfalls Informationen über die Erreichung der Anforderungen an den Prüfstand aufgeführt.

zwingend	optional	Bezeichnung
		Grundfunktionen
x		Laden und Entladen des Wärmespeichers bidirektional möglich
x		Ladesequenz ohne Auftrennung von hydraulischen Verbindungen einleitbar (durch Umstellung von Ventilen)
x		Entladesequenz ohne Auftrennung von hydraulischen Verbindungen einleitbar (durch Umstellung von Ventilen)
x		Wärmespeicher schwenkbar (Wärmespeicher horizontal und vertikal betreibbar)
	x	Volumenstrom regelbar
		Technische Daten
x		Wärmespeicher lad- und entladbar mit konstanter Temperatur im Bereich von Raumtemperatur (ca. 18-23°C) bis 75°C
x		Wärmespeicher über eine Zeitspanne von 10min mit 16l/min entladbar
x		Möglichkeit für Ladung und Entladung mit tieferen Temperaturen bis 0°C.
x		konstante Ladeleistung einstellbar (1-10 kW)
x		Volumenstrombereich von 5-20l/min möglich
x		Genauigkeit vom Volumenstrom ± 5%
x		Lochblech mit Druckverlust von max. 0.5bar (über beide Lochbleche)
x		Lochblech muss Kapseln mit den Massen 10x20x40mm aufhalten
x		Lochblech muss einer Beanspruchung von ca. 130kg standhalten

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Lastenheft mit den relevantesten Punkten für die Auslegung des experimentellen Prüfstands. Das ausführliche Lastenheft ist im Anhang A1 abgebildet.

3.1.1 Hydraulische Verschaltung

Anhand des Lastenhefts (siehe Tabelle 1 oder Anhang A1), im speziellen anhand der darin beschriebenen Grundfunktionen, wurde die hydraulische Verschaltung sowie die mechanische Vorrichtung des experimentellen Prüfstands entworfen. Die hydraulische Verschaltung und zwei Fotos des Prüfstands sind in Abb. 3 dargestellt. Weitere Impressionen des Prüfstands sind im Anhang A3 abgebildet.

Die Hauptkomponenten des Prüfstands sind die Pumpe (PU), der Durchlauferhitzer (DLE), der Wärmespeicher (WS) sowie die Fässer (F-01 bis F-03). Der Volumenstrom wird über ein Durchflussmessgerät (FIC) gemessen und geregelt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist das verwendete WTF ausschliesslich Leitungswasser, oder Leitungswasser mit der Zugabe von Lebensmittelfarbe. Der Prüfstand ist ein offenes System. Ein offenes System wurde gewählt, weil der Wärmespeicher aus Plexiglas besteht und dieser nicht unter Druck gesetzt werden darf. Wird das System fachgerecht betrieben, können keine Über- oder Unterdrücke im System entstehen und die Gefahr einer Zerstörung des Plexiglastanks infolge dessen kann ausgeschlossen werden. Die Fässer stehen auf einer Höhe von 2.3m und sind somit an oberster Stelle des Systems. Der Wärmespeicher und das komplette System unterhalb der Fässer kann sich somit nicht selbst entleeren. Um unerwünschte Luft aus dem System zu bringen ist an oberster Stelle des WS ein automatischer Entlüfter (AE) angebracht, welcher dazu dient Luft, aber kein Wasser, entweichen zu lassen.

Der Prüfstand kann in verschiedenen Modi/Betriebsarten betrieben werden. Die Hauptbetriebsarten sind das Laden, Vorkonditionieren und das Entladen. Das Laden und Entladen kann bidirektional ausgeführt werden was bedeutet, dass die Einströmrichtung des WTF in den WS gewählt werden kann. Als normale Einströmrichtung wird diejenige von Seiten des Temperatursensors-01 (TIC01) definiert. Wird von «rückwärts durchströmt» oder «entgegengesetztem Betrieb» gesprochen, hat das zu bedeuten, dass das WTF von Seiten des TIC02 einströmt. Die hydraulische Verschaltung der drei oben genannten Hauptbetriebsarten und die des entgegengesetzten Betriebs sind im Anhang A2 abgebildet.

Beim Laden (siehe Anhang A2, Abb. 17) wird der WS auf eine vom Benutzer bestimmte Temperatur geladen. Das WTF wird aus Fass F-01 gepumpt und vom DLE erwärmt. Anschliessend durchströmt es den WS welcher dadurch Wärme aufnimmt. Danach strömt das WTF zurück ins Fass F-01. Dieser Betrieb wird so lange aufrechterhalten, bis der WS die gewünschte Temperatur erreicht. Das Laden wird somit in einem kontinuierlichen Betrieb durchgeführt.

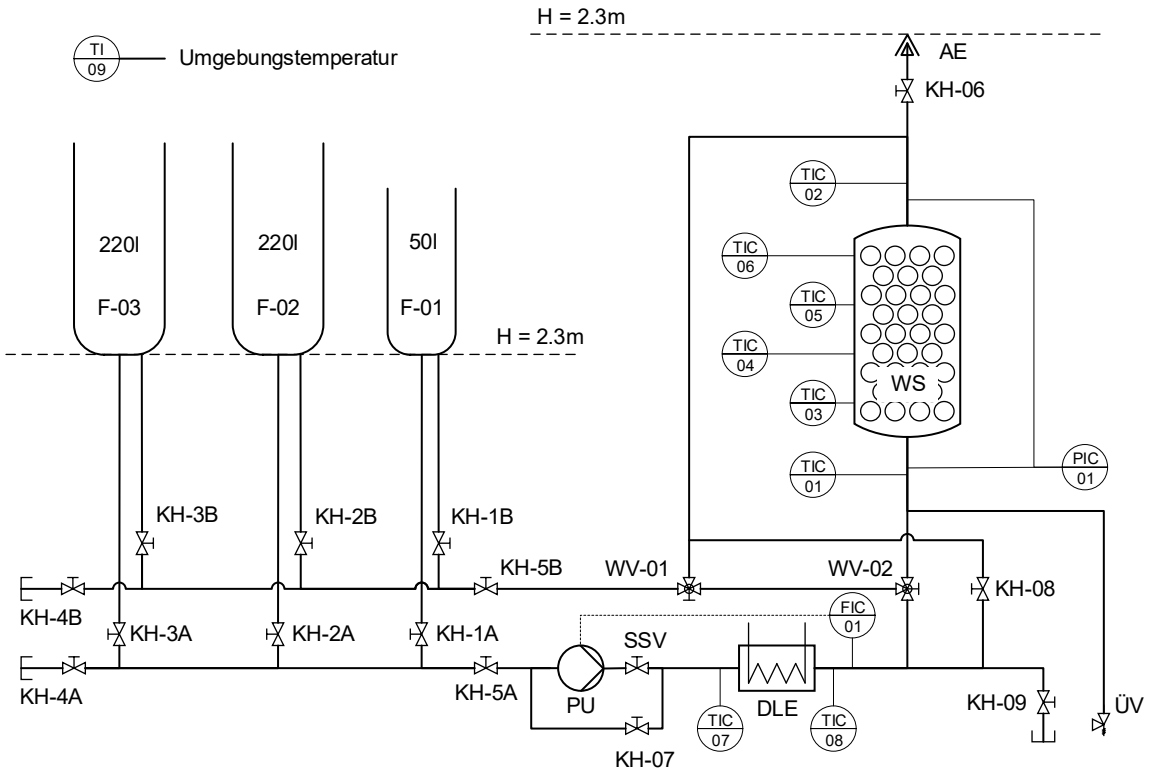
Das Vorkonditionieren (siehe Anhang A2, Abb. 18) kann auch als Laden eines Fasses betrachtet werden. Um Verwechslung auszuschliessen wird es jedoch im Folgenden als Vorkonditionieren bezeichnet. Bei dieser Betriebsart wird eines der grossen Fässer (F-02 oder F-03) auf eine vom Benutzer bestimmte Temperatur vorkonditioniert. Dabei zirkuliert das WTF durch den DLE und zurück ins Fass bis die gewünschte Temperatur im Fass erreicht ist. Die hydraulische Verschaltung kann beim Vorkonditionieren derart eingestellt werden, dass der Wärmespeicher nicht durchströmt wird.

Beim Entladen (siehe Anhang A2, Abb. 19) wird das, im vorkonditionierten Fass befindliche WTF durch den Wärmespeicher gepumpt, um einen Entladezyklus zu simulieren. Das aus dem WS ausströmende WTF wird in das zweite, zu Beginn des Zyklus noch leere, grosse Fass gefördert. Das Entladen erfolgt somit in einem diskontinuierlichen Batch-Betrieb. Für den Betrieb mit Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur können externe Kältequellen wie zum Beispiel ein Thermostat an das System angeschlossen werden.

Es ist zu beachten, dass das vorliegende Dokument nicht genügend Informationen zum Betreiben des Prüfstands enthält. Eine ausführliche Bedienungsanleitung zum Prüfstand liegt in einem separaten Dokument vor. In jenem Dokument werden auch die Stellungen der Kugelhähne (KH) und Wegventile (WV) für jeden Betriebsfall eindeutig beschrieben. Ergänzende Informationen für den Betrieb des Prüfstands, wie zum Beispiel das Befüllen des Systems, sind ebenfalls in jenem Dokument enthalten.

a)

b)



c)

Abb. 3: a) Foto von den Fässern (1-3) b) Foto des befüllten Wärmespeichers (6) ohne Kapseln in vertikaler Ausrichtung. Ebenfalls sichtbar ist die PU (4) und der DLE (5) c) Schema der hydraulischen Verschaltung des Prüfstands

3.1.2 Auslegung

Wie im vorhergehenden Kapitel 3.1.1 erwähnt, wurde anhand des Lastenhefts die hydraulische Verschaltung entworfen. Mit der hydraulischen Verschaltung und dem Lastenheft zusammen, wurden die Komponenten, Sensoren und Aktoren für den Prüfstand ausgewählt und dimensioniert.

Wärmespeicher und Rohrdimension
Der Wärmespeicher/Plexiglastank (siehe Anhang A3, Abb. 25) war die einzige Komponente, welche bereits zu Beginn der vorliegenden Arbeit vorhanden war. Der Ein- und Auslass des Plexiglastanks hat ein Rp 1 Innengewinde. Der Innendurchmesser des Gegenstückes ist somit 1" = 25.4mm. Weil der WS nicht bedruckbar ist und demnach möglichst wenig Druckverlust im System erzeugt werden sollte, wurde ein Innendurchmesser der Verrohrung, ähnlich dem von 1", von 25.6mm gewählt.

Durchflusserhitzer
Der Durchflusserhitzer wurde anhand des Lastenhefts (siehe Tabelle 1, Technische Daten) ausgewählt. Der DLE soll bei einer konstanten Leistung zwischen 1-10kW betrieben werden können. Die Leistung des gewählten DLE kann zwischen 0-10.5kW beliebig variiert werden. Die Ansteuerung erfolgt mittels eines analogen Eingangssignals von 0-10V oder 4-24mA.

Fässer
Die grossen Fässer F-02 und F-03 haben ein Volumen von 220l und das kleine Fass F-01 von 60l. Die Dimensionierung der grossen Fässer erfolgte anhand der Anforderung im Lastenheft, dass ein Volumenstrom von 16l/min für 10min (siehe Tabelle 1, Technische Daten) gewährleistet sein muss. Dies gibt ein Volumen von 160l. Da es nicht möglich ist, das Fass komplett leer zu pumpen und eine zusätzliche Reserve miteingerechnet werden sollte, wurden 220l Fässer gewählt. Das kleine Fass F-01 dient lediglich dazu, den Ladezyklus kontinuierlich in einem offenen System zu betreiben, deshalb genügt ein 60l Fass.

Lochblech
Wie in Kapitel 2.4 erwähnt, braucht ein Festbett-TES am Ein- und Austritt des Festbetts ein Lochblech, damit die Kapseln nicht vom WTF davon geschwemmt werden können. Wie im Lastenheft ersichtlich (siehe Tabelle 1, Technische Daten), muss das Lochblech drei Anforderungen erfüllen. (i) Der Druckverlust über die beiden Lochbleche am Ein- und Austritt muss kleiner sein als 0.5bar. (ii) Es muss Kapseln mit den Massen 10x20x40mm aufhalten. (iii) Das Lochblech muss einer mechanischen Beanspruchung von ca. 130kg standhalten. Diese Beanspruchung kommt zustande, wenn der WS mit den PCM-Kapseln befüllt wird. PCMs können eine Dichte von bis zu 2000kg/m^3 haben. Bei einer Packungsdichte des Festbetts von 70% ergibt dies ca. 130kg welche auf dem Lochblech lasten.

Für die Dimensionierung des Lochblechs wurde der Druckverlust über das Lochblech und die Festigkeitsberechnung iterativ vorgenommen. Die Berechnungen und Resultate werden nachfolgend aufgezeigt. Aufgrund der Verfügbarkeit des Lochblechs sowie den Berechnungen wurde das folgende Lochblech gewählt (siehe Tabelle 2). Um Rostbildung zu vermeiden wird Chromstahl verwendet.

Winkel der versetzten Reihen	60°
Lochdurchmesser d_h	5mm
Materialstärke s_{LB}	2mm
Teilung t_{LB}	8mm
Material	Chromstahl 1.4301

Tabelle 2: Abmessungen und Material des Lochblechs (Rundlochung in versetzten Reihen)

Die nachfolgenden Gleichungen und Korrelationen für die Berechnung des Druckverlusts stammen von Johann Stichlmair und wurden dem VDI-Wärmeatlas Kapitel L1.7 [7] entnommen. Die Basisgleichung für die Berechnung des Druckverlusts Δp_v von durchströmten Lochplatten lautet wie folgt:

$$\Delta p_v = \zeta \frac{\rho w_h^2}{2} \tag{3-1}$$

Wobei w_h die mittlere Geschwindigkeit des Fluids im engsten geometrischen Querschnitt und ρ die Dichte des Fluids ist. Der Verlustbeiwert ζ ist durch die Blendenformel

$$\zeta = \left(\frac{1}{\alpha_{LB}} - \varphi \right)^2 \quad \text{für } s_{LB}/d_h \to 0 \tag{3-2}$$

Gegeben, wobei α_{LB} die Kontraktionszahl und φ der relativ freie Querschnitt des Lochblechs ist. Stichlmair hat ebenfalls eine empirische Korrelation für den Verlustbeiwert ζ_{emp} erstellt, welche wie folgt definiert ist:

$$\zeta_{emp} = 2.67 + \varphi^2 - 2\varphi\sqrt{2.67} \quad \text{für } s_{LB}/d_h \to 0 \tag{3-3}$$

Die Berechnung des Druckverlusts über das Lochblech wird mittels Gleichung (3-1) durchgeführt. Als Verlustbeiwert wird einerseits Gleichung (3-2) aber auch die empirische Korrelation (3-3) verwendet. Das Resultat ist in Abb. 4 ersichtlich. Dargestellt wird der Druckverlust über das Lochblech als Funktion des Volumenstroms. Unabhängig von der verwendeten Gleichung/Korrelation kann der Druckverlust bei diesen Volumenströmen vernachlässigt werden. Der geringe Druckverlust ist auf die sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt des WS zurückzuführen.

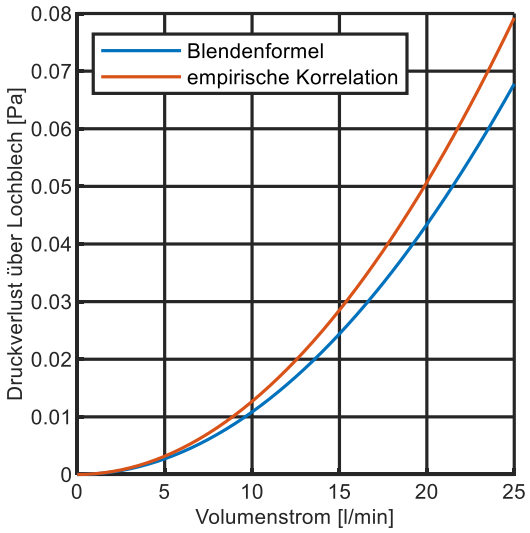


Abb. 4: Druckverlust als Funktion des Volumenstroms für das verwendete Lochblech

Die Festigkeitsberechnung wird mithilfe von Gleichung (3-4) durchgeführt und wurde dem DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau Kapitel C5.1.2 [8] entnommen. Die genannte Gleichung ist geltend für Kreisplatten (ohne Löcher) welche einen gelenkig gelagerten Rand aufweisen. Die maximalen Spannungen treten in Plattenmitte auf. Die maximale Radialspannung σ_r und maximale Tangentialspannung σ_t sind identisch.

$$\sigma_r = \sigma_t = 1.24 \frac{F}{A} \frac{R^2}{s^2} \tag{3-4}$$

Die Gewichtskraft F dividiert durch die belastete Fläche A ergibt die Flächenlast, welche auf dem Lochblech lastet. R beschrieb den Radius bis zum gelagerten Rand und s_{LB} wie Tabelle 2 aufgeführt die Materialstärke.

Um die maximale Spannung σ_{max}^{LB} des Lochblechs zu berechnen (3-5), wird ein zusätzlicher Korrekturfaktor k_{LB} einberechnet. Mit diesem Korrekturfaktor wird der tragende Teil des Materials auf den Anteil heruntergebrochen welcher nicht von den Löchern betroffen ist.

$$\sigma_{\max}^{LB} = \frac{\sigma_r}{k_{LB}} \text{ mit } k_{LB} = \frac{\cos(30°) \cdot t_{LB} - d_h}{t_{LB}} < 1 \tag{3-5}$$

Die maximale Spannung der Kreisplatte sowie die maximale Spannung σ_{max}^{LB} im Lochblech sind in Abb. 5 als Funktion der Materialstärke abgebildet. Zusätzlich sind die Streckgrenze und Zugfestigkeit abgetragen. Bei Überschreitung der Streckgrenze beginnt plastische Verformung aufzutreten. Bei Überschreitung der Zugfestigkeit versagt das Material.

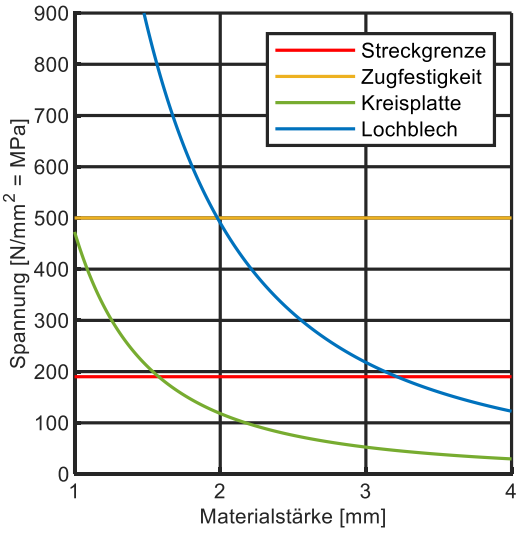


Abb. 5: rot und orange sind die Streckgrenze (190MPa) bzw. Zugfestigkeit (500MPa), blau und grün stellen die Spannungen als Funktion der Materialstärke für das verwendete Lochblech dar

In Abb. 5 ist ersichtlich, dass das gewählte Lochblech von einer Materialstärke von 2mm plastisch verformt wird und Materialversagen beinahe eintritt. Um ein Materialversagen mit Sicherheit ausschliessen zu können, wird das Lochblech zusätzlich verstärkt. Dafür wird unten und oben am Lochblech, rechtwinklig zu einander, ein flaches Aluprofil angeschraubt (siehe Abb. 6).

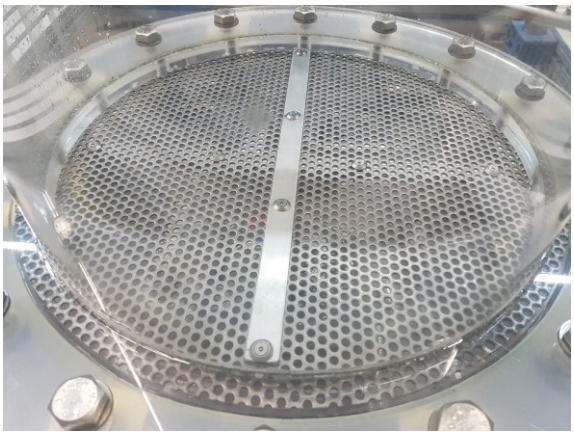


Abb. 6: Verbautes Lochblech im WS mit angeschraubten Aluprofilen zur Verstärkung

Volumenstrommessgerät
Das Volumenstrommessgerät wurde anhand der folgenden drei Anforderungen im Lastenheft ausgewählt (siehe Tabelle 1, Technische Daten). (i) Die Genauigkeit des Volumenstroms soll ±5% einstellbar sein. Der Volumenstrom wird anhand des gemessenen Volumenstroms des FIC geregelt. Was dazu führt, dass das Volumenstrommessgerät eine Genauigkeit von mind. ±5% haben muss. (ii) Es soll Temperaturen von 75°C standhalten, da das System bei Temperaturen von bis zu 75°C betreibbar sein soll. (iii) Die dritte Anforderung ist der messbare Volumenstrombereich von 5-20l/min. Das gewählte Volumenstrommessgerät hat eine mechatronische Funktionsweise und erfüllt alle Anforderungen.

Pumpe
Für die Dimensionierung der Pumpe mussten die Druckverluste über das komplette System abgeschätzt werden. Dazu wurden die Druckverluste infolge der Rohrreibung und der folgenden Einbauten/Elemente berücksichtigt. Das Lochblech, Festbett (Schüttung von PCM-Kapseln), Volumenstrommessgerät und den Einbauten wie zum Beispiel KH, T-Stücke, usw.

Die Druckverluste über das Lochblech wurden bereits im vorherigen Abschnitt «Lochblech» berechnet.

Die Druckverluste über das Festbett/die Schüttung von PCM-Kapseln wird nach dem Modell der Einzelpartikelumströmung für nicht kugelförmige Partikeln nach [7] berechnet. Für die Berechnung wurden Kapseln mit elliptischer Form und Aussenmassen von 10x20x40mm angenommen. Diese Annahme stützt sich auf den vom CC TES zu untersuchenden Kapseln. Die Packungsdichte des Festbetts ist nach Angaben vom CC TES ca. 70% unter Verwendung der soeben genannten Kapselgeometrie. Die Berechnungen der Druckverluste über die PCM-Schüttung in Abhängigkeit des Volumenstroms sind in Abb. 7 dargestellt. Wie bereits bei der Druckverlustsberechnung über das Lochblech, ist der Druckverlust über die Schüttung infolge der geringen Strömungsgeschwindigkeiten gering. Die in Kapitel 2.5 erläuterte experimentelle Arbeit im Bereich makroverkapselter Systeme stützt die Resultate der Druckverlustsberechnung über die Schüttung.

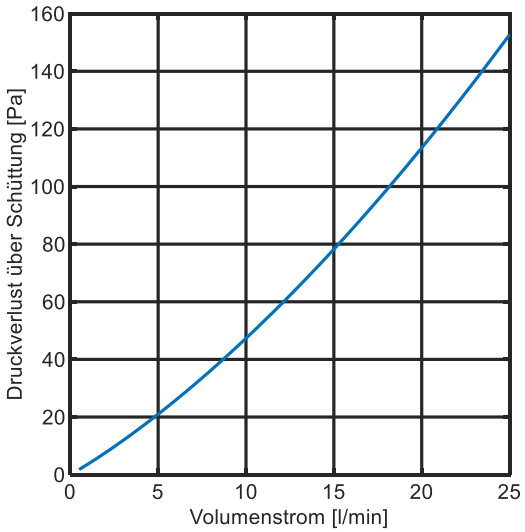


Abb. 7: Druckverlust über das Festbett/die Schüttung von PCM-Kapseln in Funktion vom Volumenstrom, elliptische Kapseln mit den Aussenmassen von 10x20x40mm und einer Packungsdichte des Festbetts von 70%

Der Druckverlust über das mechatronische Volumenstrommessgerät wurde dem Datenblatt [9] entnommen. Jener Druckverlust ist im Messbereich des FIC durch zwei nahezu lineare Druckverlustskurven gegeben und wurde für die Berechnungen mit 2 linearen Gleichungen approximiert. Auf den Druckverlust im Gesamtsystem hat das FIC einen signifikanten Einfluss wie in Abb. 8 ersichtlich ist.

Der Druckverlust des Gesamtsystems wird mit Gleichung (3-6) berechnet, wobei w_m die gemittelte Fluidgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt darstellt. Typischerweise wird der Druckverlust noch mit einem zweiten Term, demjenigen der Rohrreibung, berechnet. In diesem Falle werden jedoch die Verlustbeiwerte ζ pro Meter Rohr vom Hersteller angegeben, womit dieser Term entfällt.

$$\Delta p_v = \sum \zeta \frac{\rho w_m^2}{2} \tag{3-6}$$

Um den Druckverlust des Gesamtsystems zu errechnen wurden die einzelnen Druckverluste im System addiert. Das Resultat ist in Abb. 8 dargestellt. Die Hauptbetriebsarten sind einzeln dargestellt, weil jeder der Betriebsarten eine unterschiedliche Anzahl Einbauten besitzt. Trotzdem sind die Druckverluste der verschiedenen Betriebsarten im selben Grössenbereich. Anhand vom Druckverlust über das Gesamtsystem konnte die Pumpe ausgewählt werden.

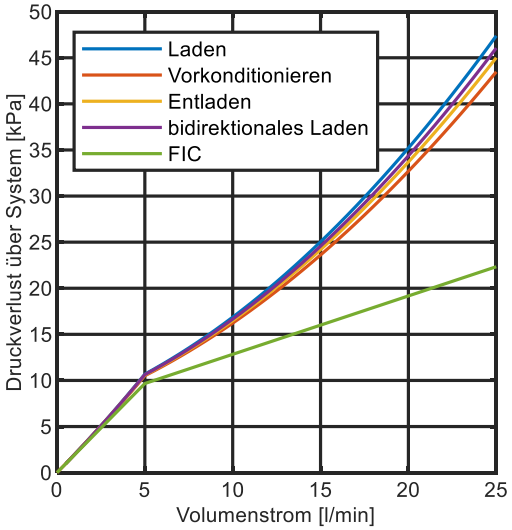


Abb. 8: Druckverlust über das Gesamtsystem bei verschiedenen Betriebsarten in Funktion vom Volumenstrom, der grüne Verlauf zeigt den Druckverlust von lediglich dem Volumenstrommessgerät an

3.1.3 Datentransfer, Sensoren und Aktoren

Das verwendete Datentransfersystem ist das sogenannte CompactDAQ-System von National Instruments. In einem CompactDAQ-System wird ein Chassis über USB oder Ethernet mit einem PC verbunden und anschließend mit einem oder mehreren Eingangs/Ausgangs-Modulen mit Signalkonditionierung bestückt, die den direkten Anschluss von Sensoren ermöglichen [10].

Die beim Prüfstand verwendeten Sensoren sind in Tabelle 3 aufgelistet. Bei den Temperatursensoren handelt es sich um PT100-A Sensoren mit 4-Leiter Technik. Dank der 4-Leiter Technik wird der Widerstand der Anschlussleitung, welcher das Messsignal negativ beeinflussen würde, kompensiert.

Bezeichnung	Sensortyp	Messbereich	NI-Modul	Messunsicherheit
TIC01…06 / T01…06	PT100, A-Klasse, 4-Leiter Technik	-35 … +105°C	NI-9217, RTD-Eingangsmodul	±(0,15°C+0,002T)
TIC07…08 / T07…08	PT100, A-Klasse, 4-Leiter Technik	-50 … +180°C	NI-9217, RTD-Eingangsmodul	±(0,15°C+0,002T)
TIC09 / T09	PT100, A-Klasse, 4-Leiter Technik	-35 … +105°C	NI-9216, RTD-Eingangsmodul	±(0,15°C+0,002T)
FIC01	Mechatronisches Volumenstrommessgerät	0.5 … 25l/min	NI-9201, Spannungseingang ±10V	±(4%MW+1%MEW)
PIC01	Differenzdrucksensor	10mbar…1bar	NI-9201, Spannungseingang ±10V	±0.1%

Tabelle 3: Sensorik des Prüfstands

Die verwendeten Aktoren sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Bezeichnung	Modell	Ausgabebereich	NI-Karte
PU	Radialpumpe, MAGNA3 25-100	Pumpenkenn-feld [11]	NI-9265, Stromausgabemodul 4-20mA NI-9472, digitales Ausgangsmodul 24V
DLE	2x5kW Heizelement à 3x400V	0…10kW	NI-9265, Stromausgabemodul 4-20mA

Tabelle 4: Aktoren des Prüfstands

3.2 Messunsicherheitsanalyse nach GUM

Die Messunsicherheitsanalyse nach GUM (Guide to the Uncertainty in Measurement) wird anhand des Skripts [12] von C. Gossweiler ausgeführt. GUM spricht nicht von Messfehlern, sondern von Messabweichungen.

Nach GUM sind die gemessenen Temperaturen in einer Rechteckverteilung angeordnet mit einem Intervall von $[a-; a+]$, welcher der Messunsicherheit wie in Tabelle 3 abgebildet entspricht. Die Umformung einer Rechteckverteilung mit der halben Breite a in eine Normalverteilung mit der Standardmessunsicherheit u erfolgt mit:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{3-7}$$

Weil es sich bei den Messunsicherheiten der einzelnen Temperaturmessungen um keine Fortpflanzung von Messunsicherheiten handelt, gilt für diesen Fall $u = u_c$ wobei u_c die kombinierte Standardmessunsicherheit ist. GUM verlangt für die Angabe der Messunsicherheit einen Vertrauensbereich von 95.5%. Deshalb wird aus der kombinierten Standardmessunsicherheit u_c mit dem Erweiterungsfaktor $k_{GUM} = 2$ die erweiterte Messunsicherheit U wie folgt berechnet.

$$U = k_{GUM} \cdot u_c \text{ mit } k_{GUM} = 2 \tag{3-8}$$

Die erweiterte Messunsicherheit U mit einem Vertrauensbereich von 95.5% wird durch die Errorbalken in allen Plots der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Um die Messunsicherheit der arithmetischen Mitteltemperatur von TIC03…TIC06 im WS bestimmen zu können wird die Gauss'sche Unsicherheitsfortpflanzung angewendet. Mit Gleichung (3-9) wird die kombinierte Standardmessunsicherheit u_c berechnet.

$$u_c = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} u_j \right)^2} \tag{3-9}$$

$$\text{mit } f = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \text{ und } x_{1...4} = TIC03...TIC06$$

Die partiellen Ableitungen der obigen Gleichung haben für die genannte Berechnung alle denselben Wert von ¼. Dies ist damit zu begründen, dass jede einzelne Temperaturmessung lediglich ein Mal pro Zeiteinheit (Abtastrate) ausgeführt wird. Nachdem u_c berechnet ist, wird mit dem Erweiterungsfaktor $k_{GUM} = 2$ die erweiterte Messunsicherheit U (3-8) berechnet. Die Errorbalken der Mitteltemperatur des WS werden auf diese Weise berechnet und in den Plots dargestellt.

3.3 Experimentelle Kampagne

Die experimentelle Kampagne beschreibt die Experimente, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden. Die durchgeführte experimentelle Kampagne wird in drei Teile unterteilt: Der Bestimmung der Wärmeverluste, der Bilanzierung der Energien während den Entladezyklen und der Quantifizierung des Mischverhalten. Die Resultate und Diskussionen der experimentellen Kampagne folgen in Kapitel 4.

In Tabelle 5 sind die durchgeführten Experimente aufgelistet. Jedes Experiment wurde zweifach ausgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu beurteilen (gekennzeichnet mit a und b). Experiment Nr.1 wurde durchgeführt, um die Wärmeverluste des WS bestimmen zu können. In jenem Experiment wurde die Abkühlkurve des WS gemessen. Bei Experiment Nr.2 bis Nr.7 wurden jeweils Entladevorgänge bei unterschiedlichen Bedingungen gemessen (siehe Tabelle 5). Die Entladevorgänge wurden jeweils diskontinuierlich, im Batch-Betrieb durchgeführt.

Nr.	Zweck	Einströmrichtung beim Entladen	Ausrichtung WS	Volumenstrom [l/min]	Ladetemperatur [°C]	Entladetemperatur [°C]
1a 1b	Bestimmung der Wärmeverluste	-	vertikal	0	65	-
2a 2b	Energiebilanz und Quantifizierung des Mischverhaltens	normal (von Seite TIC01)	vertikal	10	65	35
3a 3b		normal (von Seite TIC01)	vertikal	16	65	35
4a 4b		entgegengesetzt (von Seite TIC02)	vertikal	10	65	35
5a 5b		entgegengesetzt (von Seite TIC02)	vertikal	16	65	35
6a 6b		normal (von Seite TIC01)	horizontal	10	65	35
7a 7b		entgegengesetzt (von Seite TIC02)	horizontal	16	65	35

Tabelle 5: Tabelle mit experimenteller Kampagne, jedes Experiment wird wiederholt, die zweite/wiederholte Durchführung desselben Experiments ist am Buchstaben b hinter der Nummer erkennbar

Die Systemgrenze des Prüfstands (Abb. 9) wird bei allen durchgeführten Experimenten auf den WS beschränkt. Dies ist damit zu begründen, dass die Vorgänge von Interesse im WS ablaufen. So wäre es unsinnig, die Systemgrenze grösser als erforderlich zu wählen. Zur Bestimmung des Wärmeverlusts, der Energie- und Entropiebilanz werden die Temperaturen und der Massenstrom bzw. der Volumenstrom an der Systemgrenze ermittelt. Zusätzlich wird die mittlere WS-Temperatur mittels vier Sensoren im WS gemessen. Die vier PT100 Temperatursensoren sind gleichmässig über die Höhe vom Plexiglaszylinder des WS angebracht und ragen 150-200mm in den WS hinein. Bei allen Experimenten wurde mit einer Abtastrate von $\Delta t = 1\ Hz$ gemessen. Temperaturabhängige Stoffwerte wie die spezifische Wärmekapazität c_p, spezifische Enthalpie h, spezifische Entropie s und Dichte ρ wurden aus der Stoffdatenbank CoolProp[13], mit realen Stoffwerten ausgelesen. Die in das System eintretenden Energieströme werden als positiv, die austretenden als negativ betrachtet. Wenn das System entgegengesetzt betrieben wird, strömt das WTF von der Seite ein, auf welcher sich der Temperatursensor TIC02 befindet.

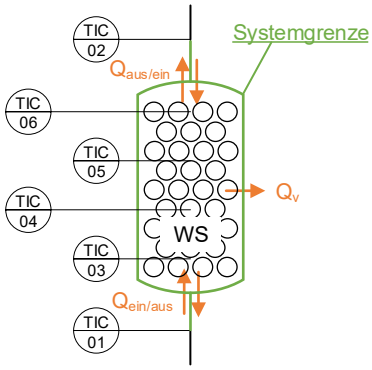


Abb. 9: Graphische Darstellung der Systemgrenze, die Richtung von $Q_{ein/aus}$ ändert sich je nach Strömungsrichtung

3.3.1 Bestimmung der Wärmeverluste

Um das System zu bilanzieren, müssen die Wärmeverluste des betrachteten Systems bekannt sein. Um die Wärmeverluste zu bestimmen, wurde der WS auf eine Temperatur von 65°C geladen. Anschliessend wurde er bei Raumtemperatur stehen gelassen, um die Abkühlkurve des WS zu messen. Mithilfe des Newtonschen Abkühlungsgesetz [14] wurde Formel (3-10) hergeleitet. Diese Formel beschreibt die Temperatur als Funktion der Zeit eines sich abkühlenden Körpers. Dabei ist ϑ_{umg} die Umgebungstemperatur und ϑ_0 die Temperatur des Körpers bei $t = 0$. k ist der Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert), A die Fläche des WS, m die im WS enthaltene Masse an Wasser und c_p die spezifische Wärmekapazität des Wassers. Obwohl der WS eine zylindrische Form aufweist, mit je einem Konus als Ein- und Auslass, wurde für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten k (3-11) vereinfacht eine ebene Wand betrachtet. Dabei sind α_i und α_a die Wärmeübergangskoeffizienten (α-Wert) innen resp. aussen am WS, δ die Dicke und λ_{plexi} die Wärmeleitfähigkeit des WS(Plexiglases).

$$\vartheta(t) = \vartheta_{umg} + (\vartheta_0 - \vartheta_{umg})e^{-a \cdot t} \text{ mit } a = \frac{kA}{mc_p} \tag{3-10}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda_{plexi}} + \frac{1}{\alpha_a}} \tag{3-11}$$

Die gemessene sowie die berechnete Abkühlkurve, wurden in einem gemeinsamen Plot abgebildet. Die dafür verwendeten Parameter A, m, c_p von a (3-10) wurden berechnet oder mittels CoolProp ausgelesen. Um den k-Wert in erster Näherung zu bestimmen, wurden Schätzungen der α-Werte aus der Literatur entnommen. Mit diesen Schätzungen wurde ein Curve-Fitting durgeführt mit anschliessender Parameterstudie. Bei der Parameterstudie wurden die beiden α-Werte (innen und aussen) variiert. Mit dieser Vorgehensweise konnte der kleinste RMSE (Root-mean-squared error) zwischen der berechneten und der gemessenen Temperatur gefunden werden. Daraus folgten die realen α-Werte sowie der daraus berechnete reale k-Wert des WS.

Der Wärmeverluststrom $\dot{Q}_{Verlust}$ über den WS bei einer mittleren WS-Temperatur $\vartheta_{ws}(t)$ ist durch die folgende Gleichung (3-12) gegeben.

$$\dot{Q} \qquad l\left(\vartheta_{ws}(t) - \vartheta_{umg}\right) \tag{3-12}$$

3.3.2 Energiebilanz

Um eine Aussage über die Genauigkeit des Prüfstands bei den durchgeführten Messungen zu tätigen, wird eine Energiebilanz erstellt. Die Energiebilanz wird aufgrund der Temperaturen und dem Massenstrom $\dot{m}$ an den Systemgrenzen berechnet sowie aufgrund der Änderung der Energiemenge im System vor und nach dem Entladezyklus.

Es werden zwei Wärmemengen Q^{01} und Q^{02} miteinander verglichen. Die Wärmemenge Q^{01} (3-13) ist die Differenz zwischen zwei Zustandsgrössen; der Wärmeenergie des Systems vor und nach dem Entladezyklus. Die Wärmemenge Q^{02} (3-15) wird anhand des Wärmestroms $\dot{Q}_{tot}$ (3-14) und des Wärmeverluststroms $\dot{Q}_{Verlust}$ (3-12) berechnet. Q^{02} stellt somit die aufsummierte Differenz zwischen den ein- und austretenden Prozessgrössen, den Wärmemengen dar.

$$Q^{01} = m_{WS} \cdot \left(h_{WS,0} - h_{WS,ende} \right) \tag{3-13}$$

$$\dot{Q} \quad \cdot \quad - h(\vartheta_{\omega}) \Big] \tag{3-14}$$

$$Q^{02} = \left(\sum \dot{Q} \quad _ \quad \cdot \quad , \right. \tag{3-15}$$

Theoretisch müssen die beiden Wärmemengen Q^{01} und Q^{02} denselben Wert besitzen. Denn die Änderung der Zustandsgrösse des Systems, muss gleich der Differenz der ein- und austretenden Prozessgrössen sein.

3.3.3 Quantifizierung des Mischverhaltens

In diesem Abschnitt wird mittels der Entropiebilanzierung das Mischverhalten der einzelnen Experimente quantifiziert. Eine gute Temperaturschichtung führt zu einer niedrigen Entropieproduktion. Die Systemgrenze ist dabei dieselbige wie in Kap. 3.3 erläutert. Die Vorgehensweise dieses Unterkapitels orientiert sich am Schlussbericht von Haller et al. [15], welcher im Auftrag vom Bundesamt für Energie verfasst wurde.

Die Differenz der ein- und austretenden Entropieströme $\dot{S}_{tot}$ (3-16) werden aufgrund der Temperaturen und dem Massenstrom an den Systemgrenzen berechnet. Der mit dem Wärmeverluststrom austretende Entropiestrom $\dot{S}_{Verlust}$ (3-17) lässt sich mit dem Wärmeverluststrom und der mittleren WS-Temperatur T_{WS} berechnen. Anschliessen werden die zu jedem Zeitschritt Δt berechneten Entropieströme aufsummiert (3-18).

$$\dot{\quad} \quad \cdot \quad - s(\vartheta_{\alpha}) \Big] \tag{3-16}$$

$$\dot{\quad} \quad \cdot \quad \overline{\Gamma_{WS}(t)} \tag{3-17}$$

$$\Delta S = \sum_{i} \dot{\quad} \tag{3-18}$$

Um die Entropieproduktion des Systems zu berechnen, muss die Änderung zwischen der Entropie vor und nach dem Entladezyklus im System ΔS_{WS} ebenfalls bekannt sein, und wird wie folgt berechnet:

$$\Delta S_{WS} = m_{WS} \cdot \left(s_{WS,ende} - s_{WS,0} \right) \tag{3-19}$$

Die irreversible Entropieproduktion des untersuchten Systems wird wie folgt berechnet:

$$\Delta S_{irr,\exp} = \Delta S_{WS} + \Delta S_{tot} + \Delta S_{Verlust} \tag{3-20}$$

Um eine dimensionslose Grösse als Ergebnis zu erhalten, wird die Schichtungseffizienz (ζ_{sch}) mit der Gleichung (3-21) berechnet. Diese lässt sich mit der experimentell bestimmten Entropieproduktion des einzelnen Experiments ($\Delta S_{irr,exp}$) und einer Referenzgrösse berechnen. Die Referenzgrösse ($\Delta S_{irr,mix}$) beschreibt die Entropieproduktion desselben Experiments für den Fall, dass dieses bei jedem Zeitschritt vollständig durchmischt wird.

$$\zeta_{sch} = 1 - \frac{\Delta S_{irr,\exp}}{\Delta S_{irr,mix}} \tag{3-21}$$

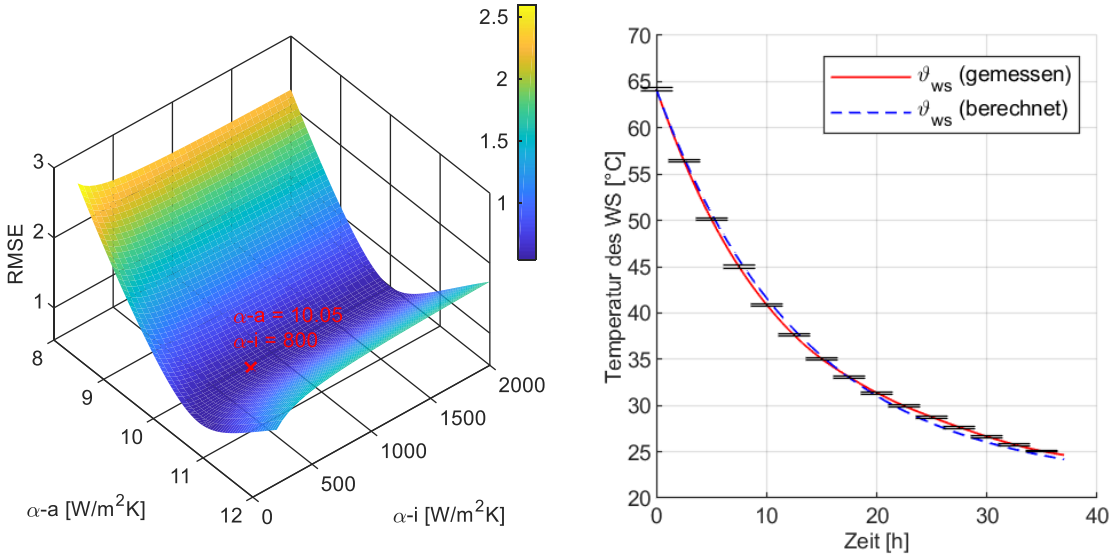
Um das Misch- und Strömungsverhalten qualitativ zu untersuchen wird bei den Entladezyklen von Experiment Nr.3b, Nr.5b und Nr.7b Lebensmittelfarbe dem WTF zugegeben. Ebenfalls kann anhand dieser Strömungsvisualisierung die berechneten Schichtungseffizienzen auf deren Plausibilität überprüft werden.

4 Resultat und Diskussion

Das folgende Kapitel zeigt die Resultate der experimentellen Kampagne (Kap. 3.3). Die Errorbalken der Plots wurden mittels der Messunsicherheitsanalyse nach GUM (Kapitel 3.2) errechnet. Bei Plots mit mehreren Temperaturverläufen, ist Übersichtshalber lediglich jene von TIC05a mit Errorbalken angegeben. Die Messunsicherheiten der anderen Messungen sind bei denselben Temperaturen äquivalent.

4.1 Bestimmung der Wärmeverluste

Abb. 10a zeigt den 3-D-Plot der Parameterstudie für die Ermittlung der realen α-Werte. Die Z-Achse zeigt den RMSE zwischen der gemessenen und berechneten Abkühlkurve in Abhängigkeit der beiden α-Werte innen und aussen am WS. Das rote Kreuz in Abb. 10a befindet sich an der Stelle des kleinsten RMSE mit den Werten α-aussen = 10.05 W/(m^{2}K) und α-innen = 800 W/(m^{2}K). Mit Gleichung (3-11) für den k-Wert über eine ebene Wand ergibt sich ein k-Wert von 7.71 W/(m^{2}K). Der Vergleich zwischen gemessener und mit dem ermittelten k-Wert berechneter Abkühlkurve ist in Abb. 10b ersichtlich. Die Abkühlkurve zeigt den Temperaturverlauf der mittleren Temperatur des WS, in Abhängigkeit der Zeit.



a) *b)*

Abb. 10: a) Parameterstudie mit Variation von α-innen und α-aussen, zu sehen ist der RMS-Error b) Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Temperaturverlauf beim Abkühlen des WS mit ermittelten Alpha-Werten resp. k-Wert

Der Wärmeverluststrom $\dot{Q}_{Verlust}$ über die Systemgrenze, ist in Abb. 11 in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer WS-Temperatur und Umgebungstemperatur geplottet.

In Abb. 10b ist ersichtlich, dass die gemessene Temperatur bis $t \approx 17h$ unterhalb, danach oberhalb der berechneten Temperatur liegt. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten ist die folgende: Die Umgebungstemperatur bei der Berechnung der Abkühlkurve wurde als Konstante angenommen. In Realität ist die Temperatur über Nacht etwas kühler und wird im Verlauf des Vormittags wieder wärmer. Die gemessene Kurve bildet dieses Verhalten mit einer schneller, oder langsamer fallenden Temperatur ab. Die Messung wurde um 18.30 Uhr gestartet. Über Nacht fällt die Temperatur schneller, weil die Raumtemperatur gefallen ist. Nach $t \approx 17h$, am Vormittag um 11.30Uhr schneidet die gemessene Kurve, die berechnete Kurve und fällt aufgrund der wieder erhöhten Temperatur der Umgebung weniger schnell ab. Konvektion, ob natürlich oder erzwungen wie z.B. bei Durchzug infolge offener Fenster, sind nebst den schwankenden Temperaturen ebenfalls mögliche Störfaktoren.

Die Vereinfachung den WS für die Berechnung des k-Wertes als ebene Wand zu betrachten, kann in Frage gestellt werden. Aufgrund des grossen Durchmessers und der geringen Wandstärke des Plexiglastanks wird angenommen, dass der Fehler dieser Vereinfachung gering ist. Um diese Annahme zu bestätigen wurde der k-Wert des Zylinders auf die vereinfachte und korrekte Variante gerechnet. Der Fehler liegt lediglich bei 1% und ist somit vernachlässigbar.

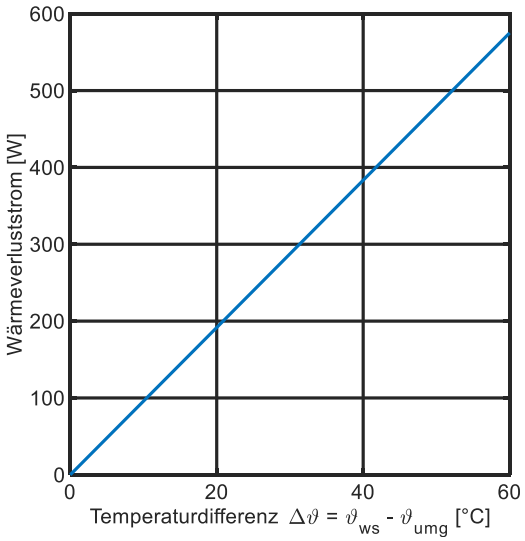


Abb. 11: Wärmeverluste in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen WS und Umgebung

4.2 Energiebilanz

In Tabelle 6 ist die numerische Auswertung der Energiebilanz aufgelistet. Es wurden die einzelnen Wärmemengen Q^{01} und Q^{02} berechnet, sowie die Differenz davon. In der Theorie tritt keine Differenz der zwei betrachteten Wärmemengen Q^{01} und Q^{02} auf. Ebenfalls wurde eine prozentuale Abweichung von Q^{01} zu Q^{02}, und der Anteil von $Q_{Verlust}$ in Bezug auf Q^{02} berechnet.

Experiment Nr.	Q^{01} [MJ]	Q^{02} [MJ]	$Q^{02} - Q^{01}$ [MJ]	$(Q^{02} - Q^{01})/Q^{02}$ Abweichung von Q^{01} zu Q^{02} in Bezug auf Q^{02} [%]	$Q_{Verlust}/Q^{02}$ Anteil $Q_{Verlust}$ in Bezug auf Q^{02} [%]
2a	-13.11	-14.20	-1.089	7.666	1.650
2b	-12.66	-13.57	-0.9120	6.719	1.746
3a	-12.64	-13.08	-0.4410	3.371	1.145
3b	-12.42	-12.80	-0.3766	2.941	1.141
4a	-10.38	-11.24	-0.8657	7.700	2.528
4b	-10.10	-10.80	-0.6916	6.406	2.613
5a	-10.21	-10.73	-0.5152	4.803	1.638
5b	-10.42	-10.79	-0.3646	3.380	1.598
6a	-9.940	-9.857	0.08272	-0.8392	2.956
6b	-9.961	-9-954	0.007043	-0.07075	2.931
7a	-10.24	-8.304	1.934	-23.29	2.127
7b	-10.46	-8.565	1.895	-22.13	2.057

Tabelle 6: Tabelle mit numerischer Auswertung der Energiebilanz

Im ausführlichen Lastenheft (Anhang A1) wurde festgehalten, dass die Wärmeverluste während einer Lade- und Entladesequenz < 3% sein müssen. In Tabelle 6 ist die prozentuale Abweichung einzelner Entladesequenzen aufgelistet und zeigt, dass die Wärmeverluste sich in einem Bereich von 1.14% bis 2.96% eines Entladezyklus bewegen.

Die Plots in Abb. 12 bis Abb. 14 *a) & b)* zeigen die Temperaturverläufe bei den Entladezyklen in Abhängigkeit der Zeit. Der Start des geplotteten Abschnitts ist jener, bei dem der Volumenstrom dessen Sollwert das erste Mal erreicht. Das Ende des Plots ist erreicht, wenn ein WTF-Volumen von 170l durch den WS gefördert wurde. Der komplette Wärmespeicher, inklusive Ein- und Auslauf besitzt ein Volumen von 110l.

Die Plots in Abb. 12 bis Abb. 14 *c) & d)* zeigen die graphische Darstellung der in Tabelle 6 berechneten Wärmemengen Q^{01} und Q^{02} in Abhängigkeit der Zeit. Der Start und das Ende der geplotteten Abschnitte sind dabei die selbigen wie oben erläutert.

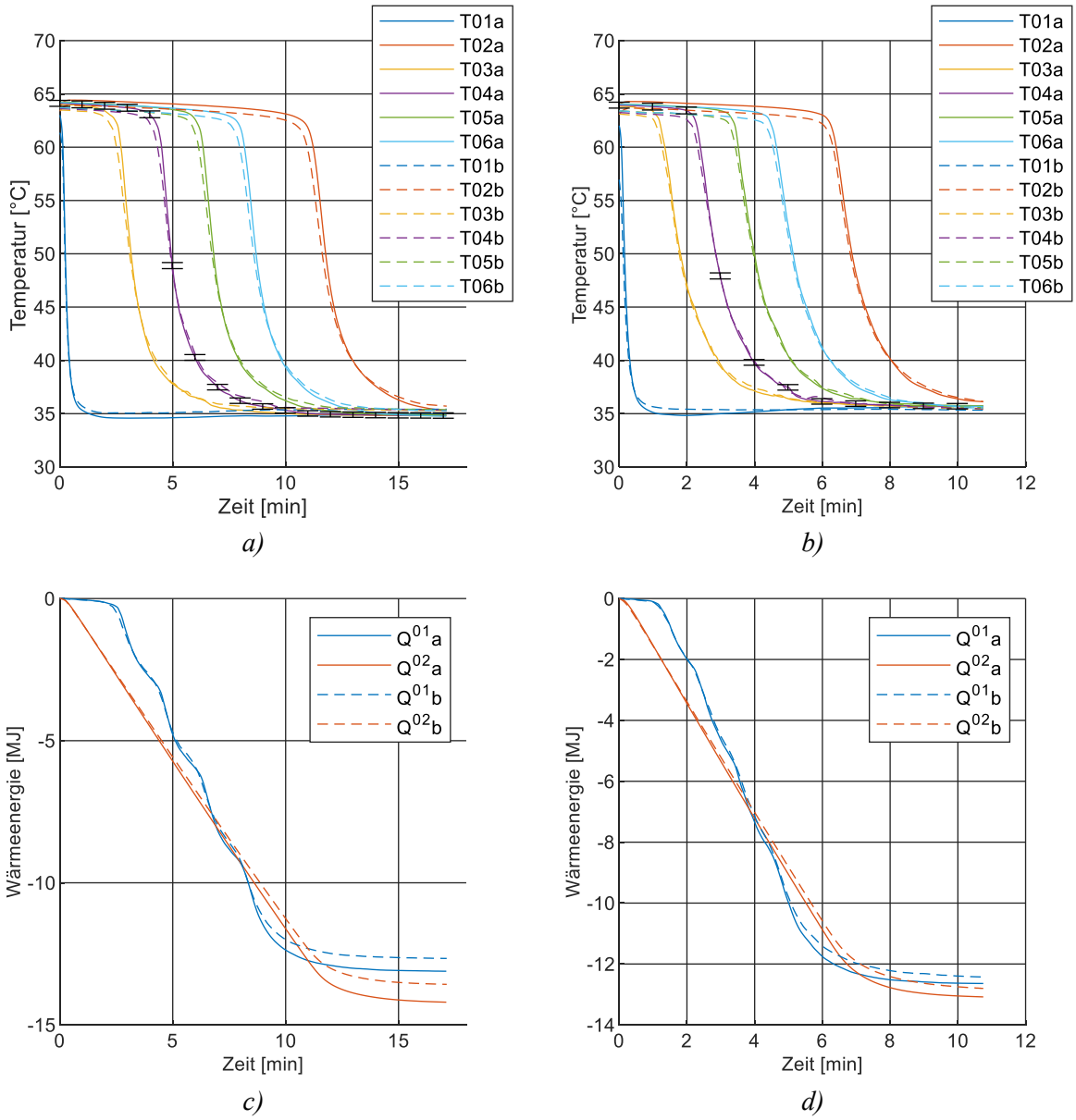


Abb. 12: a) & c) Experiment Nr.2a,b b) & d) Experiment Nr.3a,b

Abb. 12 zeigt die Experimente Nr.2 und Nr.3 bei welchen das WTF von unten bei TIC01 (T01) in den WS einströmt. Bei den Temperaturverläufen ist zu sehen, dass sich die Temperaturen T02 bis T06 gestaffelt nach einander absenken bis alle auf ca. 35°C gefallen sind. Dies ist mit dem Dichteunterschied des WTF zu beschreiben. Das von unten einströmende kältere WTF besitzt eine grössere Dichte als das WTF im geladenen WS. Dadurch gibt es eine eindeutige Schichtung der unterschiedlichen Temperaturen. Deutlich erkennbar ist die Schichtung in der Strömungsvisualisierung (siehe Abb. 16, Kap. 3.3.3). Das von unten einströmende kältere WTF stösst das wärmere sich im Speicher befindliche Wasser aus dem WS, solange bis der Entladezyklus beendet ist. Wird Abb. 12a (10l/min) mit Abb. 12b (16l/min) verglichen, zeigt sich ein identischer Kurvenverlauf. Daraus ist zu schliessen, dass trotz höher Fliessgeschwindigkeit bei 16l/min nicht genügend Durchmischung entsteht, um die Schichtung zu zerstören.

Bei den Plots der Wärmeenergien (Abb. 12c,d) sowie auch in Tabelle 6 ersichtlich, liegt die Differenz der beiden Wärmemengen $Q^{02} - Q^{01}$ bei Experiment Nr.2 und Nr.3 bei ca. 7% resp. 3%. Eine Ursache dieser Differenz ist mit der Ungenauigkeit des Volumenstrommessgeräts zu begründen. Bei der Auswertung der Messdaten zeigte sich folgendes: Wird ein kleinerer Volumenstrom gemessen als tatsächlich vorhanden, so wäre der Betrag von Q^{02}, bei einer Messung ohne Fehler grösser. Andersrum bedeutet das, dass wenn ein grösserer Volumenstrom als tatsächlich vorhanden gemessen wird, so wäre der tatsächliche Betrag von Q^{02} kleiner. Das bedeutet, dass die Messungen des Volumenstroms der Experimente Nr.2 bis Nr.5 grösser sind als der tatsächliche, reale Volumenstrom (siehe Abb. 12 und Abb. 13 *c) & d)*). Bei den Experimenten Nr.3 und Nr.5 wurde eine kleinere Differenz von $Q^{02} - Q^{01}$ gemessen, verglichen zu Experimenten Nr.2 und Nr.4. Daraus folgt, dass das Volumenstrommessgerät bei einem grösseren Volumenstrom von 16l/min genauere Messwerte liefert.

An dieser Stelle zeigt sich, dass eine vollumfängliche Messunsicherheitsanalyse mit Gauss'scher Unsicherheitsfortpflanzung Sinnvoll wäre. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit musste wegen fehlenden Zeitressourcen darauf verzichtet werden. Trotzdem wird bei der Auswertung der Messergebnisse in Folge der grossen Abweichungen von Q^{02} zu Q^{01} bereits an dieser Stelle klar, dass das verwendete Volumenstrommessgerät eine zu grosse Messunsicherheit aufweist. Folglich wird empfohlen das verwendete Volumenstrommessgerät durch ein genaueres zu ersetzen.

Abb. 13 zeigt die Experimente Nr.4 und Nr.5 bei welchen das WTF von oben bei TIC02 (T02) in den WS einströmt. Infolge der Dichteunterschiede fällt das einströmende WTF durch den WS hindurch und führt zu einer Durchmischung. Dieses Verhalten ist anhand der Temperaturverläufe in Abb. 13a,b zu erkennen. Dies lässt sich mit der Strömungsvisualisierung (siehe Abb. 16, Kap. 3.3.3) bestätigen. Bemerkenswert ist der direkte Vergleich zwischen den beiden Einströmrichtungen in der genannten Abbildung.

Abb. 14a zeigt Experiment Nr.6 bei dem das WTF seitlich bei TIC01 (T01) einströmt und Experiment Nr.7 (Abb. 14a) bei dem das WTF seitlich bei TIC02 (T02) einströmt. Es ist anzumerken, dass sich die Sensorspitze von T03 und T06 aufgrund der grösseren Sensorlänge unterhalb der Sensorspitze von T04 und T05 befinden. Alle Sensoren befinden sich in der oberen Hälfte des WS, wobei die Sensorspitzen etwa in der Mitte des WS liegen. Der Höhenunterschied und die Position der Temperatursensoren im horizontalen Betrieb ist, in Abb. 16, Kap. 3.3.3 ersichtlich. Wird der Temperaturverlauf von Experiment Nr.6 mit Nr.7 verglichen ist zu beobachten, dass diese sich nicht gleich verhalten. Trotz der Symmetrie des WS im horizontalen Betrieb kann beobachtet werden, dass sich die Entladevorgänge nicht gleich, resp. nicht lediglich seitenverkehrt verhalten. Bei Experiment Nr.7 (siehe Abb. 13b) strömt das WTF seitlich ein und fliesst aufgrund des Dichteunterschiedes unten in den WS hinein. Folglich strömt bereits ein kälteres Gemisch wieder aus dem WS aus, bevor die im Tank gemessenen Temperaturen sich merklich absenken. Dieses Verhalten ist in der Strömungsvisualisierung (siehe Abb. 16, Kap. 3.3.3) deutlich erkennbar. Bei Experiment Nr.6 (siehe Abb. 13a) ist ein ähnliches, dennoch nicht identisches Verhalten zu erkennen. Hierbei messen die tieferliegenden Temperatursensoren T03 und T06 bereits von Beginn an ungefähr dieselbe Temperatur wie am Austritt. Es wird angenommen, dass bei Experiment Nr.06 die Durchmischung im WS ausgeprägter stattfindet. Da die Strömungsgeschwindigkeit bei Experiment Nr. 07 höher ist, sollte bei jenem Experiment grössere Durchmischung festzustellen sein, was sich jedoch

nicht bestätigen lässt. Eine mögliche Begründung wäre, dass die mechanische Verstärkung des Lochgitters mittels der angeschraubten Alu-Flachprofile (siehe Abb. 6, Kap. 3.1.2) die Durchmischung bei Experiment Nr.6 erhöht.

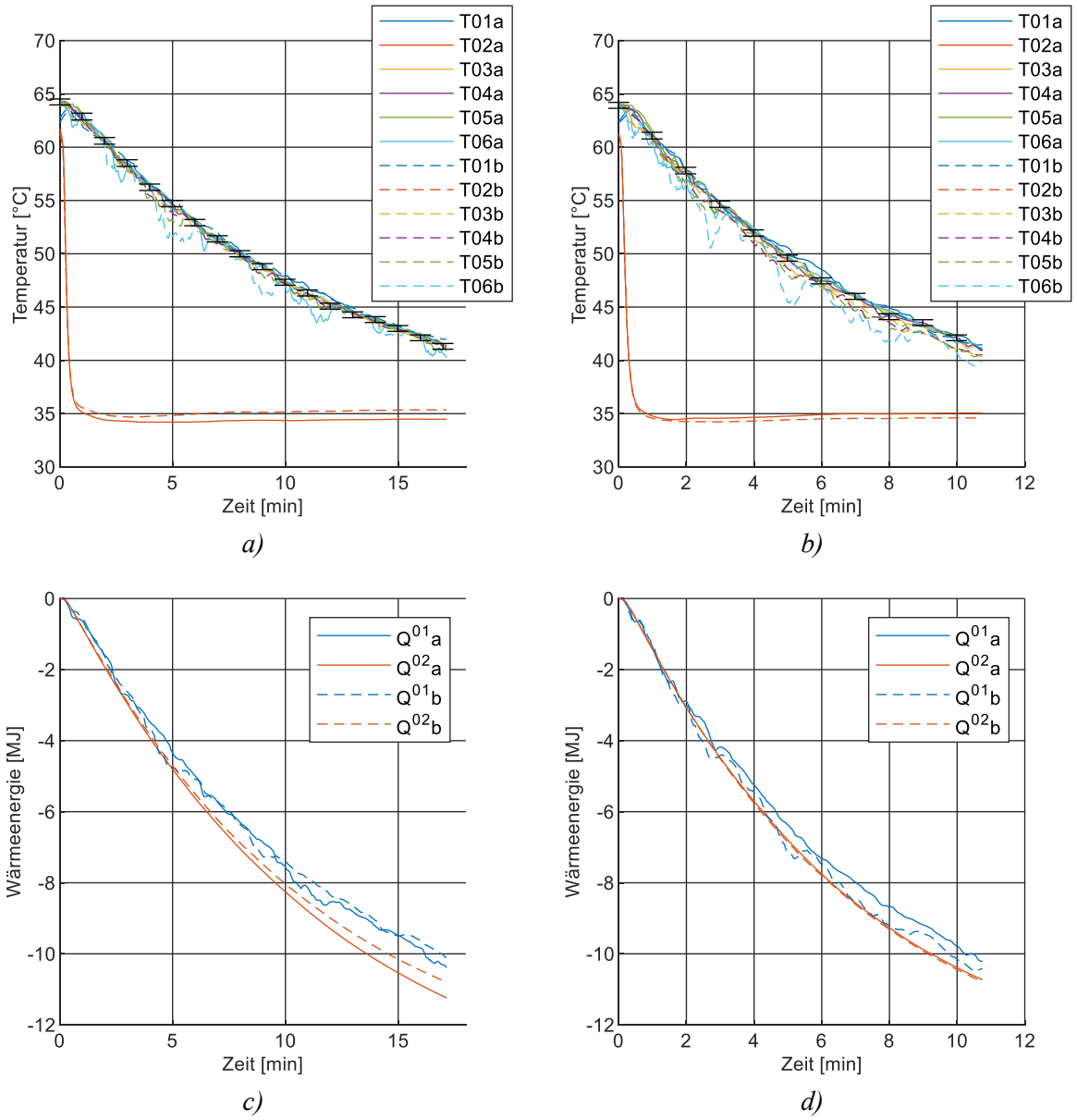


Abb. 13: a) & c) Experiment Nr.4a,b b) & d) Experiment Nr.5a,b

Wie bereits erwähnt, werden die Temperaturen im horizontalen Betrieb (Experiment Nr.6 und Nr.7) in der oberen Hälfte des WS gemessen. Dies führt dazu, dass die Berechnung der Zustandsgrösse, dem Energieinhalt des WS verfälscht wird. Aufgrund der Dichteunterschiede gibt es während der Lade- und Entladezyklen eine Temperaturschichtung. Dies konnte anhand einer Oberflächenmessung mittels Infrarot-Sensoren für berührungslose Temperaturmessung bestätigt werden. So war zum Beispiel bei Experiment Nr.7a die Oberflächentemperatur des WS am Ende des Entladezyklus 51.7°C oben und 36.7°C unten. Folglich kann die Temperaturmessung im horizontalen Betrieb nicht als repräsentative Temperatur des WS gewertet werden. Somit ist die Berechnung der Wärmemengen Q^{01} sowie die mittels Q^{01} berechneten Werte bei Experiment Nr.6 und Nr.7 nicht aussagekräftig. Die Messung der Wärmemenge Q^{02} ist davon nicht betroffen, weil diese anhand der Prozessgrössen gemessen wird. Um eine repräsentative Mitteltemperatur im WS zu erhalten, müssten die Sensoren anders angeordnet werden.

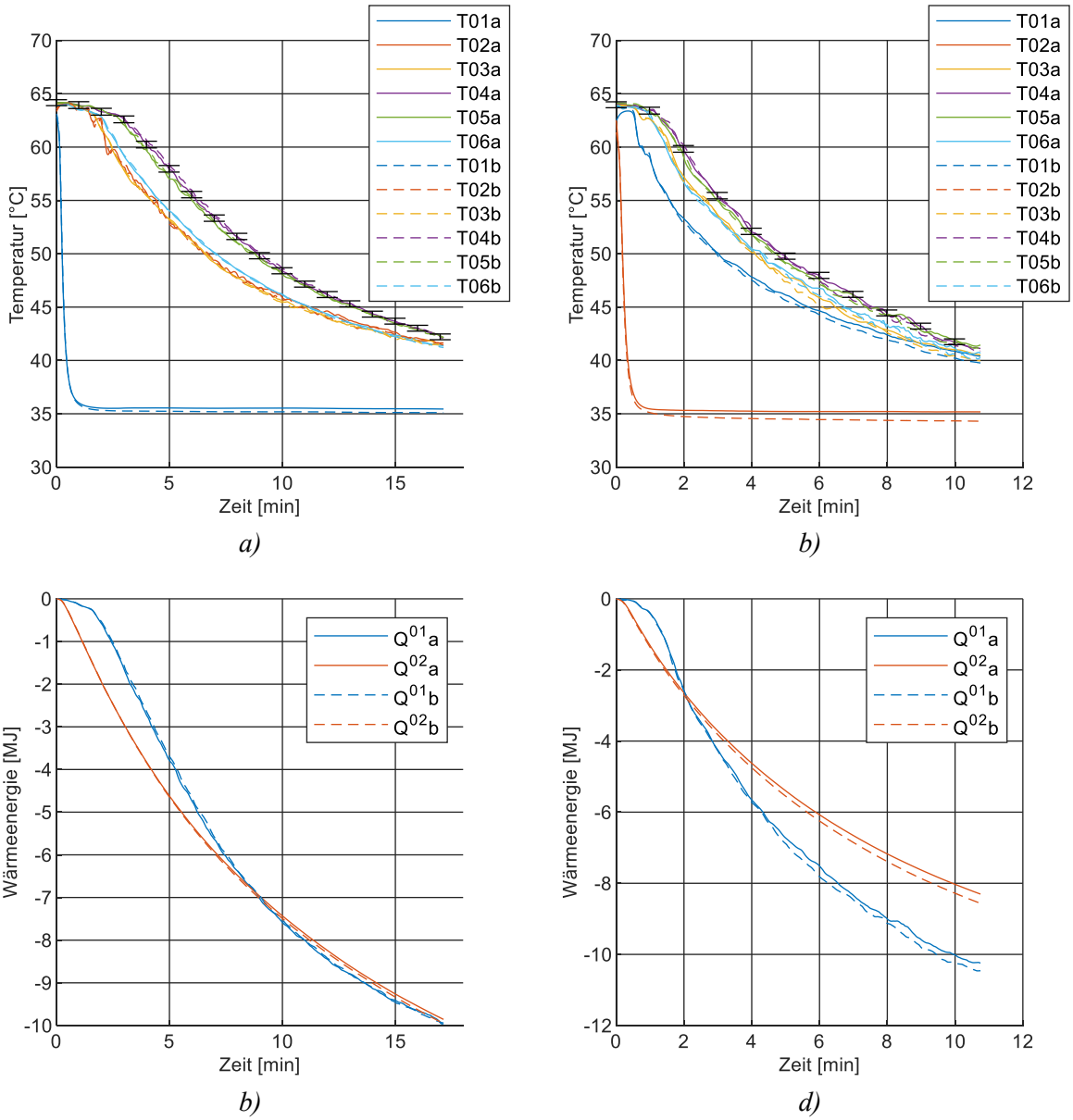


Abb. 14: a) & c) Experiment Nr.6a,b b) & d) Experiment Nr.7a,b

4.3 Quantifizierung des Mischverhaltens

Tabelle 7 zeigt die numerische Auswertung der Entropiebilanzierung. Eine Schichtungseffizienz ζ_{sch} von 100% entspricht dabei dem idealen reversiblen, das heisst isentropen, Prozess. Demzufolge sind Werte ≥ 100% aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik nicht möglich. Eine Schichtungseffizienz von 0% entspricht einem Prozess, der gleich viel Entropie produziert wie der Referenzfall $\Delta S_{irr,mix}$ bei dem eine vollständige Durchmischung auftritt.

Experiment Nr.	$\Delta S_{irr,exp}$ [kJ/K]	$\Delta S_{irr,mix}$ [kJ/K]	ζ_{sch} [%]
2a	3.477	13.26	73.76
2b	2.926	13.27	77.94
3a	1.505	12.53	87.98
3b	1.290	12.33	89.54
4a	3.614	1.926	-87.60
4b	3.001	1.863	-61.04
5a	2.472	1.560	-58.50
5b	2.001	1.570	-27.55
6a	0.5651	1.856	69.60
6b	0.8207	1.870	56.10
7a	-5.159	1.531	437.0
7b	-4.991	1.586	414.6

Tabelle 7: Tabelle mit numerischer Auswertung der Entropiebilanz

Die berechnete Schichtungseffizienz der Experimente Nr.2 und Nr.3 liegen in einem Bereich von ca. 73% bis 90%. Anhand der durchgeführten Strömungsvisualisierung (Abb. 16) sowie aufgrund der Temperaturverläufe (Abb. 12a,b), werden diese Resultate als plausibel betrachtet. Dennoch sollte die Schichtungseffizienz von Experiment Nr.2, mit dem kleineren Volumenstrom, grösser sein als diejenige von Experiment Nr.3. Denn eine geringere Strömungsgeschwindigkeit sollte zu weniger Durchmischung führen. Die numerische Auswertung zeigt jedoch, dass Experiment Nr.3 mit dem grösseren Volumenstrom eine höhere Schichtungseffizient aufweist. Das Auftreten dieser Widersprüchlichkeit wird mit der Messunsicherheit des Massenstroms bzw. des Volumenstroms und jener der Temperatursensoren begründet. Abb. 15 zeigt die Gewichtung der einzelnen Entropien welche für die Berechnung von $\Delta S_{irr,exp}$ verwendet werden am Beispiel von Experiment Nr.3a. S_α und S_ω beschreiben die ein- resp. austretende Entropie, S_0 und S_{end} den Entropiegehalt im WS zu Beginn resp. am Ende des Zyklus und $S_{Verlust}$ die Entropie, welche an den Wärmeverlust gebunden ist. Die Grössenordnung der Gewichtung der Entropien ist bei allen durchgeführten Experimenten etwa dieselbe wie in Abb. 15, auch wenn die numerischen Werte nicht die selbigen sind. Anhand der Gewichtsverteilung wird deutlich, dass die Entropie, welche an den Massenstrom gebunden ist, am meisten Gewichtung trägt. Aus diesem Grund hat die Messunsicherheit des Massenstroms resp. Volumenstroms eine grosse Einwirkung für diese Berechnung.

Die berechnete Schichtungseffizienz der Experimente Nr.4 und Nr.5 liegen im negativen Bereich. Theoretisch betrachtet ist dies nicht möglich, weil die experimentell bestimmte Entropieproduktion maximal so gross sein kann wie diese des vollständig durchmischten Referenzsystems. Eine negative Schichtungseffizienz ist demzufolge nicht möglich. Aufgrund der bereits oben erwähnten Messunsicherheiten werden trotzdem negative Schichtungseffizienzen festgestellt. Wie bereits in Kap. 4.2 erläutert und ebenfalls mittels Abb. 16 feststellbar ist die Durchmischung bei den Experimenten Nr.4 und Nr.5 gross und demzufolge ist eine kleine Schichtungseffizienz zu erwarten. Numerisch bedeutet das, dass $\Delta S_{irr,exp}$ und $\Delta S_{irr,mix}$ nahe beieinander liegen. Durch die Messunsicherheit kann es aus diesem Grund dazu führen, dass die gemessene Entropie $\Delta S_{irr,exp}$ grösser wird als $\Delta S_{irr,mix}$. Es wird demnach die Schlussfolgerung gezogen, dass die Schichtungseffizienzen von Experiment Nr.4 und Nr.5 nahe null liegen.

Die bisherigen Auswertungen der Entropiebilanz zeigen erneut, dass eine vollumfängliche Messunsicherheitsanalyse mit Gauss'scher Unsicherheitsfortpflanzung Sinnvoll wäre. Ebenfalls wird erneut empfohlen das verwendete Volumenstrommessgerät durch ein genaueres zu ersetzen, um eine genauere Messung zu erhalten und die Entropiebilanzierung so aussagekräftiger durchführen zu können.

Die Schichtungseffizienz von Experiment Nr.6 kann anhand von Abb. 16 als plausibel beurteilt werden. Ob es sich dabei um einen Zufall handelt ist nicht gewiss, denn wie bereits in Kap. 4.2 erwähnt werden

die Messungen von Experiment Nr.6 und Nr.7 als nicht aussagekräftig beurteilt. Deshalb wird an dieser Stelle nicht weiter auf deren Messresultate eingegangen.

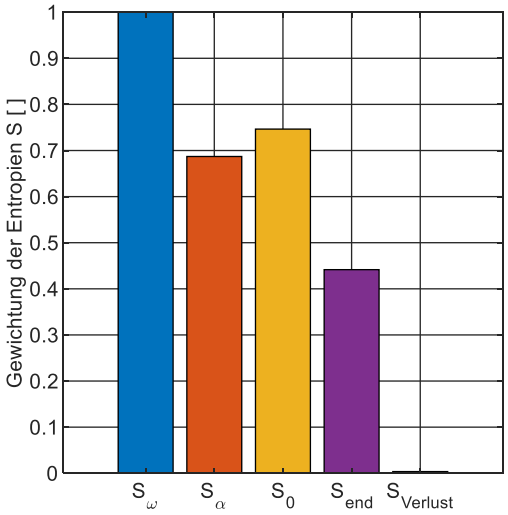


Abb. 15: Gewichtung der Entropien welche für die Berechnung von $\Delta S_{irr,exp}$ verwendet werden, hier gezeigt am Beispiel von Experiment Nr.3a

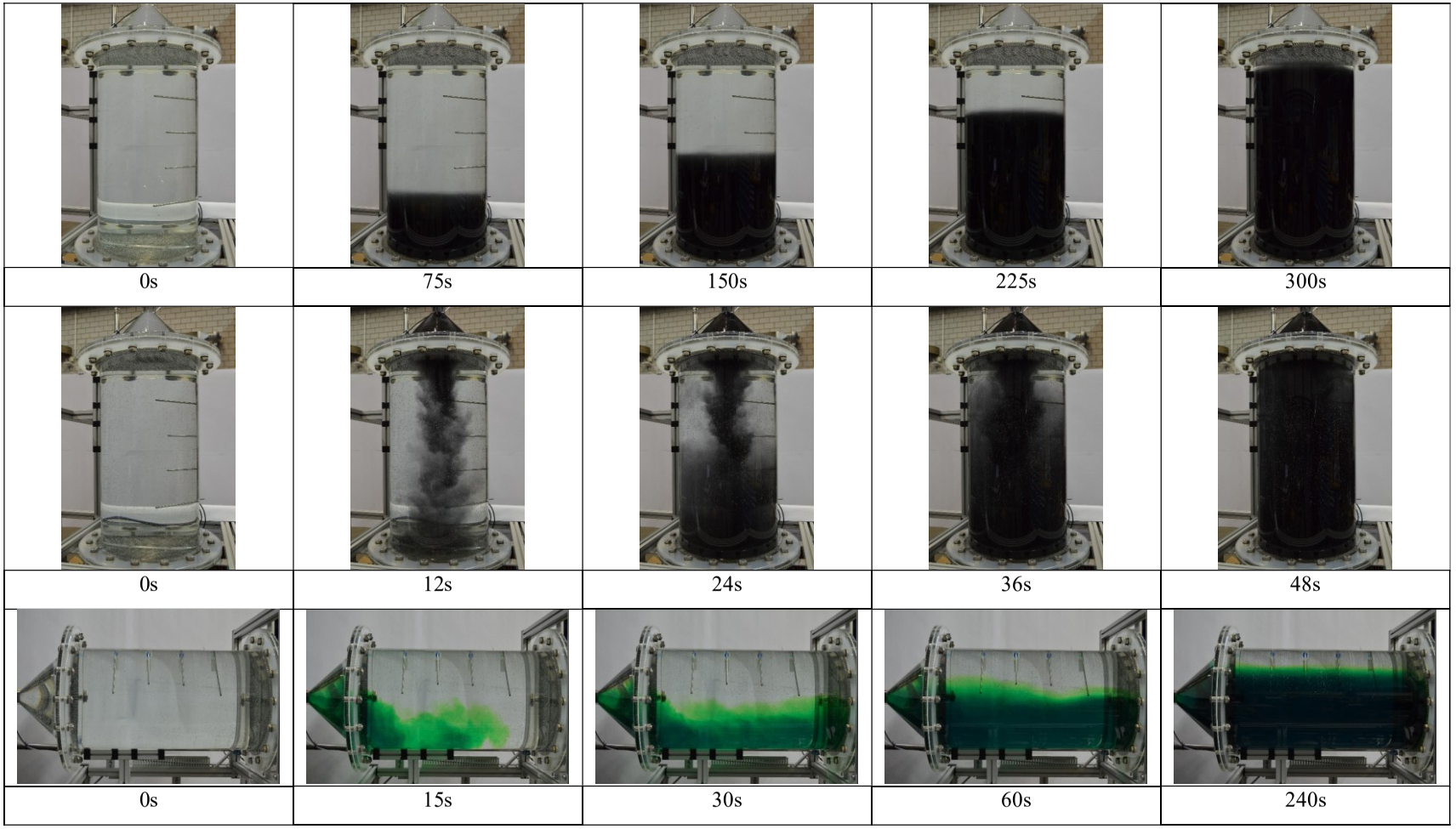


Abb. 16: Bilder der Strömungsvisualisierung, oben: Experiment Nr.3b, mitte Experiment Nr.5b, unten: Experiment Nr.7b, Der Zeitpunkt der Aufnahme ist unterhalb der Bilder in Sekunden angegeben. Dauer der Entladezyklen mit 16l/min ≈ 650s = 10.8min

5 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte erfolgreich ein Prüfstand zur Untersuchung von makro-verkapselten PCM-Systemen aufgebaut werden. Die Konstruktion und Auslegung des Prüfstands stellten ein wesentlicher Teil der Arbeit dar. Bei der Auslegung des Prüfstands wurde berechnet, dass die Druckverluste über das Lochblech und über die Schüttung von PCM-Kapseln vernachlässigbar klein sind, aufgrund der sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Bei der Festigkeitsberechnung des Lochblechs zeigte sich, dass bei einer Dichte von PCM von bis zu 2000 kg/m^3 das verwendete Lochblech noch zusätzlich verstärkt werden muss, um Bauteilversagen gänzlich auszuschliessen zu können. Nach dem Aufbau des Prüfstands folgte die Inbetriebnahme. Bevor die ersten Messungen gemacht werden konnten, mussten noch die Messdatenerfassung und die Volumenstromregelung erstellt werden.

Die Wärmeverluste des Systems konnten anhand der gemessenen Abkühlkurve des WS ermittelt werden. Für die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Der somit errechnete Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmespeichers hat einen Wert von 7.71 $W/(m^2K)$ ergeben. Die Wärmeverluste wurden für jedes Experiment einzeln bestimmt. Der maximale prozentuale Wärmeverlust bezogen auf einen Entladezyklus ist < 3%.

Um eine Aussage über die Genauigkeit des Prüfstands bei den durchgeführten Messungen zu tätigen, wurde eine Energiebilanz erstellt. Dabei zeigte sich, dass das verwendete Volumenstrommessgerät zu Lücken in der Energiebilanz führt. Der Grund dafür ist dessen grosse Messunsicherheit von 5%. Falls lediglich die Temperaturverläufe betrachtet werden, ist diese Messunsicherheit akzeptabel. Werden damit jedoch die ein- und austretenden Energien des Systems berechnet, hat das Volumenstrommessgerät eine zu grosse Messunsicherheit für aussagekräftige Ergebnisse.

Die Durchmischung lässt sich anhand der Temperaturverläufe, der Entropieproduktion sowie anhand der Strömungsvisualisierung beurteilen. Die Ergebnisse zeigen, dass wenn das kältere WTF von unten in den Wärmespeicher einströmt sich eine deutliche thermische Schichtung bildet. Wenn das kältere WTF hingegen von oben in den Wärmespeicher einströmt, wird der Wärmespeicher stark durchmischt. Die berechneten Schichtungseffizienten sind dabei um die 80% für den erst genannten Fall und nahe 0% für den zweitgenannten Fall. Ebenfalls konnte bei der Entropiebilanzierung festgestellt werden, dass das Volumenstrommessgerät eine zu grosse Messunsicherheit für aussagekräftige Ergebnisse bezüglich der Entropiebilanz hat.

Messungen bei horizontaler Ausrichtung des WS wurden als nicht aussagekräftig beurteilt, weil die Messung der mittleren WS-Temperatur nicht repräsentativ für den ganzen WS ist. Um eine repräsentative Mitteltemperatur im WS zu erhalten, müssten die Sensoren anders positioniert werden.

Messungen des Druckverlusts über den WS und die Messungen mit Kapseln konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit infolge mangelnder Zeitressourcen nicht ausgeführt werden. Die neuartigen vom CC TES entwickelten Kapseln konnten ebenfalls noch nicht für Messungen zur Verfügung gestellt werden.

Eine vollumfängliche Messunsicherheitsanalyse hätte bestätigen können, dass die Ursache der Abweichungen der Energie- und Entropiebilanzen mit Gewissen bei den Messunsicherheiten liegt. Jedoch fehlte auch hier die Zeit für eine aufwendige Fehlerfortpflanzungsanalyse.

In einem weiteren Schritt sollen makro-verkapselte PCM-Systeme im Wärmespeicher untersucht werden, mit dem Ziel die vom CC TES durchgeführten Simulationen bestätigen zu können. Die in der vorliegenden Arbeit ausgeführten Messungen ohne Kapseln dienen als Referenzwert. Es empfiehlt sich für die zukünftigen Messungen eine vollumfängliche Messunsicherheitsanalyse mit Gauss'scher Fehlerfortpflanzung anzuwenden. Ebenfalls wird empfohlen das Volumenstrommessgerät durch eines mit einer höheren Messgenauigkeit zu ersetzen.

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

$\dot{Q}_{Verlust}$	W	Wärmeverluststrom
$\dot{S}$	W/K	Entropiestrom
$\dot{S}_{Verlust}$	W/K	mit dem Wärmeverlust austretende Entropiestrom
$\dot{S}_{tot}$	W/K	Differenz der ein- und austretenden Entropieströme
Q	J	Wärmemenge
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
T_{WS}	K	mittlere WS-Temperatur in Kelvin
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
d_h	m	Lochdurchmesser Lochblech
k_{GUM}	-	GUM Erweiterungsfaktor = 2
k_{LB}	-	Korrekturfaktor Lochblech
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
s_{LB}	m	Materialstärke Lochblech
t_{LB}	m	Teilung Lochblech
u_c	-	kombinierte Standardmessunsicherheit
w_h	m/s	mittlere Fluidgeschw. im engsten geometrischen Querschnitt
w_m	m/s	gemittelte Fluidgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt
α_{LB}	-	Kontraktionszahl
α_a	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient aussen am Wärmespeicher
α_i	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient innen am Wärmespeicher
ζ_{emp}	-	Verlustbeinwert empirisch
ζ_{sch}	-	Schichtungseffizienz
λ_{plexi}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit vom Plexiglas
σ_{max}^{LB}	MPa	maximale Spannung am im Lochblech
σ_r	MPa	maximale Radialspannung
σ_t	MPa	maximale Tankgentialspannung
ϑ_0	°C	Temperatur zu Beginn bei t = 0
ϑ_{umg}	°C	Umgebungstemperatur
ϑ_{ws}	°C	mittlere WS-Temperatur
c_p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
h	J/kg	spezifische Enthalpie
h	J/kg	spezifische Enthalpie
P	W	Leistung
ΔS_{WS}	J/K	Änderung der Entropie vom System
$\Delta S_{irr,exp}$	J/K	irreversible Entropieproduktion von Experiment
$\Delta S_{irr,mix}$	J/K	irreversible Entropieproduktion Referenzfall vollständig durchmischt
Δt	s	Abtastrate der Messungen

ζ	-	Verlustbeiwert
A	m^2	Fläche
F	N	Gewichtskraft
R	m	Radius vom Lochblech bis zum gelagerten Rand
U	-	Messunsicherheit
a	-	halbe breite der Rechteckverteilung der Messunsicherheit
k	W/m^2K	Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert)
m	kg	Masse
s	J/kgK	spezifische Entropie
t	s	Zeit
u	-	Standardmessunsicherheit
δ	m	Materialstärke Plexiglas
ρ	kg/m^3	Dichte
φ	-	relativ freier Querschnitt des Lochblechs
ϑ	°C	Temperatur

Abkürzungen

AE	Automatischer Entlüfter
CC TES	Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher
CFD	numerische Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics)
DLE	Durchlauferhitzer
FIC	Durchflussmessgerät
KH	Kugelhahn
MEW	Messbereichsendwert
MV	Mischventil
MW	Messwert
PCM	Phasenwechselmaterial (engl. Phase Change Material)
PIC	Drucksensor
PU	Pumpe
RMSE	Root-mean-squared error
RTD	Widerstandstemperatursensor (Resistance Temperature Detector)
SSV	Schrägsitzventil
TES	Thermischer Energiespeicher
TESS	Thermische Energiespeicher Systeme
TIC	Temperatursensoren
ÜV	Überdruckventil
WS	Wärmespeicher
WTF	Wärmetransferfluid
WV	Wegventile

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anteile am Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszwecken in 2017 [1]. 2
Abb. 2: Vergleich zwischen sensiblem und latentem TES bei gleicher Temperaturdifferenz, rote Linie: PCM mit Phasenwechsel, gestrichelte Linie: sensibles Medium ohne Phasenwechsel 5
Abb. 3: a) Foto von den Fässern (1-3) b) Foto des befüllten Wärmespeichers (6) ohne Kapseln in vertikaler Ausrichtung. Ebenfalls sichtbar ist die PU (4) und der DLE (5) c) Schema der hydraulischen Verschaltung des Prüfstands 9
Abb. 4: Druckverlust als Funktion des Volumenstroms für das verwendete Lochblech 11
Abb. 5: rot und orange sind die Streckgrenze (190MPa) bzw. Zugfestigkeit (500MPa), blau und grün stellen die Spannungen als Funktion der Materialstärke für das verwendete Lochblech dar..... 12
Abb. 6: Verbautes Lochblech im WS mit angeschraubten Aluprofilen zur Verstärkung 13
Abb. 7: Druckverlust über das Festbett/die Schüttung von PCM-Kapseln in Funktion vom Volumenstrom, elliptische Kapseln mit den Aussenmassen von 10x20x40mm und einer Packungsdichte des Festbetts von 70%..... 14
Abb. 8: Druckverlust über das Gesamtsystem bei verschiedenen Betriebsarten in Funktion vom Volumenstrom, der grüne Verlauf zeigt den Druckverlust von lediglich dem Volumenstrommessgerät an..... 15
Abb. 9: Graphische Darstellung der Systemgrenze, die Richtung von $Qein/aus$ ändert sich je nach Strömungsrichtung..... 18
Abb. 10: a) Parameterstudie mit Variation von α-innen und α-aussen, zu sehen ist der RMS-Error ... 21
Abb. 11: Wärmeverluste in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen WS und Umgebung 22
Abb. 12: a) & c) Experiment Nr.2a,b b) & d) Experiment Nr.3a,b..... 23
Abb. 13: a) & c) Experiment Nr.4a,b b) & d) Experiment Nr.5a,b..... 25
Abb. 14: a) & c) Experiment Nr.6a,b b) & d) Experiment Nr.7a,b..... 26
Abb. 15: Gewichtung der Entropien welche für die Berechnung von $\Delta Sirr, exp$ verwendet werden, hier gezeigt am Beispiel von Experiment Nr.3a..... 28
Abb. 16: Bilder der Strömungsvisualisierung, oben: Experiment Nr.3b, mitte Experiment Nr.5b, unten: Experiment Nr.7b, Der Zeitpunkt der Aufnahme ist unterhalb der Bilder in Sekunden angegeben. Dauer der Entladezyklen mit 16l/min ≈ 650s = 10.8min 29
Abb. 17: Hydraulische Verschaltung beim Laden 38
Abb. 18: Hydraulische Verschaltung beim Vorkonditionieren, in diesem Beispiel wird Fass F-02 vorkonditioniert..... 38
Abb. 19: Hydraulische Verschaltung beim Entladen, in diesem Beispiel wird das vorkonditionierte WTF von Fass F-02 durch den Wärmespeicher hindurch in Fass F-03 gefördert..... 39
Abb. 20: Hydraulische Verschaltung beim entgegengesetzten Betrieb (WTF strömt von Seiten TIC02 ein), die Verschaltung der Fässer beim Laden und Entladen ist identisch zur normalen Betriebsrichtung 39
Abb. 21: Frontpanel der Benutzeroberfläche in LabVIEW..... 40
Abb. 22: Prüfstand in horizontalem Betrieb, bei genauer Betrachtung sind die Temperatursensoren im Wärmespeicher sichtbar..... 41
Abb. 23: Wegventile und Kugelhähne 41
Abb. 24: oben in der Mitte ist das FIC zu sehen, rechts in blau der Differenzdrucksensor 42
Abb. 25: Wärmespeicher/Plexiglastank mit Ein und Auslass, Ausgangslage der vorliegenden Arbeit 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschnitt aus dem Lastenheft mit den relevantesten Punkten für die Auslegung des experimentellen Prüfstands. Das ausführliche Lastenheft ist im Anhang A1 abgebildet. 7
Tabelle 2: Abmessungen und Material des Lochblechs (Rundlochung in versetzten Reihen) 10
Tabelle 3: Sensorik des Prüfstands 15
Tabelle 4: Aktoren des Prüfstands 16
Tabelle 5: Tabelle mit experimenteller Kampagne, jedes Experiment wird wiederholt, die zweite/wiederholte Durchführung desselben Experiments ist am Buchstaben b hinter der Nummer erkennbar 17
Tabelle 6: Tabelle mit numerischer Auswertung der Energiebilanz 22
Tabelle 7: Tabelle mit numerischer Auswertung der Entropiebilanz 27

Literaturverzeichnis

[1] K. U. Bundesamt and E. Bfe, “Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000 – 2017,” 2018.

[2] B. Schroeteler, R. Waser, S. Maranda, L. J. Fischer, and J. Worlitschek, “Review on modelling and experimental investigation of macroencapsulated phase change materials,” *(Internal Doc. HSLU)*, 2018.

[3] L. Gubler, V. Härri, A. Stamatiou, and J. Worlitschek, “Energy Storage Systems,” *(Internal Doc. HSLU)*, pp. 333–368, 2017.

[4] T. E. Alam, J. S. Dhau, D. Y. Goswami, and E. Stefanakos, “Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems,” *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 92–101, 2015.

[5] P. B. Salunkhe and P. S. Shembekar, “A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5603–5616, 2012.

[6] S. Pinnau, “Strömungs- und kältetechnische Optimierung von Latentkältespeichern,” *Tech. Univ. Dresden*, 2009.

[7] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), *VDI-Wärmeatlas*. Springer Verlag, 2006.

[8] K. Grote and J. Feldhusen, *Dubbel, Tschenbuch für den Maschinenbau*. 2014.

[9] ifm electronic ag, “SBY233-Datenblatt,” 2016. [Online]. Available: https://www.ifm.com/ch/de/product/SBY233?tab=details.

[10] National Instruments, “CompactDAQ-Systeme - National Instruments.” [Online]. Available: http://www.ni.com/de-ch/shop/compactdaq.html. [Accessed: 28-Dec-2018].

[11] Grundfos AG, “NB 100-200/211 A-F2-A-E-BQQE.” [Online]. Available: https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=98180947&qcid=376087172. [Accessed: 15-May-2018].

[12] I. C. Gossweiler FHNW, “Einführung in die Bestimmung der Messunsicherheit 1 Einleitung zur Messunsicherheit.”

[13] “CoolProp 6.2.1 documentation.” [Online]. Available: http://www.coolprop.org/index.html. [Accessed: 21-Dec-2018].

[14] “Newton’s Law of Cooling.” [Online]. Available: http://www.ugrad.math.ubc.ca/coursedoc/math100/notes/diffeqs/cool.html. [Accessed: 29-Dec-2018].

[15] M. Haller, R. Haberl, P. Persdorf, and A. Reber, “StorEx Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern,” 2015.

A1 Lastenheft

zwingend	optional		erfüllt	nicht erfüllt	Bezeichnung	Kommentar
					Grundfunktionen	
x			x		Bestimmung der Energiebilanz während einer Ladesequenz des Wärmespeichers	Beim Betrieb ohne Kapseln muss die Ladesequenz nicht zwingend gemessen werden
x			x		Bestimmung der Energiebilanz während Entladesequenz des Wärmespeichers	
	x		x		Laden und Entladen des Wärmespeichers bidirektional möglich (nur mit verstellen von Ventilen)	
x			x		Laden und Entladen des Wärmespeichers bidirektional möglich	
x			x		Bestimmung der Temperatur an 4 unterschiedlichen Positionen im Wärmespeicher (Tank)	
x			x		Bestimmung der Temperatur vor sowie nach dem Wärmespeicher (Plexiglastank)	
x				x	Bestimmung des Druckerverlustes über dem Speicher während Lade- und Entladezyklen	
x			x		Solltemperatur des beladenen Wärmespeichers einstellbar	
	x		x		Solltemperatur des beladenen Wärmespeichers in LabVIEW einstellbar	
x			x		Entladetemperatur einstellbar	
	x		x		Entladetemperatur in LabVIEW einstellbar	
x			x		Ladesequenz ohne Auftrennung von hydraulischen Verbindungen einleitbar (nur Umstellung von Ventilen).	
	x			x	Ladesequenz wird via LabVIEW automatisch ausgeführt	
x			x		Entladesequenz ohne Auftrennung von hydraulischen Verbindungen einleitbar (nur Umstellung von Ventilen).	
	x			x	Entladesequenz wird via LabVIEW automatisch ausgeführt	
x			x		Wärmespeicher schwenkbar (Wärmespeicher horizontal und vertikal betreibbar)	erleichtert Beladung und Entleerung der Kapseln
x			x		Volumenstrom manuell einstellbar	
	x		x		Volumenstrom mit LabVIEW einstellbar	
	x		x		Volumenstrom regelbar	
x			x		Optische Beobachtung möglich	
x			x		Wärmeverluste innerhalb Energiebilanz < 3% während Lade- und Entladesequenz	
x			x		Modularer Aufbau des Einlass- und Auslassbereiches zur Untersuchung der Strömungsverteilung mit verschiedenen mechanischen Vorkehrungen.	
					Technische Daten	
x			x		Wärmespeicher bis 75°C ladbar	
x			x		Wärmespeicher lad- und entladbar mit konstanter Temperatur im Bereich von Raumtemperatur (ca. 18-23°C) bis 75°C	
x			x		Wärmespeicher über eine Zeitspanne von 10min mit 16 l/min entladbar	
x			x		Möglichkeit für Ladung und Entladung mit tieferen Temperaturen bis 0°C.	
x			x		Erreichung der Temperatur des Wärmespeichers auf ± 2K genau	
x			x		Temperatur beim Entladen auf ± 2K genau	
x			x		konstante Ladeleistung einstellbar (1-10 kW)	
	x			x	konstante Entladeleistung einstellbar	
x			x		Volumenstrombereich von 5-20l/min möglich	
x			x		Genauigkeit vom Volumenstrom ± 5%	
x			x		Lochblech mit Druckverlust von max. 0.5bar (über beide)	

x			x		Lochblech muss Kapseln mit den Massen 10x20x40mm aufhalten	
x			x		Lochblech muss einer Beanspruchung von ca. 130kg standhalten	
					Messdatenerfassung	
x			x		Messdatenerfassung mit LabVIEW	
x			x		Grafische Anzeige der Temperaturen	
x				x	Grafische Anzeige der Drücke	
x			(x)		Messunsicherheitsanalyse nach GUM	
					Messtechnik	
x			x		Durchflussmessung frei wählbar solange Anforderungen erfüllt sind	
x			x		Temperaturmessung erfolgt mittels PT100 A-Klasse	
x			x		Druckmessung erfolgt mittels Drucktransmitter	
					Budget	
	x		x		Maximales Budget von 10'000 CHF	es sollen keine minderwertige dafür günstige Komponenten gekauft werden
x			x		Inventar von CC TES verwenden	Im Labor vorhandene Komponenten werden so weit wie möglich verwendet

Der Differenzdrucksensor ist am Prüfstand installiert und angeschlossen. Um Messungen damit durchzuführen muss er in LabVIEW noch eingelesen und kalibriert werden. Aufgrund der fehlenden Zeitressourcen konnte dies nicht mehr durchgeführt werden. Bei den durchgeführten Messungen mit lediglich Wasser, war die Relevanz dieser Messung gering.

A2 Schemata der Hauptbetriebsarten

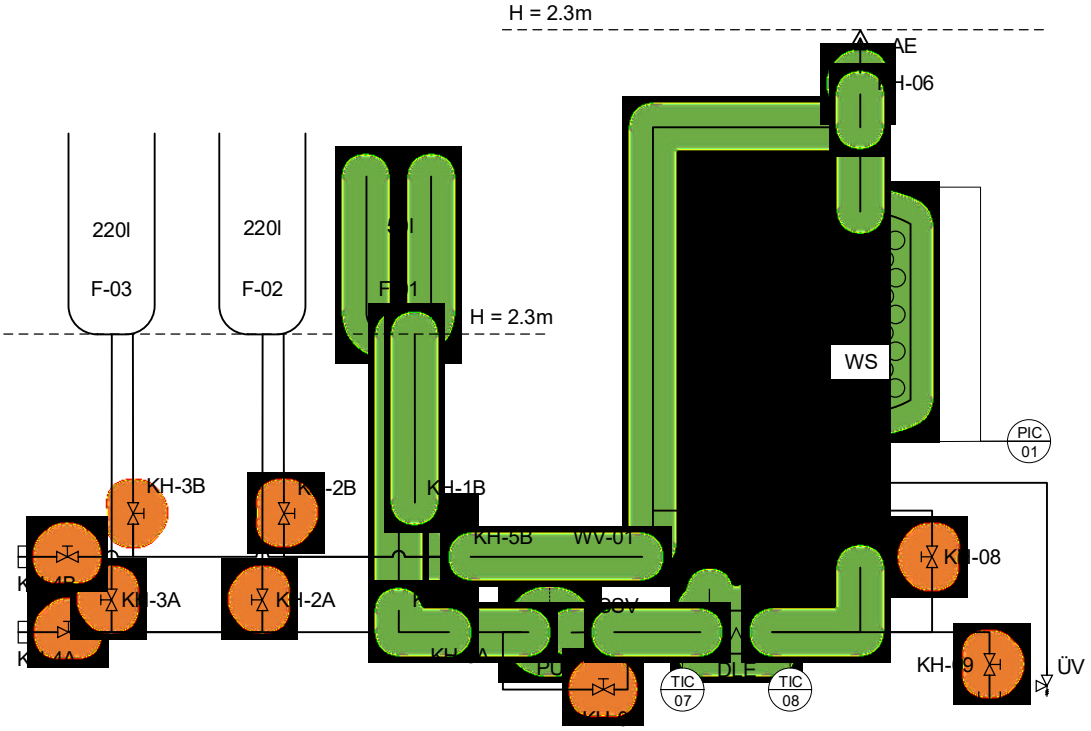


Abb. 17: Hydraulische Verschaltung beim Laden

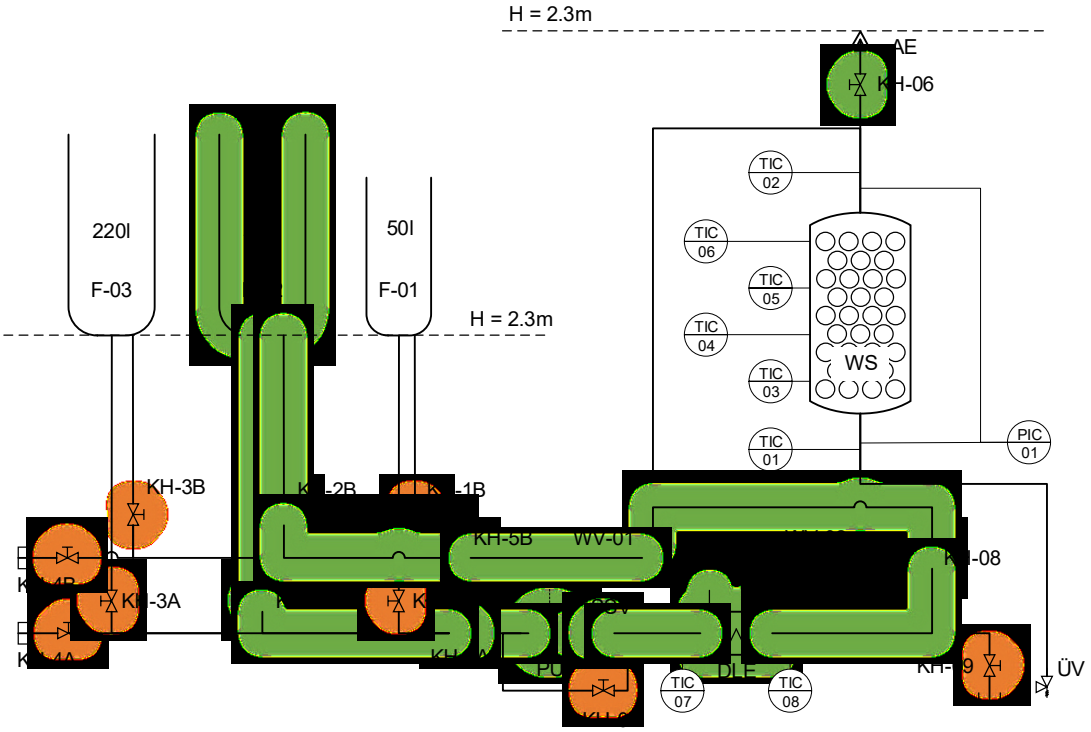


Abb. 18: Hydraulische Verschaltung beim Vorkonditionieren, in diesem Beispiel wird Fass F-02 vorkonditioniert

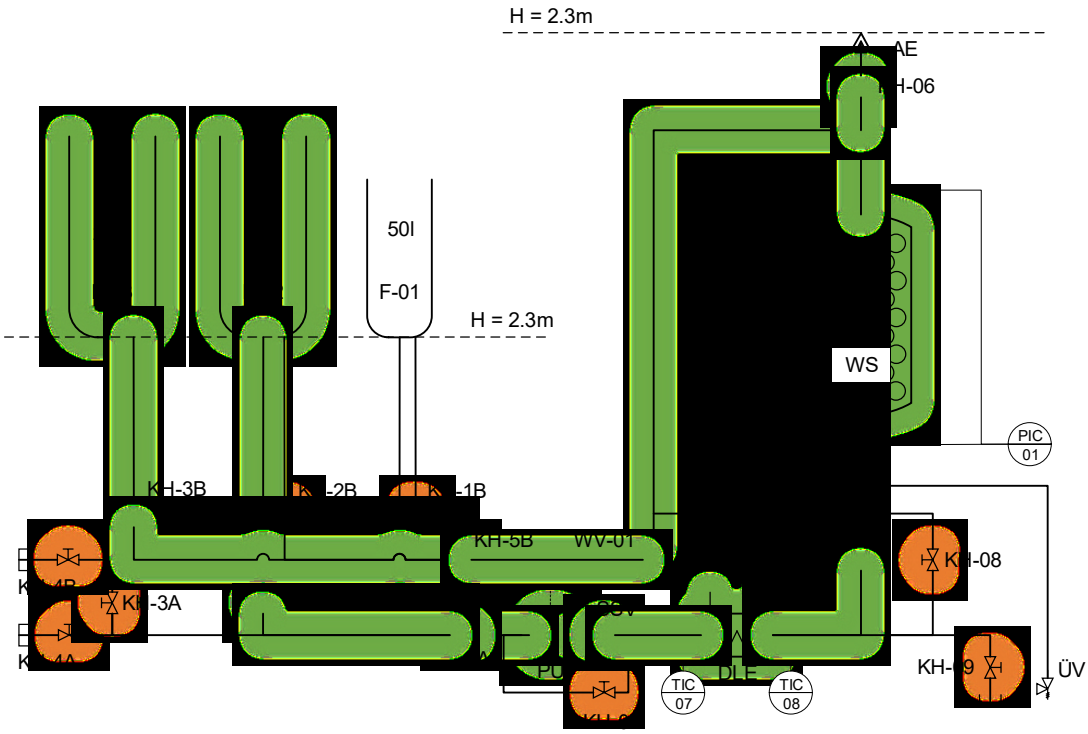


Abb. 19: Hydraulische Verschaltung beim Entladen, in diesem Beispiel wird das vorkonditionierte WTF von Fass F-02 durch den Wärmespeicher hindurch in Fass F-03 gefördert.

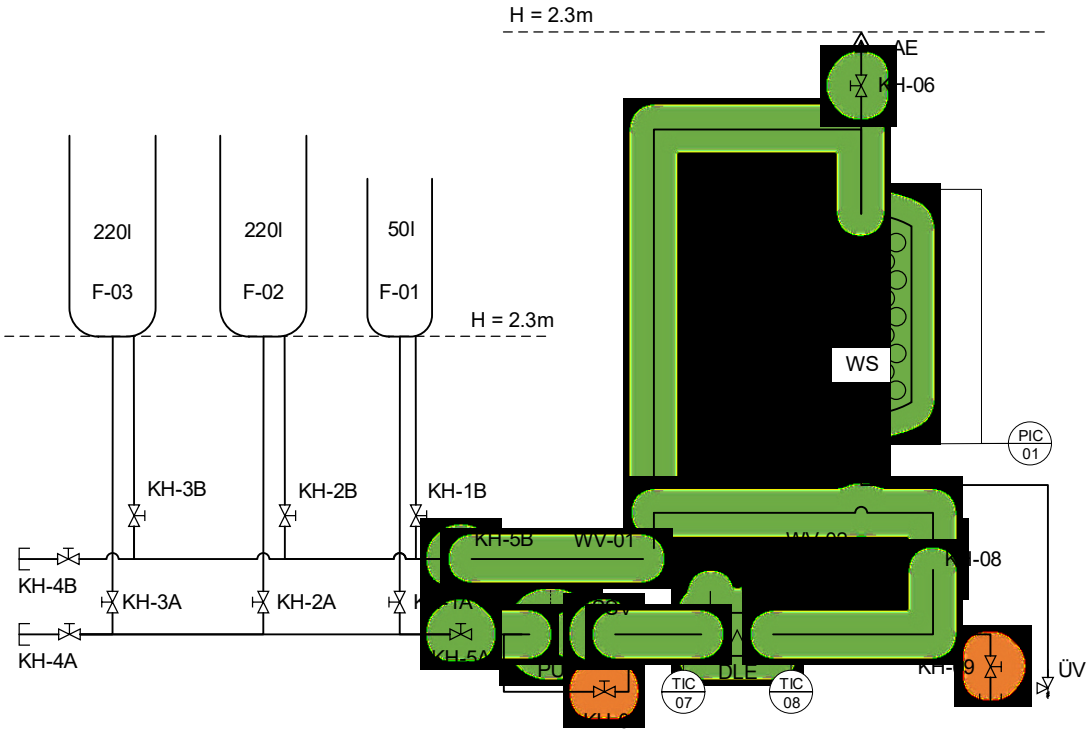


Abb. 20: Hydraulische Verschaltung beim entgegengesetzten Betrieb (WTF strömt von Seiten TIC02 ein), die Verschaltung der Fässer beim Laden und Entladen ist identisch zur normalen Betriebsrichtung

A3 Impressionen des Prüfstands

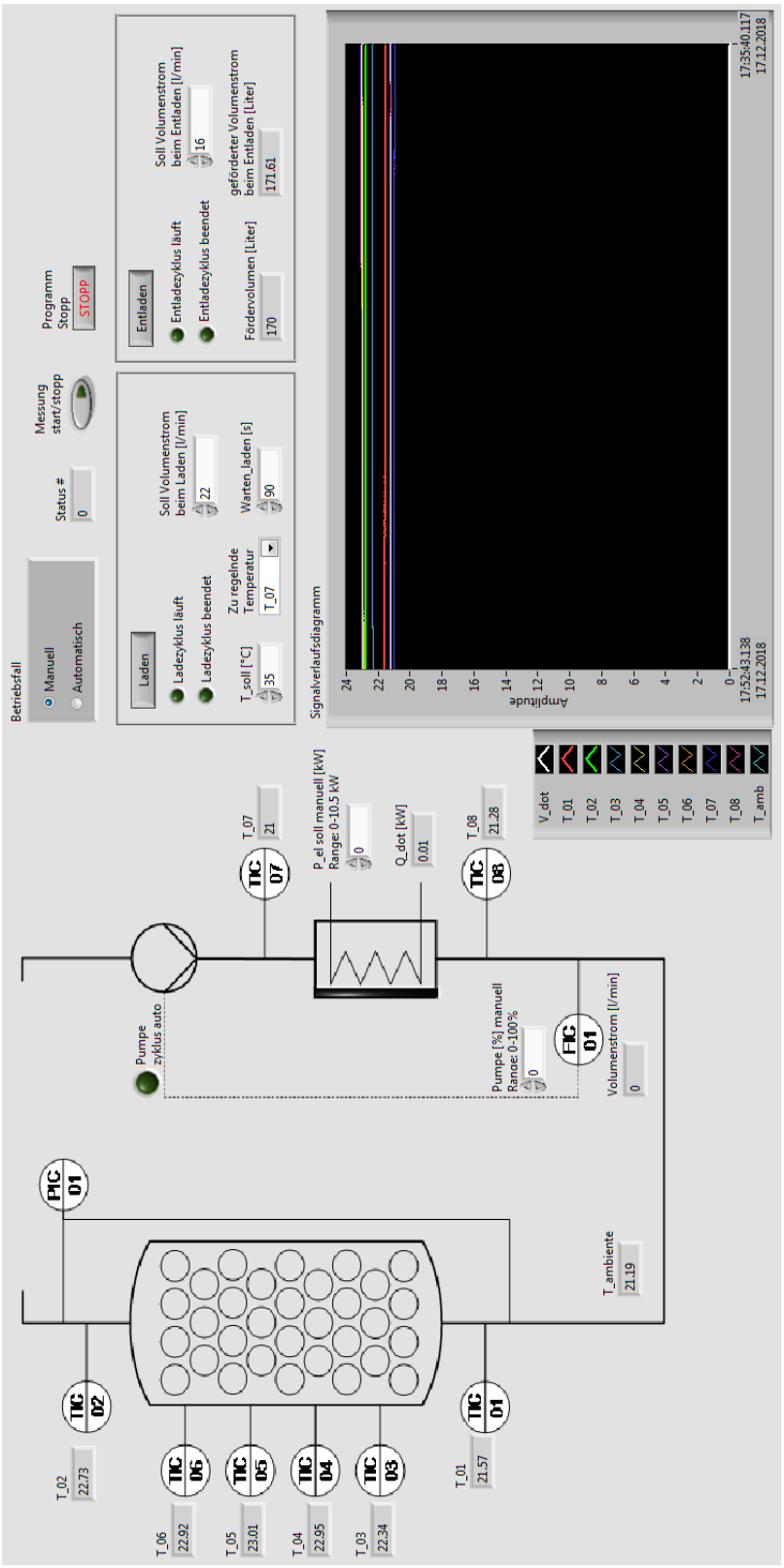


Abb. 21: Frontpanel der Benutzeroberfläche in LabVIEW

Abb. 22: Prüfstand in horizontalem Betrieb, bei genauer Betrachtung sind die Temperatursensoren im Wärmespeicher sichtbar

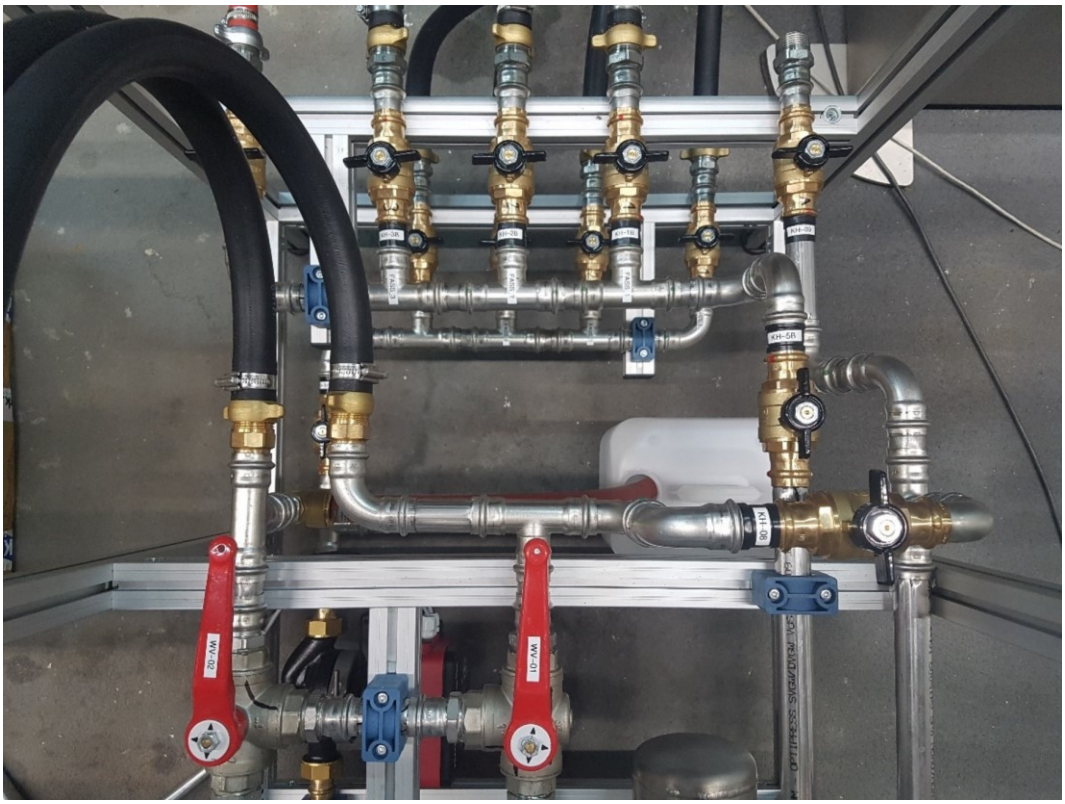


Abb. 23: Wegventile und Kugelhähne

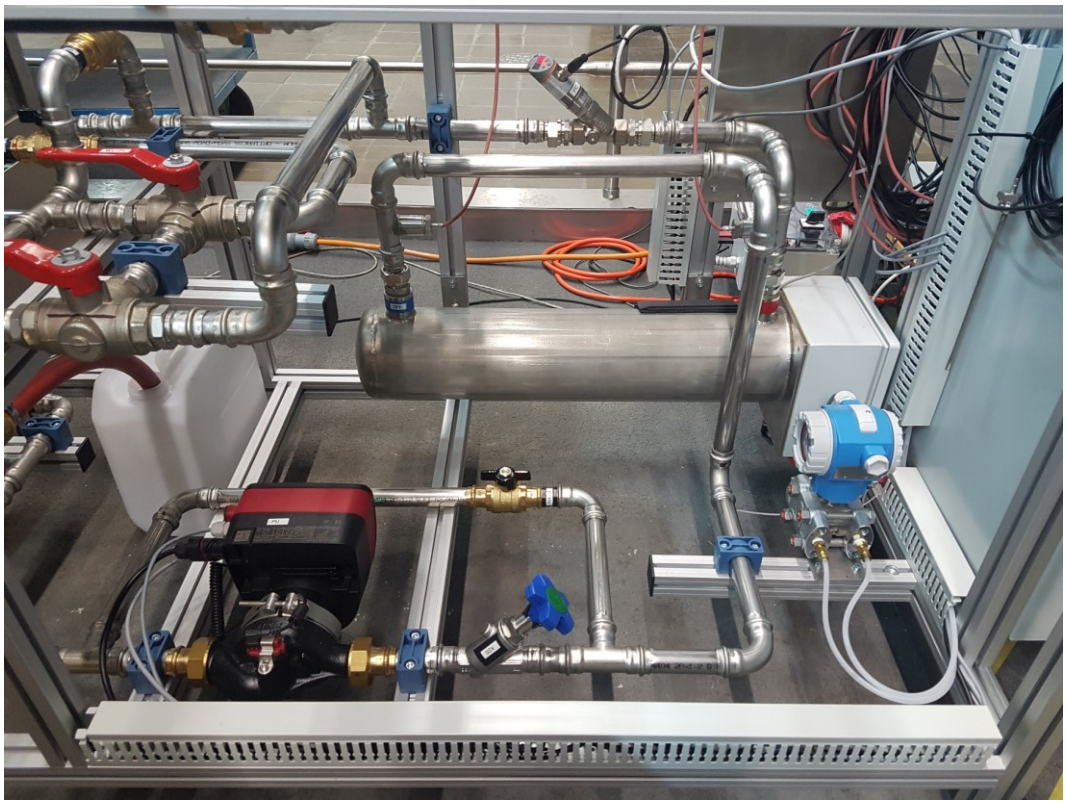


Abb. 24: oben in der Mitte ist das FIC zu sehen, rechts in blau der Differenzdrucksensor

Abb. 25: Wärmespeicher/Plexiglastank mit Ein und Auslass, Ausgangslage der vorliegenden Arbeit