



Institut für Thermodynamik



Fakultät für Maschinenbau

Institut für Thermodynamik

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. S. Kabelac

Tel. +49 511 762 2277

Fax +49 511 762 3857

E-Mail: kabelac@ift.uni-hannover.de

Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Visualisierung von zweiphasigen Wärmeübergangsprozessen

Bachelorarbeit

im Studiengang Bachelor of Science Maschinenbau (B. Sc.)
Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau

vorgelegt von

Karim Emira

Mat.-Nr.: 10032416

Beginn: 17.10.2022

Abgabe: 17.04.2022

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac

Zweitprüferin: Prof. Birgit Glasmacher

Betreuer: M. Sc. Sebastian Wendt

Besucheradresse:
An der Universität 1
30823 Garbsen
www.ift.uni-hannover.de

Zentrale:
Tel. +49 511 762 0
Fax +49 511 762 3456
www.uni-hannover.de



Institut für Thermodynamik



Leibniz
Universität
Hannover

Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit

für Herrn Karim Emira,
Matrikelnummer: 10032416

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Thermodynamik

Thema:

Inbetriebnahme und Kalibrierung einer Versuchsumgebung zur Visualisierung von Verdampfungs- und Kondensationsvorgängen

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. S. Kabelac

Tel. +49 511 762 2277

Fax +49 511 762 3857

E-Mail: kabelac@ift.uni-hannover.de

Aufgabenstellung:

Für die Analyse von Phasenwechselfvorgängen ist eine optische Zugänglichkeit hilfreich, um Strömungsformen zu bestimmen. Darüber hinaus können durch eine optische Beobachtung des Prozesses Informationen zu den Eigenschaften der Oberflächen, auf denen der Phasenwechsel stattfindet, gewonnen werden. Am Institut für Thermodynamik ist eine Versuchsumgebung konzipiert worden, die eine Beobachtung von Verdampfung und Kondensation mit einer Hochgeschwindigkeitskamera sowie eine thermodynamische Bilanzierung ermöglicht.

Der Aufbau der Versuchsumgebung ist im Rahmen vorangegangener Arbeiten bereits weitgehend abgeschlossen worden. In dieser Arbeit sollen eine Finalisierung und Inbetriebnahme erfolgen. Dazu sind zunächst ein ausführlicher Funktionstest aller Aggregate und Kreisläufe sowie eine sorgfältige Justage der Regelung notwendig. Zudem ist die Sensorik zu kalibrieren, wobei den verbauten kapazitiven Dampfgehaltssensoren eine erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen ist.

Im Rahmen erster Referenzmessungen soll eine Bildauswertung auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden. Schließlich ist eine ausführliche Analyse des Verbesserungspotenzials der Anlage mitsamt Vorschlägen für die Umsetzung vorzunehmen.

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate

Beginn der Arbeit: 17.10.2022

Betreuer: M. Sc. Sebastian Wendt

Prof. Dr.-Ing. S. Kabelac

Besucheradresse:

An der Universität 1

30823 Garbsen

www.ift.uni-hannover.de

Zentrale:

Tel. +49 511 762 0

Fax +49 511 762 3456

www.uni-hannover.de

Eidesstattliche Erklärung

Ich bestätige hiermit, dass ich diese Arbeit eigenständig und ohne Hilfe Dritter verfasst habe. Sämtliche Inhalte, die direkt oder indirekt aus fremden Quellen übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet und die Arbeit wurde bisher keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Hannover, den 17.04.2023

Unterschrift:

Karim Emira

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VI
Abstract.....	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Nomenklatur	XI
Abkürzungen.....	XI
Lateinische Buchstaben	XI
Indizes	XIII
1 Einleitung.....	1
2 Plattenwärmeübertrager	2
2.1 Aufbau und Funktionsweise eines PWÜ	2
2.2 Geometrien der Platten	3
3 Wärmeübergang bei der Kondensation und beim Sieden.....	5
3.1 Wärmeleitung.....	5
3.2 Konvektiver Wärmeübergang.....	6
3.3 Kondensation.....	6
3.4 Sieden.....	7
4 Stand der Forschung	12
5 Versuchsmodul zur Visualisierung der zweiphasigen Wärmeübertragung. 19	
5.1 Funktionsprinzip und Fließschema des Versuchsstands.....	19
5.2 Aufbau des Versuchstandes und der Versuchsanlage	21
5.2.1. Die Versuchsanlagenkonstruktion	21
5.2.2 Die Versuchstandskonstruktion	27
6 Messtechnik.....	32
6.1 Messaufnehmer- LabVIEW.....	32

6.2 Druckmessung.....	35
6.3 Temperaturmessungen	37
6.4 Massendurchflussmesser- Coriolis	40
6.5 kapazitiven Dampfgehaltssensoren -Impedanzmessung	41
6.6 Hochgeschwindigkeitkamera	45
7 Inbetriebnahme.....	47
7.1 Leckage Untersuchung	47
7.2 Justage der Regelung	50
7.3 Isolierung	52
7.4 Funktionstest der Aggregate und Kreisläufe	53
7.4.1 Verdampfung.....	53
7.4.2 Kondensation	54
7.4.3 Verdampfung bei unterschiedlichen Dampfgehalten.....	56
8 Messergebnisse und Auswertung	56
8.1 MATLAB Code.....	58
8.2 Bildverarbeitungsprozesses.....	61
8.2.1 Parameterbeschreibung und deren Auswirkungen auf die Bildverarbeitung	64
8.3 Bildverarbeitungsansätze zur Analyse von Verdampfungsprozessen	65
9 Verbesserungsmaßnahmen	75
9.1 Fließschema des Versuchsstand	75
9.2 Auslegung eines internen Heizelements in dem Coriolis	76
10 Zusammenfassung und Ausblick	78
11 Literaturverzeichnis	79
12. Anhang.....	83

Kurzfassung

In jüngster Zeit gewinnt die Wärmeübertragung in der Energiegewinnung und Nachhaltigkeit immer mehr an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurde ein Versuchsmodul entwickelt, um Experimente an Platten mit mikro- und nanotechnologisch bearbeiteten Oberflächen durchzuführen und der Plattenwärmeübertragung (PWÜ) zu verbessern. Die Ergebnisse dieser Experimente können zur Optimierung von Prozessen und PWÜ beitragen. Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, eine funktionierende Versuchsumgebung bereitzustellen, um eine reibungslose Untersuchung der Platten zu ermöglichen. Die Versuchsumgebung erlaubt die Untersuchung kleiner Platten, die das vereinfachte PWÜ-Prinzip abbilden, und ermöglicht die Visualisierung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Durch die Anwendung von Bildverarbeitungstechniken können die Messergebnisse ausgewertet werden. In der Arbeit wird eine erfolgreiche Inbetriebnahme erreicht und die Zuverlässigkeit der Messergebnisse mittels Bildverarbeitungsprozessen überprüft. Diese Arbeit trägt dazu bei, Untersuchungen an nano- und mikrotechnologisch bearbeiteten Plattenoberflächen zu ermöglichen und die zugrundeliegenden Prozesse zu erklären. Darüber hinaus werden Empfehlungen für die Optimierung dieser Prozesse gegeben.

Abstract

Recently, heat transfer in energy production and sustainability has gained increasing importance. Against this backdrop, an experimental module has been developed to conduct experiments on plates with micro- and nanotechnologically modified surfaces, aiming to improve plate heat Exchanger (PHE). The results of these experiments can contribute to the optimization of processes and PHE. The main objective of this work is to provide a functioning experimental environment to enable a smooth investigation of the plates. The experimental environment allows the study of small plates that represent a simplified PHE principle and enables visualization with a high-speed camera. By applying image processing techniques, the measurement results can be evaluated. In this work, successful commissioning is achieved, and the reliability of the measurement results is verified using image processing processes. This work contributes to enabling investigations of nano- and microtechnologically modified plate surfaces and explaining the underlying processes. Furthermore, recommendations for optimizing these processes are provided.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau eines gedichteten PWÜ [2].	2
Abb.2.2: Typische Kategorien der Prägungsstruktur der gewellten Platten von Plattenwärmeübertragern [6].	3
Abb.3.1 Filmkondensation und Tropfenkondensation [7].	7
Abbildung 3.2: Nukiyama Siedekurve von Wasser auf Platin-Draht [8]	8
Abbildung 3.2: Nukiyama Siedekurve mit verschiedene Siederegime [9].	9
Abbildung 3.3: Strömungsformen des Strömungssiedens in einem vertikalen Rohr [7].	11
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [10].	13
Abbildung 4.2: der geprüften Platte [10].	13
Abbildung 4.3: Variation der Gesamt- und Konvektionswärmeübergangskoeffizienten mit der Strömungsgeschwindigkeit [10].	15
Abbildung 4.4: Merkmale von PWÜ, ausgedrückt als Korrelation der Nusselt-Zahl mit der Reynolds-Zahl [10].	15
Abbildung 4.5: Zwei zusammengesetzte gewellten Platten [12].	16
Abbildung 4.6: Experimenteller Untersuchungsaufbau zur Analyse von zweiphasigen Strömungsformen in gewellten Plattenspalten [12].	17
Abbildung 4.7: Verteilerbereich.	18
Abb.5.1: Fließdiagramm des Versuchsstand [13].	19
Abb.5.2: gesamte Versuchsanlage [13]	22
Abb.5.3: Rahmen der Versuchsanlage [13].	22
Abbildung 5.7: Aufnahmen für die Temperatur- und Drucksensoren [13].	25
Abbildung 5.8: Dampfverteiler.	26
Abbildung 5.9: Anschlussstück.	26
Abbildung 5.10: Sprühdüsen.	27
Abbildung 5.11: Versuchsstands-aufbau.	28
Abbildung 5.12: Versuchsstands-aufbau zweite Ansicht.	29
Abbildung 5.13: Versuchsstands-aufbau für die Schläuche Erläuterung.	30
Abbildung 5.14: Versuchsstands-aufbau Schutzstangen.	31
Abbildung 6.1: Programm Teil 1,2/ PID-Regler und PTM-Messungen.	33
Abbildung 6.2: Programm Teil 3 / Dampfgehaltsmessungen.	33
Abbildung 6.2: Aktuelle Blockdiagramm der Beheizung.	34
Abbildung 6.3: die Konvertierung in SI-Einheiten bzw. die Kalibrierungswerte.	35
Abbildung 6.4: Wirkprinzipunterscheidung der Absolut- und Drucksensoren [20].	36

Abbildung 6.5: Diagramme der Regression.	40
Abbildung 6.6: Wirkprinzip des Coriolis [17].	41
Abbildung 6.7: gemessenen Kapazität bei konstanter Temperatur sowie Dampfgehalt und unterschiedlichen Volumenströmen.	43
Abbildung 6.8: Diagramme der Kalibrierungsprozess für die Erklärung der Korrelationsgleichungen.	45
Abbildung 7.1: Leckage Identifizierung durch Lecksuchmittels.....	48
Abbildung 7.2: Isolierung der Versuchsappratur.	53
Abbildung 7.3: Verdampfung bei unterschiedlichen Volumenströmen.	54
Abbildung 7.4: Kondensation bei unterschiedlicher Wassertemperatur.	55
Abbildung 7.5: Verdampfung bei unterschiedlichen Dampfgehalte.....	56
Abbildung 8.1: Erste Code-Teil.....	58
Abbildung 8.2: Zweite Code-Teil.	59
Abbildung 8.3: Dritte Code, Erste Abschnitt.	60
Abbildung 8.4: Dritte Code, Zweite Abschnitt.....	60
Abbildung 8.5: Dritte Code, dritte Abschnitt.	61
Abbildung 8.6: Die erzeugten Frames und das Videoplayer.	62
Abbildung 8.7: (Linkes Bild- Finalhintergrundbild) - (Rechtes Bild- Verarbeitete Frame).	63
Abbildung 8.9: Finalhintergrundbildern (links) und Verarbeitete Bildern (Rechts) bei Massenstrom von 0,0012 kg/s.....	66
Abbildung 8.10: Verdampfung bei unterschiedlichen Massenströmen.	67
Abbildung 8.10: Die Gesamtfläche des identifizierten Dampfes in Abhängigkeit von unterschiedlichen Massenströmen.	67
Abbildung 8.11: die Gesamtfläche in Abhängigkeit vom Massenstrom.	69
Abbildung 8.12: Die Anzahl der Blasen bei verschiedenen Massenströmen.	70
Abbildung 8.13: (Linkes Bild-Finalbackgroundbild) - (Rechtes Bild-Frame1) Keimbildung bei 0,0151 kg/s.	71
Abbildung 8.14: (Linkes Bild-Finalbackgroundbild) - (Rechtes Bild-Frame1) Keimbildung bei 0,0172 kg/s.	72
Abbildung 8.15: Keimbildung bei unterschiedlichen Massenstrom.....	73
Abbildung 8.16: homogene Keimbildung in Wandnähe.	74
Abbildung 9.1: Aktualisierte Fließdiagramm des Versuchsstands.	75
Abbildung 12.2: Benutzeroberfläche des PCC-Programms.	85
Abbildung 12.3: Messgeräte zur Signalumwandlung von kapazitiven Sensoren.	85
Abbildung 12.4: Coriolis-Durchflussmesser, der dafür das interne Heizelement ausgelegt.	86
Abbildung 12.5: Experimentelle Umgebung.....	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Spezifikationen des PWÜs [10].	14
Tabelle 6.1: die Koeffizienten der Kalibrierung.	39
Tabelle 6.2: Kapazitätswerte der Sensoren.	42
Tabelle 6.3: Korrelationsgleichungsparameter.	44
Tabelle 7.1: der gesamt Druckverlust des Systems innerhalb einer Stunde.	48
Tabelle 7.2: Verstärkungswerte basierend auf Erfahrungswerten.	51
Tabelle 7.3: Ergebnisse der Verstärkungswerte nach Ziegler-Nichols-Verfahrens und der Trial-and-Error-Methoden.	52
Tabelle 7.4: aufgenommenen und abgegebenen Wärmeströme sowie die Wärmeverluste.	54
Tabelle 8.1: Massenströme in kg/s.	65
Tabelle 9.1: Iterationsschrittswerte.	77

Nomenklatur

Abkürzungen

PWÜ	Plattenwärmeübertrager
WÜ	Wärmeübertrager
WÜR	Wärmeübertragungsrate
R365mfc	Kältemittel R365mfc
LED	Light-emitting diode (Leuchtdiode)
RMSE	Root-Mean-Square Error
SSE	Residuenquadratsummenfehler

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
A	A	Ampere
A	-	Koeffizient
B	-	Koeffizient
B	-	Halbbreite
C	-	Sensitivität
E	%	Fehler
h	$\frac{J}{Kg}$	Enthalpie
k	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
m	$\frac{Kg}{s}$	Massenstrom
n	-	Anzahl
p	Pa	Druck

\dot{Q}	$\frac{J}{s}$	Wärmestrom
\dot{q}	$\frac{J}{m^2 \cdot s}$	Wärmestromdichte
\bar{q}	-	Mittelwert
Q_m	$\frac{Kg}{h}$	Massendurchfluss
R	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitwiderstand
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R_0	-	Nennwiderstand
s	-	Standardabweichung
T	$^{\circ}C$	Temperatur
t	$^{\circ}C$	Temperatur
u	-	Standardmessunsicherheit
x^*	-	Dampfgehalt
x	-	Schätzwert
Z	%	Nullpunktabweichung

Indizes

ein, aus	Ein-, Austritt
F1, F2	Fluid 1, Fluid 2
W, W1, W2	Wand, Wand 1, Wand 2
∞	Außerhalb der Grenzschicht
leit	Wärmeleitung
konv	Konvektion
ges	Gesamt
krit	kritisch
S	Sättigung
L	Liquid
LG	Flüssig- Gasförmig
SG	Fest- Gasförmig
SL	Fest- Flüssig
abs	Absolut
diff	Differenz
ref	Referenz
Gen	Genauigkeit
W	Wand
Hy	Hysterese
Lang	Langzeitstabilität
rep	Reproduzierbar
Null	Nullpunktabweichung
Durch	Durchfluss

1 Einleitung

Plattenwärmeübertrager (PWÜ) sind aufgrund ihrer simplen Bauweise und des geringen Teiles Umfangs in vielen Branchen der Industrie weit verbreitet [3][4]. Beispiele hierfür sind Heizungssysteme, die Lebensmittelindustrie sowie die Verwendung als Verdampfer oder Kondensator. In jüngster Zeit nimmt die Bedeutung der Wärmeübertragung in der Energiegewinnung und der Nachhaltigkeit zu, weshalb die Weiterentwicklung von PWÜ hinsichtlich Effizienz, Bauart und Anwendungsmöglichkeiten von essentieller Bedeutung ist. PWÜ ermöglichen einen hocheffizienten Wärmeübergang zwischen warmen und kalten Fluiden durch den Austausch von Wärmeenergie zwischen den strömenden Medien [3][11]. Die damit verbundenen Prozesse wie Verdampfung und Kondensation sind von großer Bedeutung und erfordern weitere Experimente, um die Effizienz und Einsatzmöglichkeiten von PWÜ zu verbessern. Zu diesem Zweck wird ein Versuchsmodul entwickelt, um Experimente an Platten mit mikro- und nanotechnologisch bearbeiteten Oberflächen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Experimente können dazu beitragen, die Prozesse und den PWÜ zu optimieren.

Für den Beginn der Arbeit ist ein Überblick über relevante Arbeiten, Literatur und Grundkenntnisse unerlässlich. Anschließend werden der Aufbau von PWÜ sowie die wichtigsten geometrischen Parameter, Definitionen und Prozesse erläutert. Das Versuchsmodul, die benötigten Komponenten, die Funktionsweise und das Fließdiagramm werden beschrieben. Vor dem Start der Prüfstandläufe werden umfassende Vorbereitungen getroffen, wie die Kalibrierung des Kapazitätssensors und die Dichtheitsprüfung, um später eine Messung der Wärmeübertragungskoeffizienten an Referenzflächen zu ermöglichen. In dieser Arbeit soll der Versuchsstand finalisiert und in Betrieb genommen werden. Hierfür sind umfangreiche Funktionstests aller Aggregate und Kreisläufe sowie eine sorgfältige Justage der Regelung notwendig. Die Sensorik, insbesondere die kapazitiven Dampfgehaltssensoren, müssen sorgfältig kalibriert werden.

Im Rahmen erster Referenzmessungen wird eine Bildauswertung auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Eine ausführliche Analyse des Verbesserungspotenzials der Anlage mitsamt Vorschlägen für die Umsetzung soll abschließend durchgeführt werden.

2.2 Geometrien der Platten

Die Platten sind dünn und haben eine große Fläche, was die Wärmeübertragung günstig beeinflusst. Sie sind aus einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit hergestellt. Die Geometrie der Platten, insbesondere die Prägung, hat einen bedeutenden Einfluss auf die Leistungscharakteristik der PWÜ, indem der Spaltquerschnitt in viele parallele Strömungskanäle unterteilt wird [1].

Eine weiche Prägung mit einem Prägungswinkel von weniger als 45° und eine harte Prägung mit einem Prägungswinkel von mehr als 45° ermöglichen eine Verbesserung oder Verschlechterung des Wärmeübergangs durch Erhöhung oder Verringerung der Turbulenz. Eine Klassifizierung typischer Prägungsformen der Plattenoberflächen von PWÜ sind in der Abbildung 2.2 und zeigt das Waschbrettmuster (a), das Fischgrätenmuster (c), das doppelte Fischgrätenmuster (d) und die Winkel-Wellen-Platte (b) mit einem sinusförmigen Wellenmuster mit Amplitude und Wellenlänge, das um einen Winkel gegen die Hauptströmungsrichtung geneigt und in einem oder mehreren Streifen auf der Platte eingeprägt ist [6].

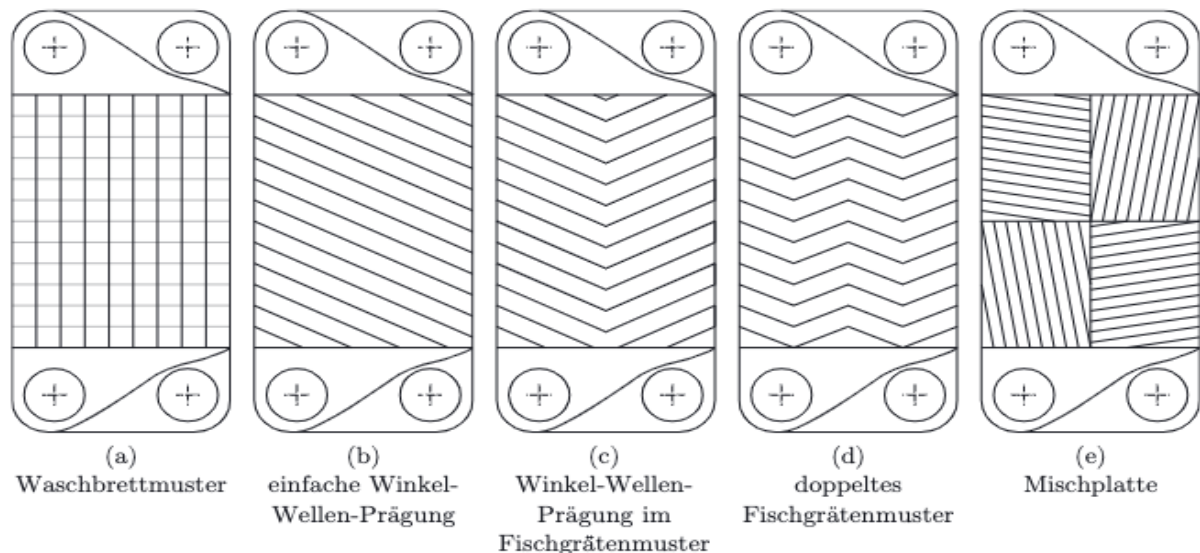


Abb.2.2: Typische Kategorien der Prägungsstruktur der gewellten Platten von Plattenwärmeübertragern [6].

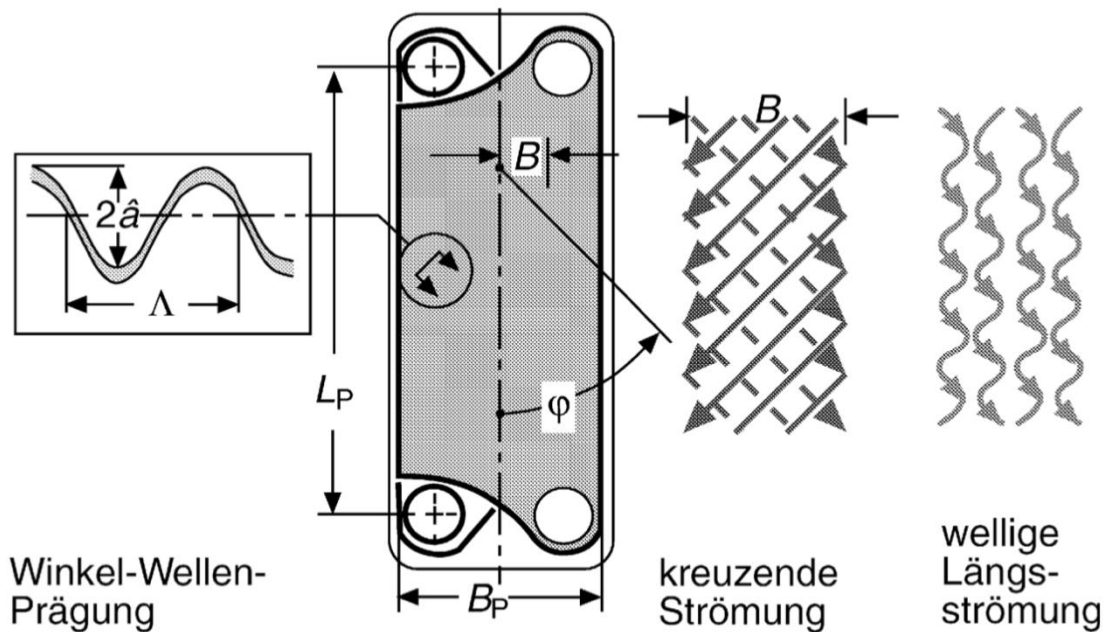


Abb.2.3: Platte in Winkel-Wellen-Prägung, Winkel φ und die zwei Strömungsformen [6].

Die von vielen Herstellern heute am häufigsten angebotene Prägungsform (b) ist die in Abbildung 2.3 dargestellte Winkel-Wellen-Platte (Englisch: chevron type plate), die sich durch ein sinusförmiges Wellenmuster mit der Amplitude \hat{a} und der Wellenlänge L auszeichnet, das um den Winkel φ gegen die Hauptströmungsrichtung geneigt und in einem oder in mehreren Streifen der Breite B auf der Platte eingeprägt ist. Die Platten werden im Paket jeweils so zusammengestellt (Drehung jeder zweiten Platte um ihre Flächennormale um 180°), dass sich die Kämme der Wellenprägungen an vielen Punkten berühren. Die Hersteller bieten Platten in abgestuften Serien von Größen mit gleichen Sinusmustern in zwei oder mehreren verschiedenen Winkeln φ an [6].

3 Wärmeübergang bei der Kondensation und beim Sieden

Der Wärmeübergang während des Kondensierens und Siedens hängt nicht nur von der Strömungsform und den Stoffeigenschaften jeder einzelnen Phase ab, sondern auch von charakteristischen Größen und Stoffwerten, die mit dem Phasenwechsel verbunden sind, sowie von der Aktivierung von Kondensations- oder Siedekeimen. Im Allgemeinen ist der Wärmeübergangskoeffizient beim Kondensieren oder Sieden aufgrund der hohen Energiedichte, die mit dem Phasenwechsel einhergeht, deutlich höher als bei einphasiger Konvektion [6]. In einem Wärmeübertrager treten drei verschiedene Wärmetransportmechanismen auf, nämlich Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung. Da die Wärmestrahlung bei der Kondensations- und Verdampfungsprozessen vernachlässigbar sein kann, wird im Folgenden lediglich auf Konvektion und Wärmeleitung eingegangen.

3.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Transport von Wärmeenergie durch das Material eines Körpers aufgrund eines Temperaturunterschieds in Richtung des Temperaturgradienten. Dieser Prozess tritt in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen auf. Der Wärmestrom \dot{q} hängt dabei proportional von der Wärmeleitfähigkeit λ ab und ist umgekehrt proportional zur Materialdicke und der Querschnittsfläche des Körpers, d.h.:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \text{ bzw. } = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.1)$$

wobei A die Querschnittsfläche des Körpers senkrecht zur Richtung des Temperaturgradienten ist und $\frac{\partial T}{\partial x}$ den lokalen Temperaturgradienten in x -Richtung beschreibt. Hierbei ist \dot{Q} der Wärmestrom durch die Fläche A [6].

3.2 Konvektiver Wärmeübergang

Konvektion ist ein Energietransportprozess, der neben der Wärmeleitung im Fluid auftritt und durch die makroskopische Bewegung des strömenden Mediums hervorgerufen wird. Durch diese Bewegung erfolgt ein Transport von Enthalpie und kinetischer Energie. Besonders relevant für die Berechnung von Wärmeübertragern ist der konvektive Wärmetransport zwischen einem strömenden Fluid und einer Wand. Wenn die Wandtemperatur T_W höher ist als die Fluidtemperatur T_F , dann wird dem Fluid Wärmeenergie entzogen. Im umgekehrten Fall, wenn T_F höher ist als T_W , wird die Energie von der Wand ins Fluid übertragen. Der Wärmestrom \dot{q} hängt von der Temperaturdifferenz $T_W - T_F$ ab [6]. Der Wärmestrom innerhalb des Fluids wird durch das Newton'sche Abkühlungsgesetz:

$$\dot{q} = \alpha (T_W - T_F) \quad (3.2)$$

beschrieben und ist proportional zum Wärmeübergangskoeffizienten α und der Temperaturdifferenz. Die Güte des konvektiven Wärmeübergangs hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. der Strömungsgeschwindigkeit, der Fluidviskosität, der Geometrie des Strömungskanals und der Oberflächeneigenschaften der Wand. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist ein wichtiger Parameter zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs. Er hängt stark von den genannten Faktoren ab und kann durch experimentelle Untersuchungen oder theoretische Berechnungen ermittelt werden [6].

3.3 Kondensation

Kondensation beschreibt den Prozess, bei dem ein Medium von einem gasförmigen in einen flüssigen Aggregatzustand übergeht. Dabei kommt es zur Freisetzung von Wärmeenergie, da die Energie, die benötigt wird, um das Medium zu verdampfen, wieder freigesetzt wird. Wenn der gasförmige Dampf auf eine kühle Oberfläche trifft, die eine niedrigere Temperatur als die Dampfsättigungstemperatur aufweist, kondensiert der Dampf an der Oberfläche und bildet ein flüssiges Kondensat. Die Art und

Weise, wie sich das Kondensat bildet, hängt von den Benetzungseigenschaften der Flüssigkeit an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Oberfläche ab. Wenn der Wärmeübergangskoeffizient hoch ist, bildet sich das Kondensat in Form von einzelnen Tropfen. Wenn der Wärmeübergangskoeffizient niedrig ist, bildet sich das Kondensat in Form eines geschlossenen Films. Der Unterschied zwischen Filmkondensation und Tropfenkondensation wird in Abbildung 3.1 veranschaulicht. Bei der Filmkondensation wird der Dampf über die gesamte Oberfläche verteilt und bildet sich als geschlossener Film, während bei der Tropfenkondensation der Dampf nur an bestimmten Stellen der Oberfläche kondensiert und sich in Form von Tropfen bildet [7].

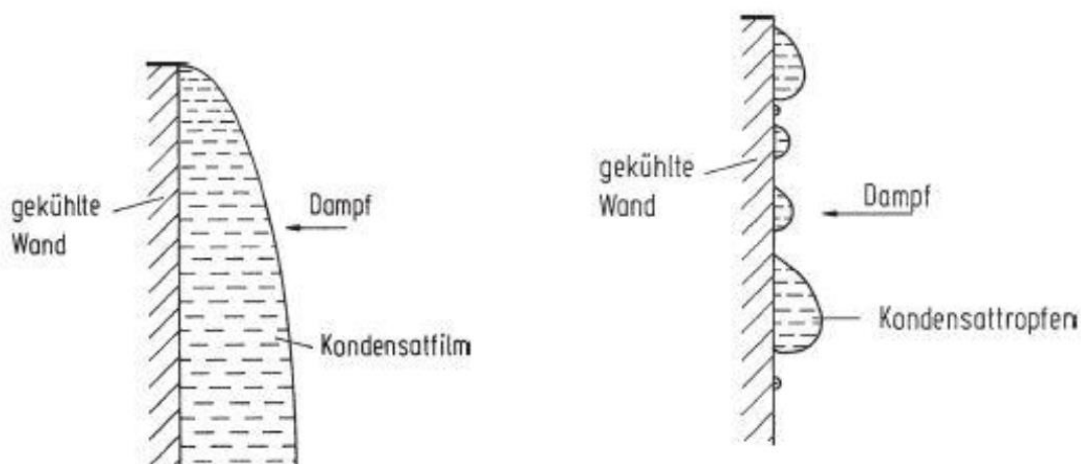


Abb.3.1 Filmkondensation und Tropfenkondensation [7].

3.4 Sieden

Beim Sieden ändert sich der Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig, wenn eine Flüssigkeit erhitzt wird, bis ihre Wandtemperatur T_w höher ist als ihre Sättigungstemperatur T_s . Sobald dieser Punkt erreicht ist, beginnt die Flüssigkeit zu verdampfen, wobei es bei geringer Überhitzung zu einer Verdampfung ohne Blasenbildung an der freien Oberfläche der Flüssigkeit kommt. Bei höherer Überhitzung bilden sich jedoch Keimstellen auf der Oberfläche, was zu einer Blasenbildung führt. Diese Blasen wachsen weiter an, wenn zusätzliche Wärme zugeführt wird. Die Siedetemperatur einer Flüssigkeit hängt von mehreren Faktoren ab, einschließlich des Drucks und der Art der Flüssigkeit. Bei höheren Drücken liegt die Siedetemperatur höher, während sie bei niedrigeren Drücken sinkt [6].

Die erste wissenschaftliche Untersuchung des Siedeverhaltens führte Nukiyama in Japan durch. Der Versuchsaufbau bestand darin, einen horizontalen Platindraht in Wasser von 100 °C einzutauchen und ihn elektrisch zu erhitzen, um den Siedeprozess auszulösen. Der Draht fungierte sowohl als Heizelement als auch als Widerstandsthermometer, um eine präzise Temperaturmessung während des Experiments zu ermöglichen. In Abbildung 3.2 ist Nukiyama Siedekurve abgebildet. Die allgemeine Form dieser Kurve ist für alle Flüssigkeiten gültig, wenngleich die spezifischen Werte der Koordinaten von der jeweiligen Flüssigkeit, dem Druck sowie weiteren beeinflussenden Faktoren abhängig sind [8].

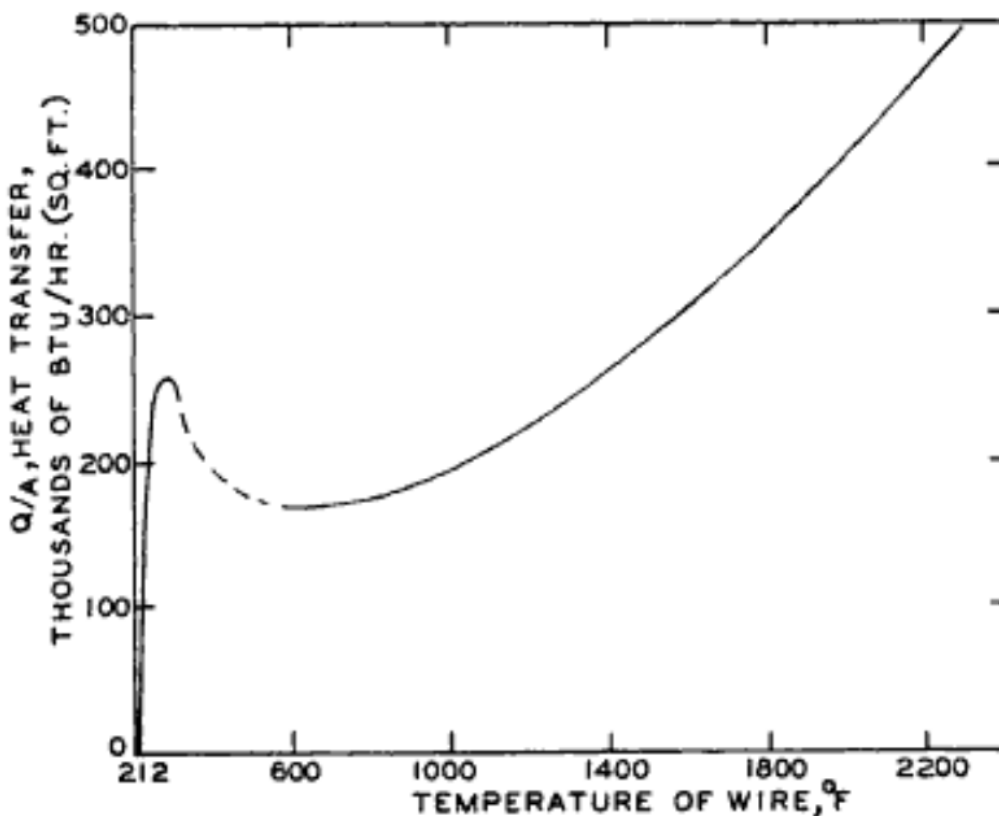


Abbildung 3.2: Nukiyama Siedekurve von Wasser auf Platin-Draht [8]

Nukiyama postulierte das Vorhandensein eines dritten Typs und veranschaulichte dies durch das Einzeichnen einer gestrichelten Linie in Abbildung 3.2. Spätere

Untersuchungen bestätigten seine Hypothese. Das Niedertemperaturregime des Siedens ist als Blasensieden bekannt. In diesem Bereich entstehen aktive Blasenbildungsstellen auf der heißen Feststoffoberfläche, und Blasen formen sich ausschließlich an diesen Stellen. Die Charakterisierung solcher Stellen ist gegenwärtig von erheblichem wissenschaftlichem Interesse [8].

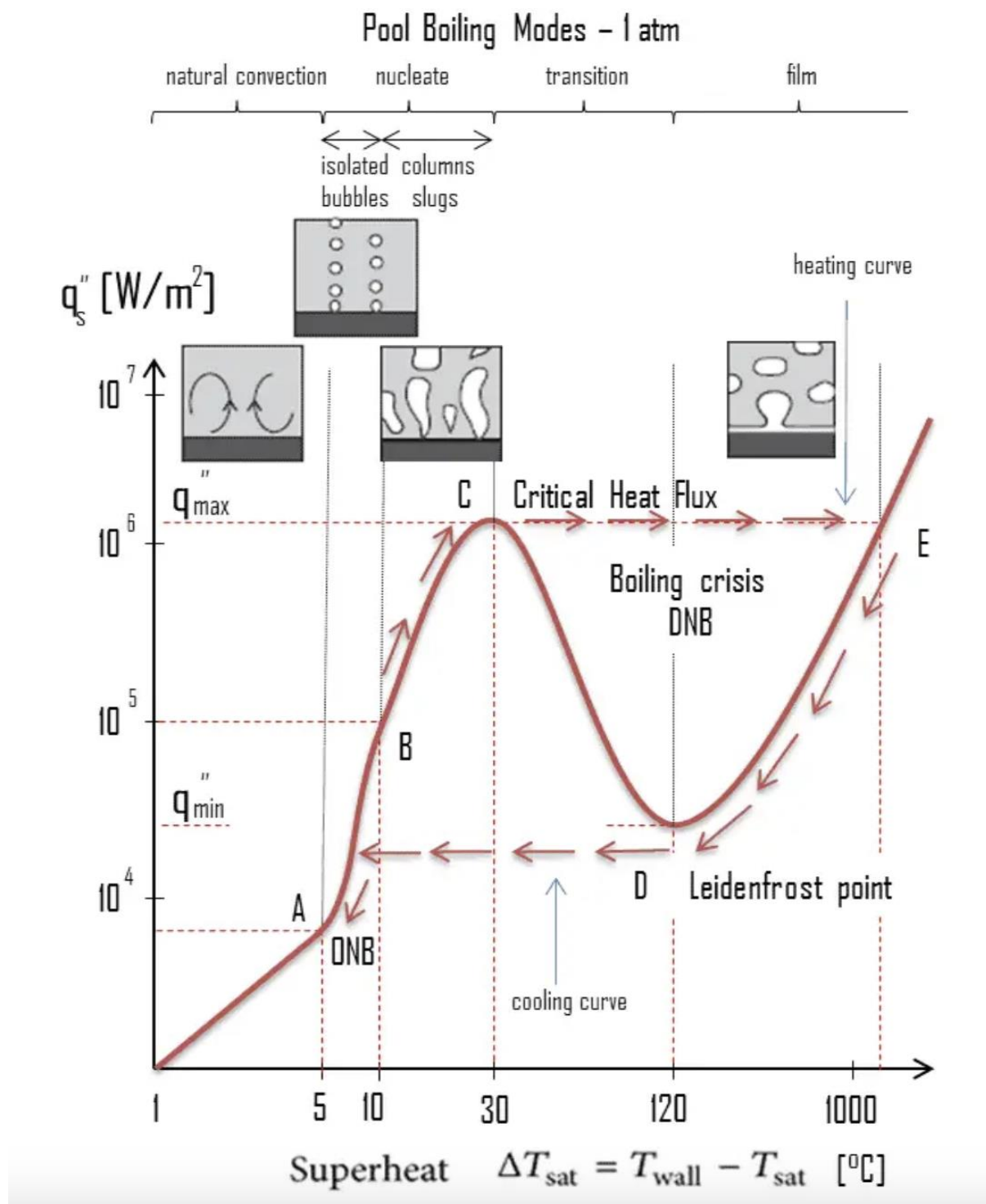


Abbildung 3.2: Nukiyama Siedekurve mit verschiedene Siederegime [9].

Die Abbildung 3.2 zeigt die Siederegime in Nukiyama Siedekurve. Basierend auf der Übertemperatur lassen sich die vier verschiedenen Siedebedingungen wie folgt unterteilen [9]:

- Naturkonvektion: In diesem Regime ist die Wärmeübertragung hauptsächlich auf natürliche Konvektion zurückzuführen, die durch Temperatur- und Dichteunterschiede innerhalb der Flüssigkeit verursacht wird. Dampfblasenbildung findet hierbei nicht statt (Bereich A).
- Blasenbildung: Bei einer erhöhten Wärmeübertragungsrate entstehen Dampfblasen, die aus der Keimstellen wachsen und langsam aufsteigen, bevor sie in der Flüssigkeit kollabieren (Bereich B).
- Übergangssieden: In diesem Bereich ist die Wärmeübertragung am höchsten, da Dampfblasen kontinuierlich an der Oberfläche gebildet werden und absteigen (Bereich C).
- Film- oder Verdrängungssieden: In diesem Regime überzieht ein Dampffilm die erhitzte Oberfläche, wodurch die Wärmeübertragung drastisch reduziert wird. Die Übertemperatur steigt rasch an, und es besteht die Gefahr einer thermischen Zerstörung der Oberfläche (Bereich E).

Das Strömungssieden ist von bedeutendem wissenschaftlichem Interesse, insbesondere aufgrund seines Einflusses auf die Wärmeübertragung. Abbildung 3.3 zeigt verschiedene Strömungsformen des Strömungssiedens in einem vertikalen Rohr. In diesem Fall wird eine unterkühlte Flüssigkeit, die unter ihrer Siedetemperatur liegt, durch ein Heizrohr geleitet, um zu verdampfen. Entlang der Strömungsrichtung steigt der Dampfgehalt schrittweise zu. Die unterschiedlichen Strömungsformen besitzen verschiedene Wärmeübertragungseigenschaften, was zu diversen Siedetemperaturen führt [7].

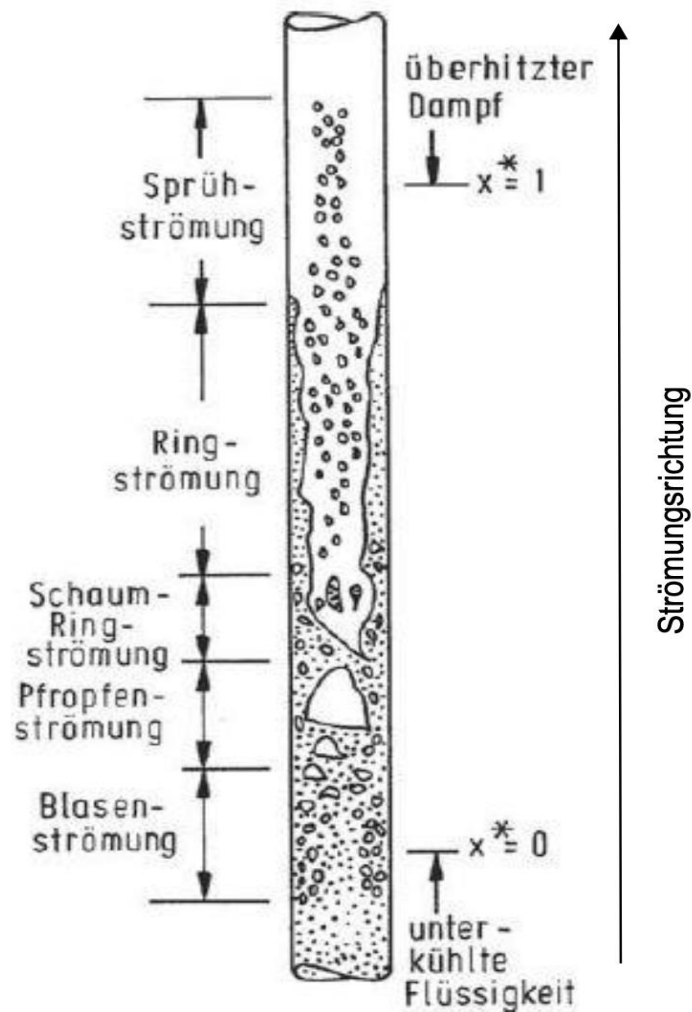


Abbildung 3.3: Strömungsformen des Strömungssiedens in einem vertikalen Rohr [7].

Der Prozess beginnt mit der unterkühlten Flüssigkeit bzw. einem Dampfgehalt von 0, bei dem die heiße Wand die Flüssigkeit erhitzt, bis Blasenströmung auftritt. Nach der Blasenströmung wachsen die gebildeten Blasen weiter, bis sich Dampfkolben bilden, die eine Propfenströmung ermöglichen. Eine Schaum-Ringströmung entsteht, wenn die Dampfkolben sich miteinander verbinden. Anschließend bildet sich an der Rohrwand ein dünner Flüssigkeitsfilm, während im Inneren des Rohrs Dampf mit kleinen Flüssigkeitstropfen vorliegt, was als Ringströmung charakterisiert wird. Sobald der dünne Flüssigkeitsfilm verdampft, tritt die Sprühströmung auf und die Flüssigkeit wird rasch vollständig verdampft. Die in einem vertikalen Rohr auftretenden Strömungsformen können ebenfalls auf einer Platte des PWÜ beobachtet werden [7].

4 Stand der Forschung

Es existieren zahlreiche Studien und Publikationen, die den Einfluss von Mikrostrukturen Platten auf die Leistung von Plattenwärmetauschern untersuchen. Die Mikrostrukturierung der Plattenoberflächen kann dazu beitragen, die Wärmeübertragungsrates zu erhöhen, den Druckverlust zu verringern und insgesamt die Effizienz der WÜ zu steigern. Daher werden einige Beispiele genannt, die sich mit diesem Thema befassen.

Ein Versuchsaufbau für experimentelle und numerische Untersuchungen zur Leistung von Plattenwärmetauschern wurde im Jahr 2015 am Institute of Ocean Energy der Saga University in Saga, Japan durchgeführt [10].

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt und besteht aus zwei Kreisläufen, in denen das warme Wasser und das kalte Wasser im Gegenstrom am PWÜs Wärme austauschen. Temperatursensoren und Differenzdrucksensoren sind an den Ein- und Ausgängen des PWÜs installiert, um die Temperaturen und die Druckdifferenzen an diesen Stellen zu überwachen. Die Strömungsgeschwindigkeit im PWÜs wird mithilfe von elektromagnetischen Durchflussmessern kontrolliert, die an den Einlassöffnungen des PWÜs installiert sind. Zwei Pumpen sorgen für die Umwälzung des warmen und kalten Wassers aus den jeweiligen Tanks mit der gewünschten Temperatur und Fließgeschwindigkeit. Der getestete gelötete PWÜ besteht aus 8 Platten aus rostfreiem Stahl SUS316L mit 65 Grad Chevron-Welligkeit, die so angeordnet sind, dass sie in einem einzigen Durchgang eine Schleifenströmung bilden. Ein Foto der getesteten Platte ist in Abbildung 4.2 zu sehen, während Tabelle 4.1 die Spezifikationen des PWÜ zeigt [10].

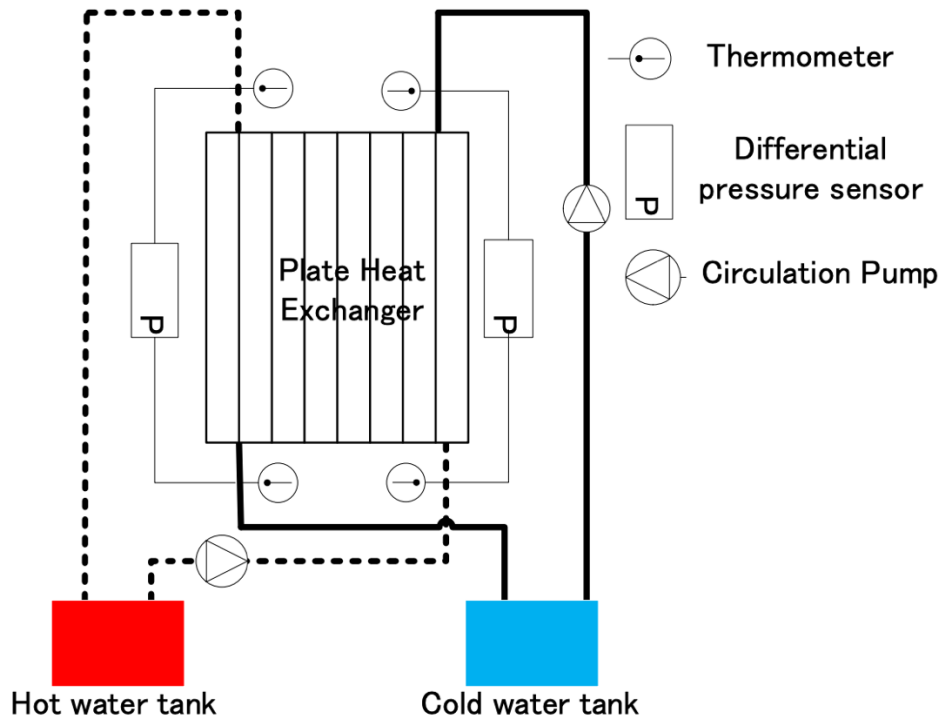


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [10].



Abbildung 4.2: der geprüften Platte [10].

Tabelle 4.1: Spezifikationen des PWÜs [10].

Height of Plate H: 190 mm
Width of Plate W: 80 mm
Thermal conductivity λ_w W/m·K: 16.3
Plate thickness δ_w : 0.3 mm
Gap between two plates b: 2 mm
Number to plates N: 8
Number of hot water channels N_h : 3
Number of cold water channels N_c : 4

Während jedes Versuchsdurchlaufs werden die Massenströme von warmem und kaltem Wasser so angepasst, dass in den Kaltwasser- und Warmwasserkanälen gleiche Geschwindigkeiten erzielt werden, die zwischen 0,3 und 0,9 m/s lagen. Alle Versuche werden mit Leitungswasser bei konstanten Temperaturen von 15 °C für die Kaltwasserseite und 30 °C für die Warmwasserseite durchgeführt. Abbildung 4.3 zeigt die Veränderungen der Gesamt- und Konvektionswärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit auf der Warmwasser- und Kaltwasserseite des Plattenwärmetauschers. Es wird ersichtlich, dass beide Koeffizienten linear mit der Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit ansteigen, bedingt durch den Anstieg des Turbulenzgrades. Abbildung 4.4 präsentiert eine dimensionslose Korrelation zwischen der Reynoldszahl und der Nusselt-Zahl, dividiert durch das Drittel der Prandtl-Zahl ($Pr^{1/3}$). Dabei wird erkennbar, dass alle Punkte auf einer geraden Linie liegen, was eine proportionale Beziehung zwischen Re und $NuPr^{1/3}$ für den untersuchten Bereich der Reynoldszahl impliziert [10].

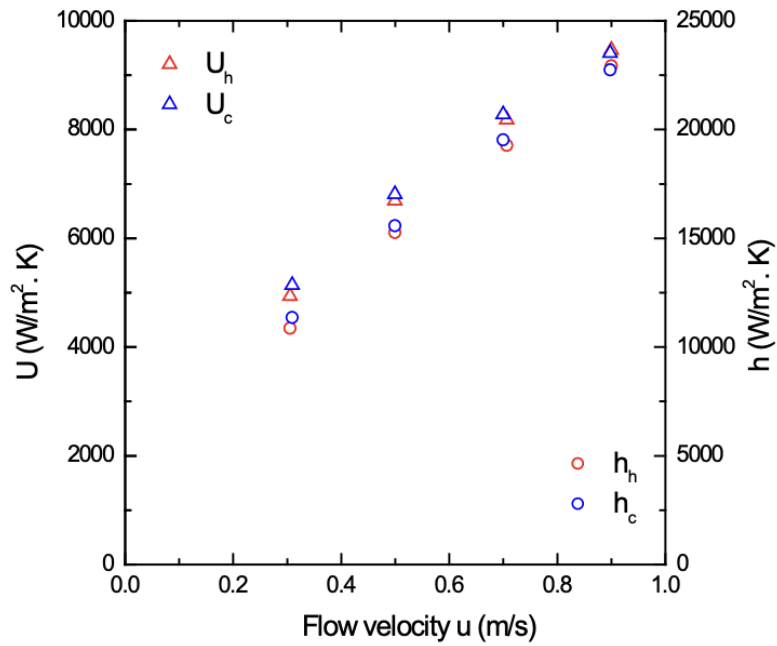


Abbildung 4.3: Variation der Gesamt- und Konvektionswärmeübergangskoeffizienten mit der Strömungsgeschwindigkeit [10].

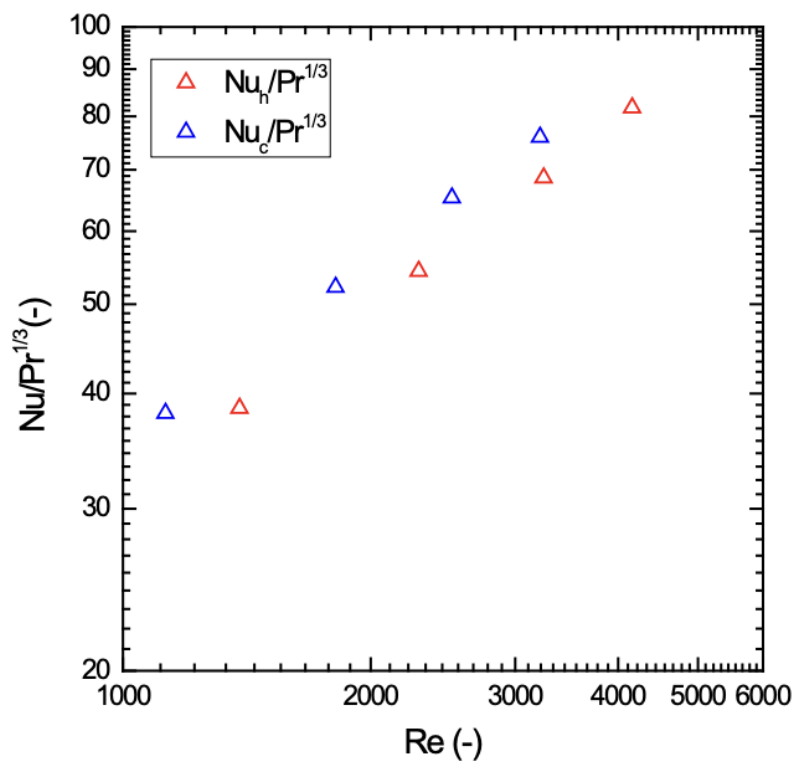


Abbildung 4.4: Merkmale von PWÜ, ausgedrückt als Korrelation der Nusselt-Zahl mit der Reynolds-Zahl [10].

Eine weitere Messung an einem Versuchsaufbau wurde am Institut für Thermodynamik an der Gottfried Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover im Rahmen der Dissertation von Herrn Grabenstein aus dem Jahr 2014 durchgeführt. Diese Arbeit befasste sich mit der Kondensation in PWÜ und verfolgte das Ziel, Korrelationsgleichungen zu entwickeln, die den Prozess in den Apparaten beschreiben können [12].

Während dieser Arbeit wird ein PWÜ entwickelt, der aus zwei gewellten Platten zusammengesetzt ist und dadurch einen einzelnen Strömungsspalt bildet Vgl. Abbildung 4.5.

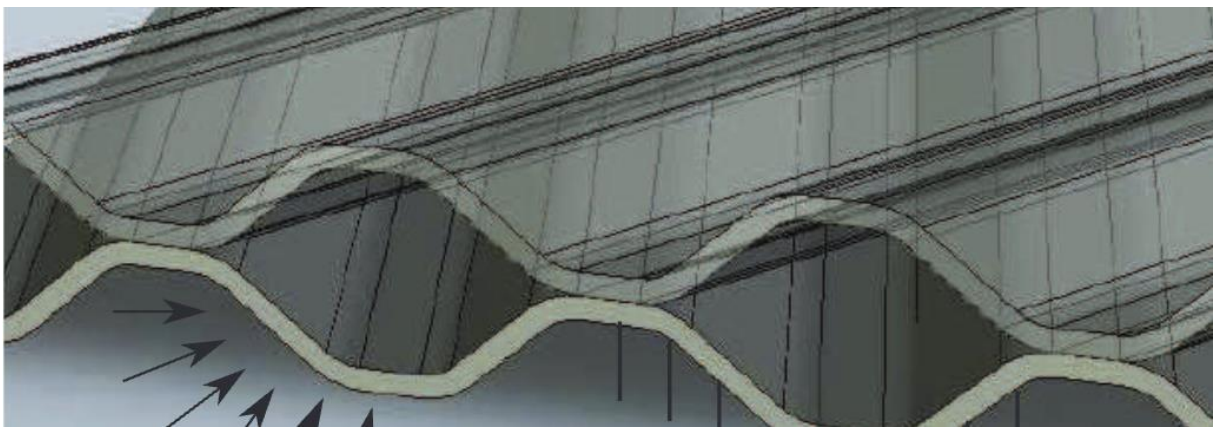


Abbildung 4.5: Zwei zusammengesetzte gewellten Platten [12].

Eine der Platten wird aus transparentem Polyurethan hergestellt, um eine optische Zugänglichkeit der inneren Strömung zu ermöglichen. Die Untersuchung der zweiphasigen Strömung im Plattenspalt ist abhängig vom Prägungswinkel als geometrischem Parameter. Um eine homogene Vermischung und eine gleichmäßige Verteilung der zweiphasigen Strömung über den Strömungsquerschnitt zu erreichen, werden die dreieckigen Verteil- und Sammelbereiche der Platten entfernt und durch ein angepasstes Verteilersystem ersetzt Vgl. Abbildung 4.6 [12].

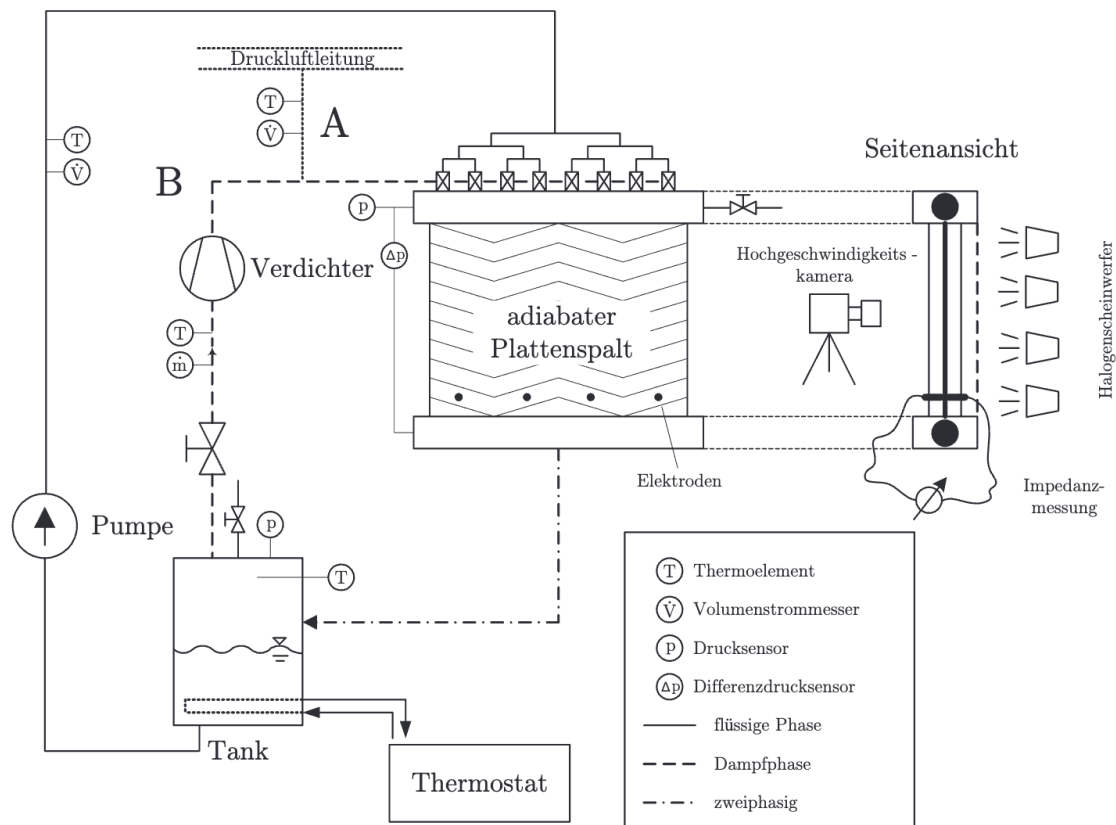


Abbildung 4.6: Experimenteller Untersuchungsaufbau zur Analyse von zweiphasigen Strömungsformen in gewellten Plattenspalten [12].

Am Ende der Strömungsrichtung werden die Platten über ihre gesamte Breite mit jeweils zwei gegenüberliegenden Elektroden versehen. Durch den Einsatz eines LCR-Messgeräts war es möglich, die elektrische Impedanz und Kapazität zwischen den entsprechenden Elektrodenpaaren zu bestimmen. Wie in Abbildung 4.6 dargestellt, existieren zwei Optionen, um diesen Versuchsaufbau zu betreiben. Option A betrifft die Verwendung von Wasser oder Luft als Versuchsmedium, während Option B auf das Kältemittel R365mfc abzielt [12].

Der in Abbildung 4.6 dargestellte Tank im Versuchsmodul dient der Speicherung des Arbeitsmediums. Währenddessen wird das Arbeitsmedium durch den vom Thermostat regulierten WÜ auf die Sättigungstemperatur erhitzt, wodurch die beiden gesättigten Phasen voneinander getrennt werden [12].

Um eine homogene Durchmischung des zweiphasigen Gemisches und eine gleichmäßige Verteilung über den Strömungsquerschnitt zu gewährleisten, wird ein Misch-

und Verteilerbereich konstruiert. In Abbildung 4.7 ist der detaillierte Verteilerbereich dargestellt, der acht Mischbereiche aufweist. In diesen Bereichen werden die beiden Phasen getrennt voneinander zugeführt und anschließend vermischt. Die flüssige Phase wird dabei von oben in die Mischer eingeleitet und reißt die seitlich zugeführte Dampfphase mit sich [12].

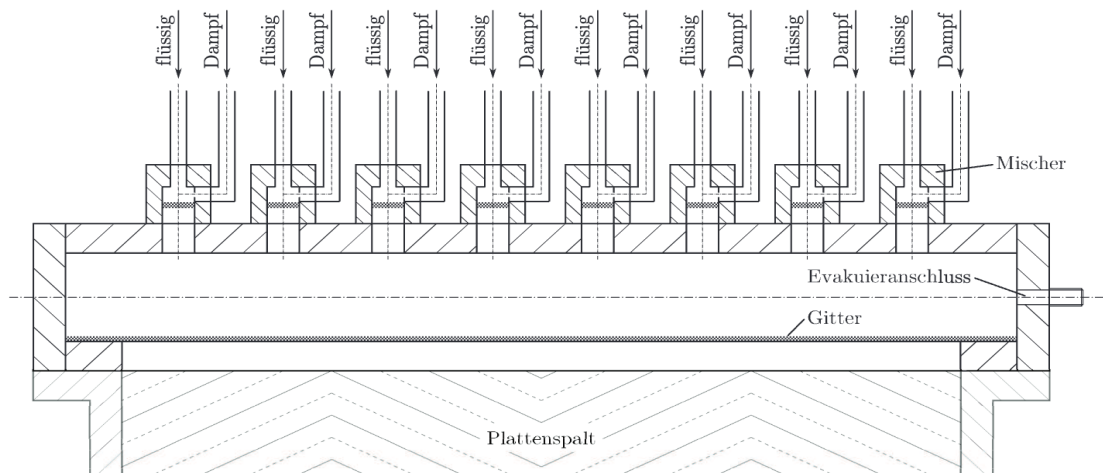


Abbildung 4.7: Verteilerbereich.

Nachdem das zweiphasige Gemisch das Versuchsmodul durchströmt, kann der Kondensationsprozess durch die transparente Polyurethanplatte visualisiert und mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet werden [12].

5 Versuchsmodul zur Visualisierung der zweiphasigen Wärmeübertragung

In der vorangegangenen Arbeit von Herrn Brauner wurde der Versuchstand, nach der Konstruktion durch Herren Horst, konzipiert. Beschrieben wird hier der Versuchstand, seine Funktionsweise und der Aufbau der Versuchsanlagen. Außerdem sollten die Änderungen und Verbesserungen am Versuchsaufbau erwähnt werden.

5.1 Funktionsprinzip und Fließschema des Versuchstands

Der Versuchsaufbau zielt darauf ab, den Einfluss von mikrostrukturierten Oberflächen auf Plattenwärmeübertragerplatten während Verdampfungs- und Kondensationsvorgängen zu untersuchen. Dabei wird zunächst jeder der beiden Kreisläufe einzeln betrachtet. Das Fließdiagramm des Versuchstands ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

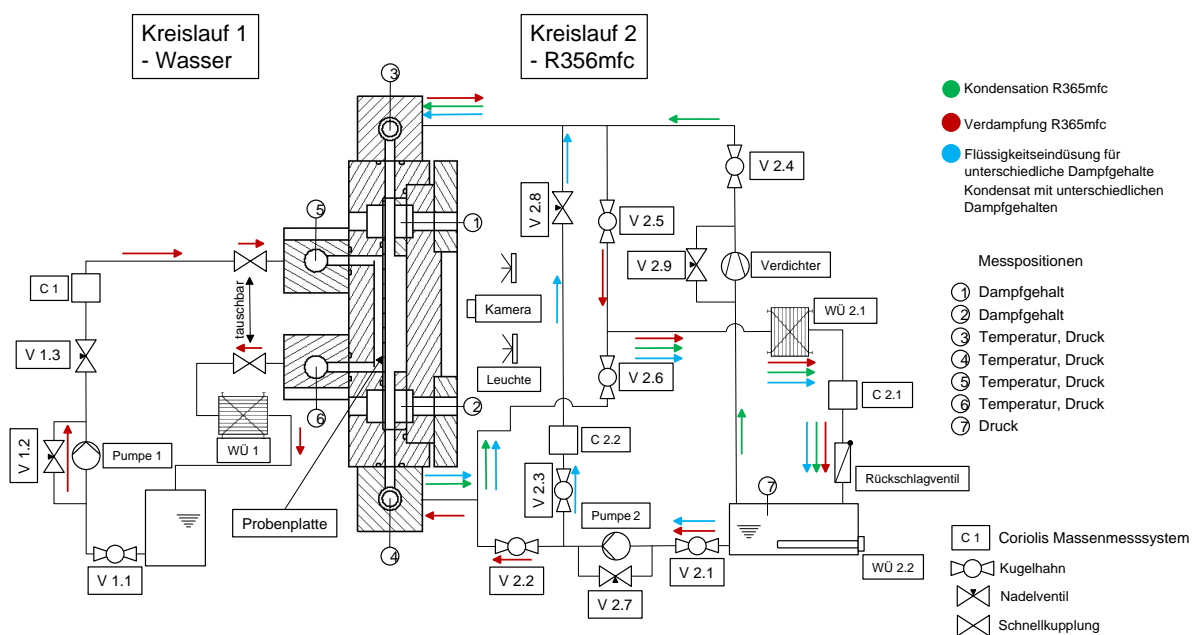


Abb.5.1: Fließdiagramm des Versuchstands [13].

Im ersten Kreislauf (Kreislauf 1) fließt das Wasser zunächst aus einem großen Wassertank und wird mittels einer Pumpe durch Rohrleitungen bis zum Versuchsapparat in der Mitte des Versuchstands geleitet. Der Temperaturbereich im Kreislauf 1 liegt zwischen 5 und 95 °C. Der in die Anlage geförderte Massenstrom kann durch einen

Bypass und das Nadelventil V 1.2 eingestellt werden. Anschließend fließt das Wasser durch das Absperrventil V 1.3 zum Coriolis-Massendurchflusssystem. Während der Verdampfung wird das Versuchsmodul von unten nach oben mit Wasser durchströmt. Vor der Rückführung des Wassers in den Wassertank wird die gewünschte Temperatur im WÜ1 bereitgestellt. In diesem WÜ1 fließen sowohl das Wasser als auch ein Wasserglykol-Gemisch, dessen Temperatur durch ein externes Thermostat eingestellt werden kann.

Bei der Kondensation fließt das Wasser von unten nach oben durch das Versuchsmodul, während sich in der unteren rechten Ecke des Tanks der Kältemitteltank mit einer Einscharubheizkörper bzw. dem WÜ 2.2 befindet. Diese Einscharubheizkörper erwärmt das Kältemittel auf die Sättigungstemperatur (313,15 K) [13]. Das flüssige Kältemittel bleibt am Boden des Tanks, während das verdampfte Kältemittel im oberen Teil des Tanks verbleibt. Bei der Verdampfung des Kältemittels wird die flüssige Phase im unteren Bereich abgeführt. Das Kältemittel wird durch die Pumpe in das System gefördert und durch den Bypass und das Nadelventil V 2.7 reguliert. Das Kältemittel soll verdampfen und gasförmig nach oben austreten. Die Gasphase wird nun in den WÜ 2.1 geleitet und vollständig kondensiert. Anschließend wird der Massenstrom mit einem Coriolis-Massenmesssystem ermittelt, bevor das nun vollständig flüssige Kältemittel in den Tank zurückfließt.

Bei der Kondensation (grüner Pfeil) werden in beiden Kreisläufen Ventile umgeschaltet. Im Kreislauf 1 fließt Wasser mit einer Temperatur von 20°C von unten nach oben, wo das gasförmige Kältemittel auf der anderen Seite kondensiert. Das Kältemittel gibt die Wärme an das Wasser ab, welche dann im nachgeschalteten Wärmeübertrager (WÜ 1) wieder abgegeben wird, so dass das Wasser mit einer Temperatur von 20°C in den Tank zurückkehrt. Auf der Kältemittelseite ist das Ventil V2.1 der Pumpe während der Kondensation geschlossen und das Ventil V2.4 hinter dem Verdichter geöffnet. Durch die unterschiedliche Dichte des Kältemittels sammelt sich die Gasphase im oberen Bereich des Tanks und gelangt dann durch das Rohr in den Kompressor, wodurch das Gas weiter in Richtung Versuchsapparatur fließt. Die Massenströme werden durch einen Bypass und das Nadelventil V2.9 eingestellt. Das gasförmige Kältemittel tritt nun von oben in den Versuchsapparat ein und kondensiert durch den Gegenstrom von kühlerem Wasser. Nach der Kondensation wird das Kältemittel dem WÜ

2.1 zugeführt, wo das noch nicht kondensierte Kältemittel vollständig in die flüssige Phase überführt wird. Der Massenstrom wird wie bei der Verdampfung mit einem Coriolis-Massenmesser erfasst und in den Tank zurückgeführt. Die Versuchsanordnung kann auch unterschiedliche Dampfgehalte untersuchen, indem ein Gemisch aus reinem Gas und reiner Flüssigkeit des Kältemittels erzeugt wird. Der Massenstrom der geförderten Flüssigkeit wird von einem Coriolis-Massenstrommesssystem erfasst und dann über einen 1/8-Leitungsverteiler in die Gasphase überführt.

Der im Kapitel 2 betrachtete PWÜ kann auch zur Beschreibung der Versuchsanordnung herangezogen werden. Im Gegensatz zum PWÜ besteht die Versuchsanordnung aus einer großen Platte von 50x50 mm [13], welche die beiden strömenden Medien voneinander trennt. Der Spalt des Kältemittels ist durch eine Polycarbonatscheibe optisch zugänglich, um mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera die Verdampfungs- und Kondensationsprozesse zu beobachten. Sensoren sind zur Messung von Druck und Temperatur installiert.

5.2 Aufbau des Versuchstandes und der Versuchsanordnung

Die Konstruktion des Versuchsmoduls wird unter Berücksichtigung von Faktoren wie Qualität und Sicherheit vereinfacht, um eine reibungslose Durchführung des Experiments zu gewährleisten.

5.2.1. Die Versuchsanordnungsstruktur

Die Abbildung 5.2 zeigt die gesamte Versuchsanordnung, deren einzelne Teile in der Abbildung schrittweise betrachtet werden. Die Vorderseite der Abbildung zeigt den Einlass (oben) und Auslass (unten) für das Kältemittel, während die Rückseite den Ein- und Auslass für das Wasser zeigt. Die aus Aluminium gefertigte Halterung für die LED-Beleuchtung sorgt für ausreichende Beleuchtung der Hochgeschwindigkeitskamera, die zur Aufzeichnung während des Versuchsdurchlaufs dient. Die Bohrungen in der Abbildung ermöglichen das Einsetzen der Kapazitätssensoren [13].

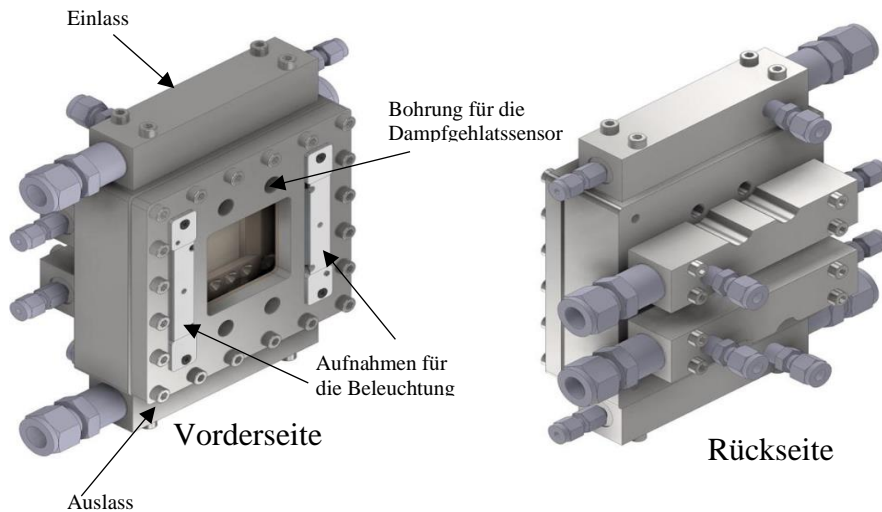


Abb.5.2: gesamte Versuchsanordnung [13]

Alle Bestandteile der Versuchsanordnung sind sorgfältig mit einer CNC-Maschine hergestellt. Der aus Edelstahl gefertigte Rahmen ähnelt dem Festplattenrahmen des PWÜs, der im Kapitel 2 beschrieben wird. Um eine vergleichbare Funktionsweise der PWÜ zu gewährleisten, sind O-Ringe und eine hintere Begrenzung des Wasserspalts vorhanden Abbildung 5.3 [13].

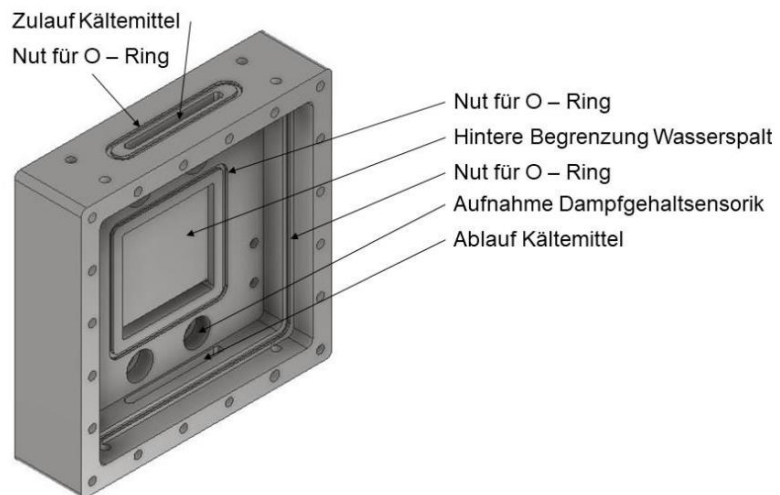


Abb.5.3: Rahmen der Versuchsanordnung [13].

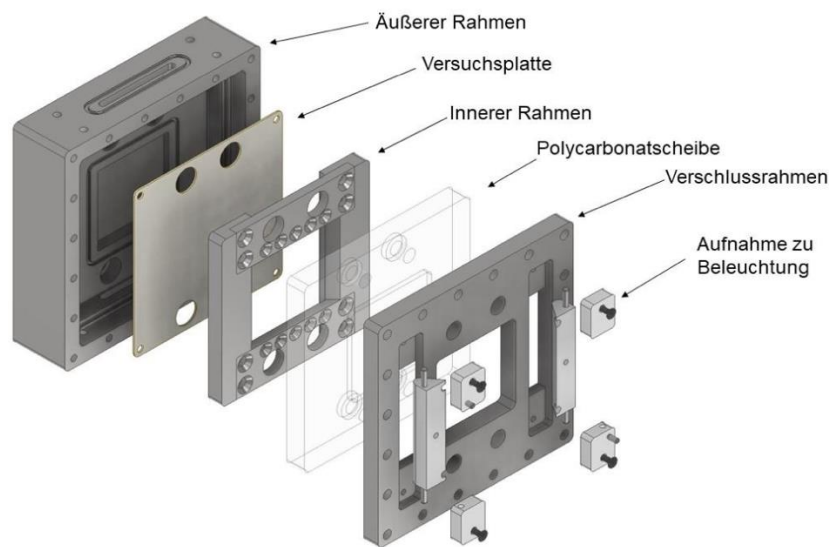


Abb.5.4: Bestandteile der Versuchsanordnung [13].

Die Begrenzung und die in Abbildung 5.4 dargestellte Versuchsplatte verhindern die Vermischung des Wassers mit dem Kältemittel, wie es beim PWÜ im Kapitel 2 der Fall war. Wie beim PWÜ ist eine Losplatte erforderlich. Der innere Rahmen wird in diesem Fall durch den Verschlussrahmen und den Polycarbonat-Scheiber beschrieben, der einen durchlässigen Bereich für die Beobachtung ermöglicht. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Kältemittel und das Wasser nicht zwischen den Platten strömen, sondern zwischen der Versuchsplatte und dem äußeren Rahmen bzw. dem inneren Rahmen. Die im 35-Grad-Winkel abgeschrägten Profile können mit den Zylinderstiften gedreht bzw. eingestellt werden. Die Blöcke, die im Verschlussrahmen festgeschraubt sind, ermöglichen die drehbare Lagerung der Beleuchtung. Damit kann ein Winkel zwischen 35 und 75 Grad zur Versuchsplatte eingestellt werden. Die 55-Grad-Einstellung (zur Versuchsplatte) ist die Standardeinstellung, die einem Winkel von 0 Grad des Profils entspricht. Die Madenschraube M3 in Abbildung 5.5 wird zur Arretierung verwendet, nachdem der Winkel eingestellt wird. Eine Schnittansicht der Vorderseite der Abbildung 5.2 in Abbildung 5.6 bietet eine bessere Vorstellung. Eine weitere Schnellkupplung wird an den Rohrleitungen (Kältemittel-Einlassseite) verwendet, um die Evakuierung der Versuchsanordnung zu vereinfachen. Der Evakuierungsprozess entfernt das Inert-Gas aus der Versuchsanordnung und ermöglicht somit die erforderlichen Bedingungen für die Versuchsdurchführung [13].

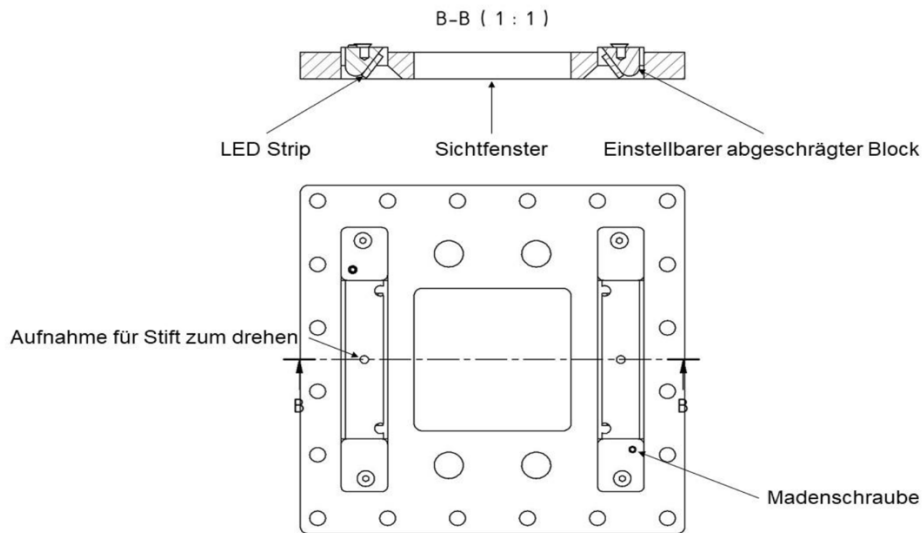


Abbildung 5.5: Madenschraube zur Arretierung [13].

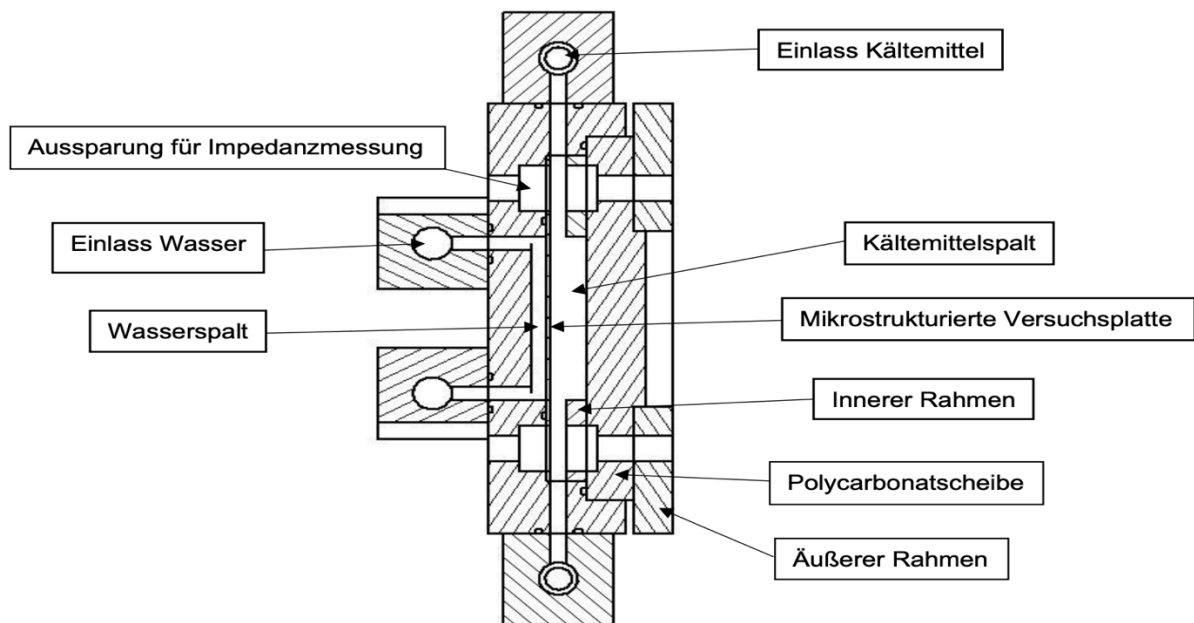


Abbildung 5.6: Schnittansicht der Vorderseite der Versuchsanlage [13].

Es ist sehr wichtig, bei jedem Ein- und Auslass die Temperatur und den Druck messen zu können, um später das Verhalten von Kondensation und Verdampfung beschreiben zu können. Daher stehen die in Abbildung 5.7 gezeigten Aufnahmen für die Temperatur- und Drucksensoren zur Verfügung. Die M5 Schrauben sind für die Befestigung des Profils auf dem äußeren Rahmen vorhanden und werden zur Befestigung des Verschlussrahmens verwendet.

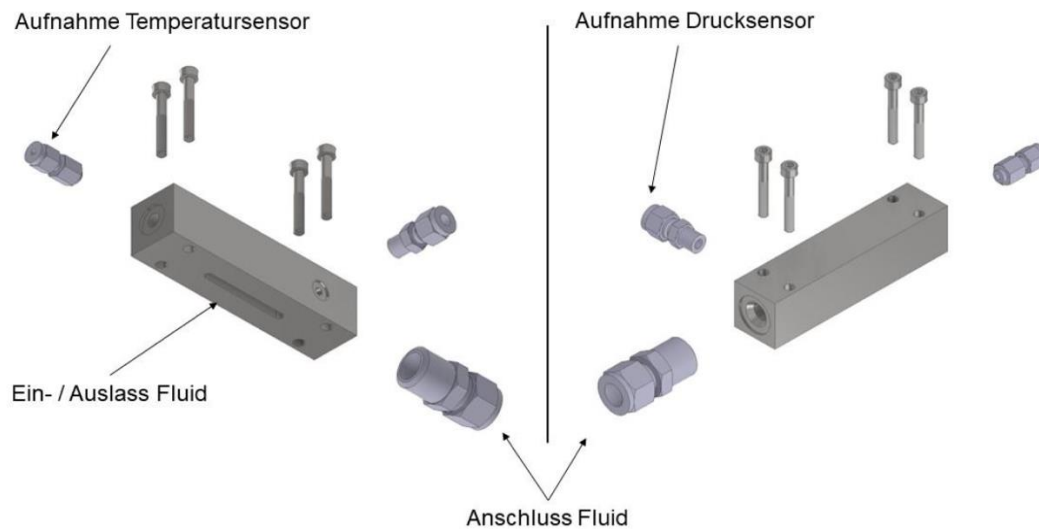


Abbildung 5.7: Aufnahmen für die Temperatur-und Drucksensoren [13].

Während des Testlaufs mit verschiedenen Dampfgehalten wird festgestellt, dass die Dampfverteilung über der Flüssigkeit nicht gleichmäßig war. Aus diesem Grund werden verschiedene Methoden vorgeschlagen, um eine gleichmäßige Verteilung des Dampfes zu erreichen. Dazu gehören der Einsatz eines Dampfverteilers, einer Sprühvorrichtung oder Sprühdüsen, um den Dampf in die Flüssigkeit einzubringen. Diese Geräte können an den Rohrleitungen, insbesondere auf der Kältemittel-Einlassseite, installiert werden, um eine gleichmäßige Verteilung des Dampfes über der Flüssigkeit zu gewährleisten.

- Dampfverteiler: Hier wird Dampf durch spezielle Vorrichtung in die Flüssigkeit geblasen Vgl. Abbildung 5.8. Das Hauptziel eines Dampfverteilers besteht darin, den Dampf gleichmäßig und effizient an verschiedene Punkte innerhalb eines Systems zu verteilen. Der Dampfverteiler ist mit mehreren Anschlüssen ausgestattet, die mit verschiedenen Punkten verbunden sind, an denen Dampf benötigt wird. Diese Konfiguration dient lediglich der Dampfverteilung und funktioniert möglicherweise nicht unbedingt wie erwartet. Bessere Ergebnisse können wahrscheinlich durch den Einsatz von Sprühdüsen und Sprühvorrichtungen erreicht

werden. Zudem sind Sprühdüsen und Sprühhvorrichtungen kompakter und effizienter

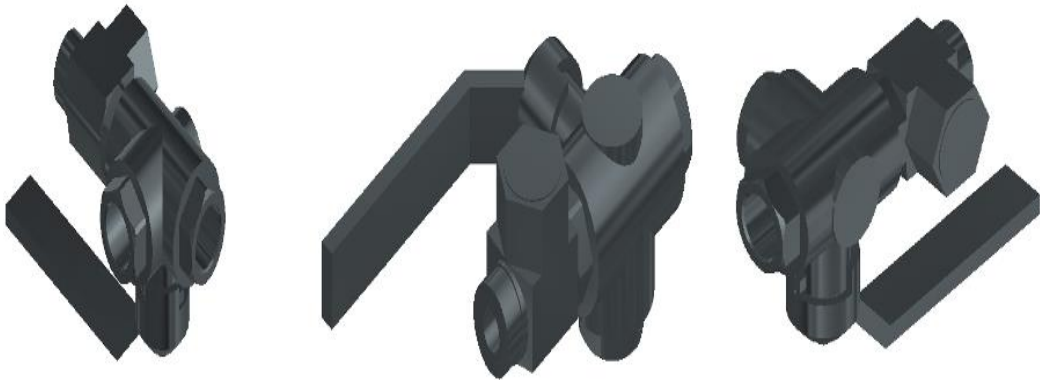


Abbildung 5.8: Dampfverteiler.

- Sprühhvorrichtung: Hier wird der Dampf in die Flüssigkeit eingebracht bzw. injiziert Vgl. Abbildung 5.9 das Anschlussstück. Dazu soll eine Dichtung, Kontermutter und Sprühhkopf vorhanden sein. Die Funktionsweise einer Sprühhvorrichtung kann je nach Anwendung und Konstruktion variieren. In diesem Fall wird eine Sprühhvorrichtung beschrieben, die mit Druck arbeitet. Eine solche Sprühhvorrichtung zerstäubt Flüssigkeiten in feine Tröpfchen, indem sie die Flüssigkeit unter Druck setzt und durch speziell gestaltete Düsen leitet. Die resultierenden Tröpfchen werden anschließend gleichmäßig über dem Dampf verteilt [33]



Abbildung 5.9: Anschlussstück.

- Sprühdüsen: Hier wird der Dampf über die Flüssigkeit gesprüht Vgl. Abbildung 5.10. Sprühdüsen sind ein zentraler Bestandteil von Sprühvorrichtungen und funktionieren nach ähnlichen Prinzipien. Sie sind für die Zerstäubung der Flüssigkeit und die anschließende Verteilung der Tröpfchen verantwortlich [33].

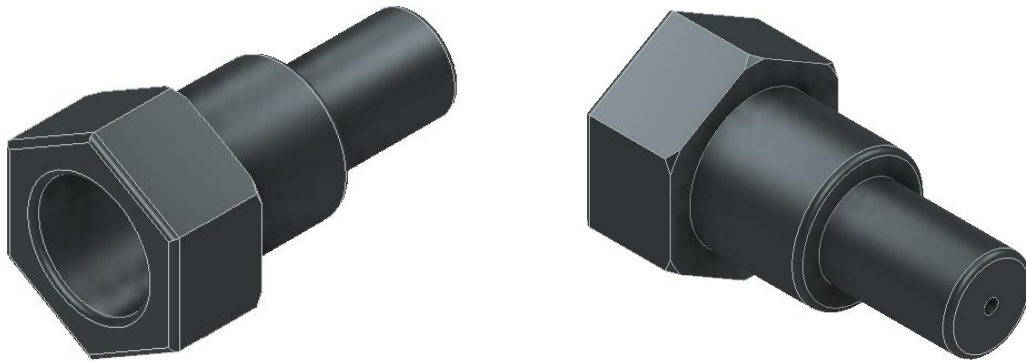


Abbildung 5.10: Sprühdüsen.

5.2.2 Die Versuchsstandskonstruktion

In diesem Abschnitt wird die Konstruktion des Versuchsstands im Detail beschrieben. Dazu werden Aluminiumprofile des Typs Rexroth mit Querschnittsabmessungen von 40 x 40 mm auf die benötigten Größen zugeschnitten und über speziell für das System vorgefertigte Rexroth-Winkel und -Konsolen über Schraubverbindungen mit dem Außenrahmen verbunden. Der Rahmen ist mit vier Rollen ausgestattet, die jeweils über eine Aluminiumplatte mit dem Boden des Rahmens verbunden sind.

Der Versuchsstand ist in drei verschiedene Bereiche unterteilt. Der linke Bereich ist für den Kältemittelkreislauf vorgesehen, in dem ausreichend Platz für die benötigten Geräte vorhanden ist. Dafür befindet sich im linken Bereich eine Halterung für den Kältemitteltank und den Kompressor. Im oberen Bereich des Kreislaufs befindet sich eine Halterung für den WÜ 2.1. Darauf befinden sich auch die Siemens-, HP- und Agliet-Messgeräte, die zur Umwandlung von Signalen benötigt werden Vgl. Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12. Die Messgeräte erfassen die gemessene Kapazität, welche von kapazitiven Sensoren ermittelt wird, und leiten diese Informationen an den Messrechner weiter. Für die Regulierung der Wassertemperatur in einem Kreislauf wird ein Thermostat benötigt, für den ein mittlerer Bereich vorgesehen ist. Im oberen

Bereich ist eine Halterung für den Testmodul, das drehbar gelagert wird, um Versuche mit verschiedenen Winkeln durchzuführen. Der dritte Teilbereich des Systems umfasst eine Halterung für die Wasserpumpe, eine Halterung für den Wassertank Vgl. Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12.

Die Pumpe vom Typ Movitec V 2/2 B von KSB fördert das Wasser im späteren Testlauf mit einem Volumenstrom von 1,86 m³/h. Zur Regulierung des Volumenstroms ist ein eingebauter Bypass vorhanden. Um ausreichend Wasser im System vorrätig zu haben, wird ein Wassertank mit einem Volumen von 0,0152 m³ installiert. Der Wassertank verfügt über zwei Anschlüsse: einen an der oberen Abdeckung für die Wasserrumwalzung und einen an der Unterseite fur die Wassereinspritzung in den Kreislauf. Der Durchfluss des Wassers wird von einem Micro Motion Coriolis-Massedurchflussmesser erfasst, nachdem das Wasser durch einen Schlauch vom Wassertank zur Pumpe geflossen ist.

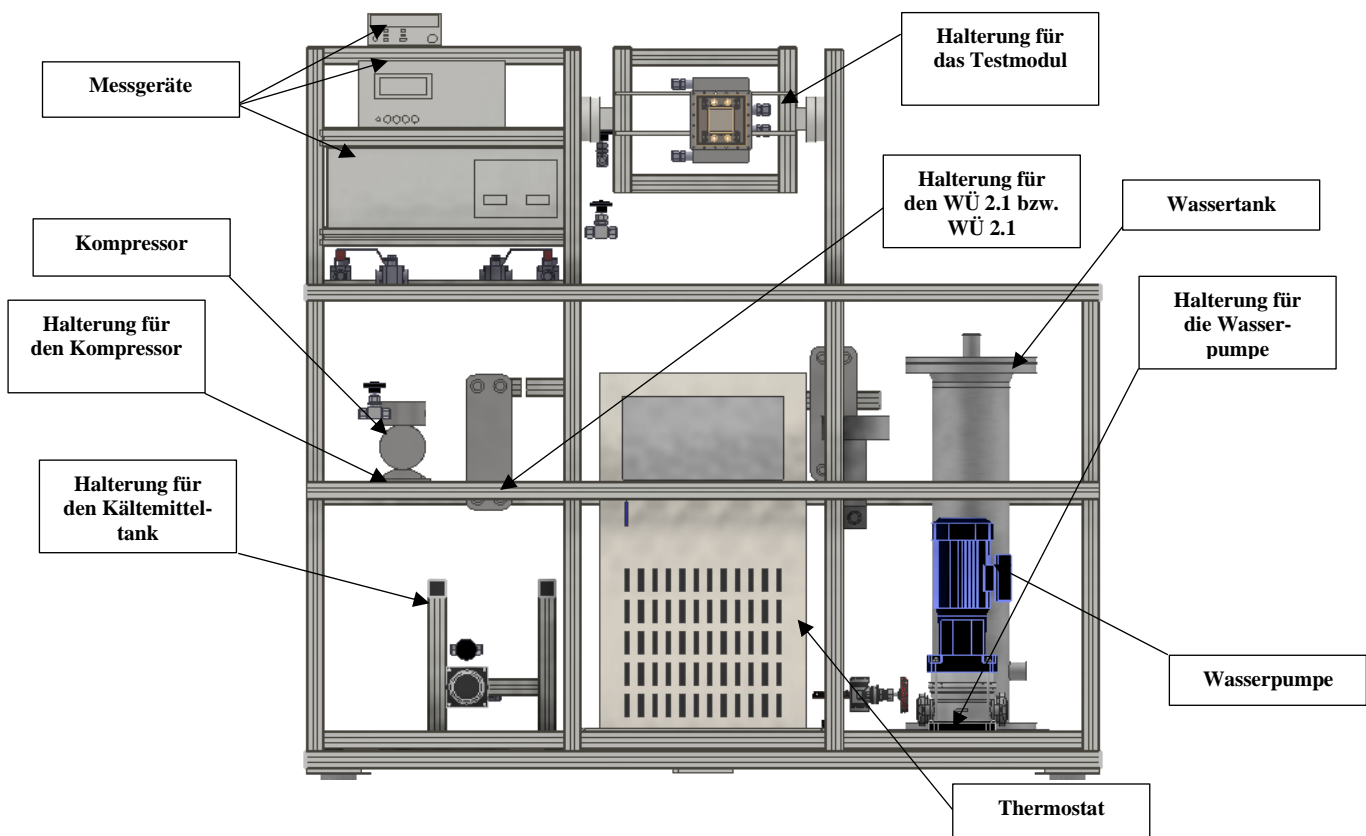


Abbildung 5.11: Versuchsstands Aufbau.

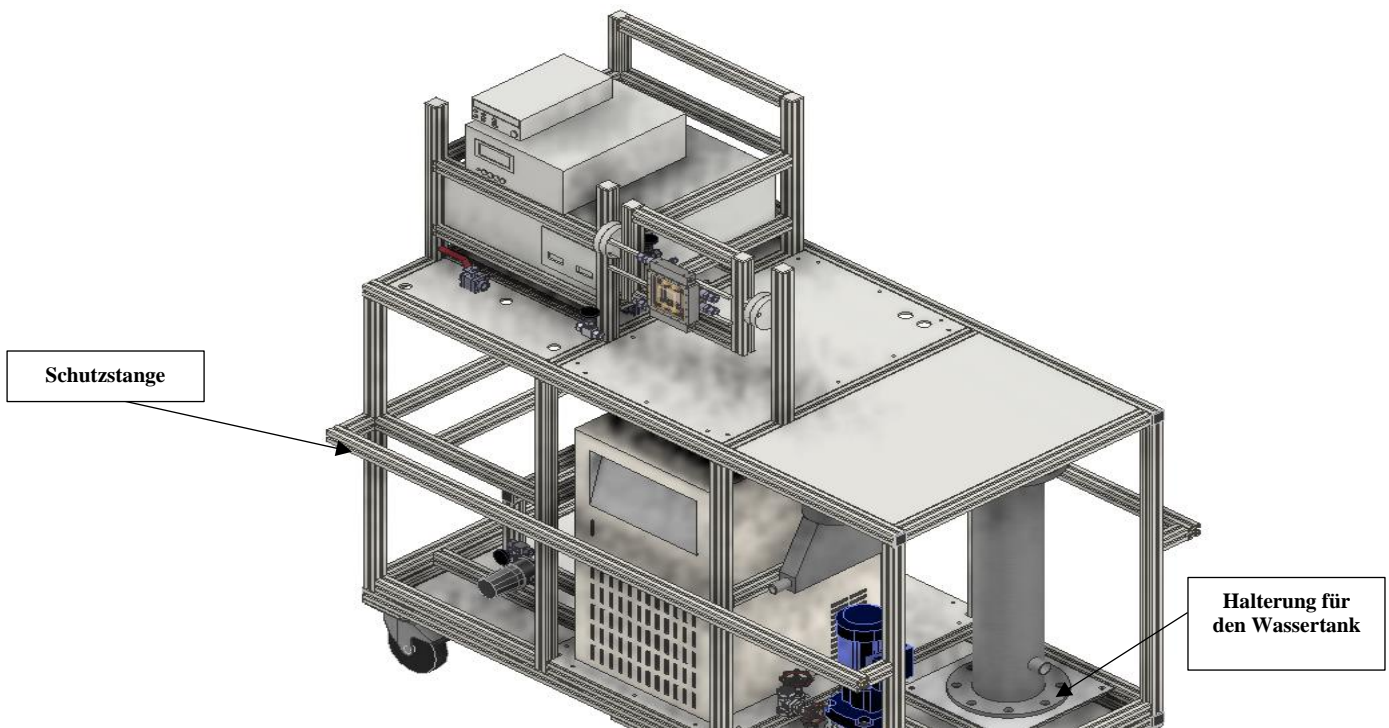


Abbildung 5.12: Versuchsstands Aufbau zweite Ansicht.

Die Einbauvariante des Durchflussmessers ist ein Typ der F-Serie. Nach dem Verlassen des C1 in Abbildung 5.13 fließt das Wasser durch einen $\frac{1}{2}$ "-Schlauch zur Schnellkupplung (11). Die Rückführung des Wassers aus dem Experimentiermodul erfolgt über eine zweite Schnellkupplung, wonach das Wasser durch einen $\frac{1}{2}$ "-Schlauch zum eingebauten WÜ 1 fließt. Das Wasser wird im Gegenstrom geführt, so dass das Wasser im unteren Anschluss eintritt und am oberen Anschluss wieder austreten kann. Über einen 1"-Schlauch wird das Wasser dann in den Wassertank zurückgeführt [13].

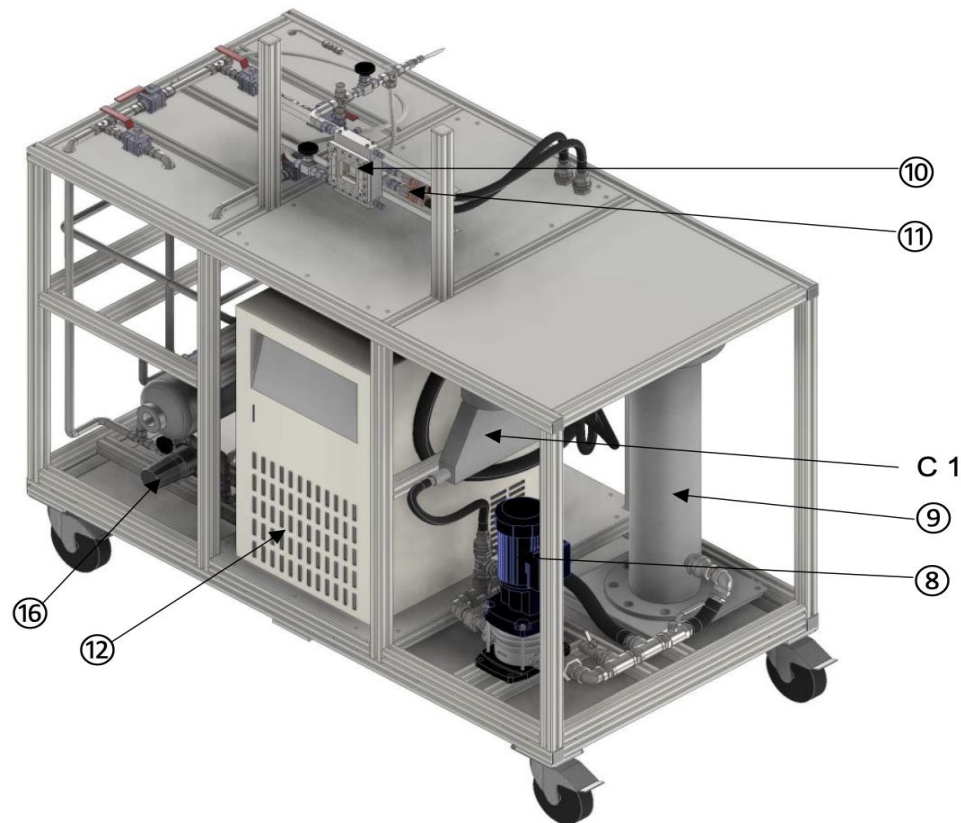


Abbildung 5.13: Versuchsaufbau für die Schläuche Erläuterung.

Der Kaltwassernetz des Campus ist durch 1-Zoll-Schläuche mit dem Thermostat verbunden. Das Kaltwasser im Kreislauf ist temperaturbeständig bis zu 120 Grad Celsius. Der Kältemittelkreislauf besteht aus einem Kältemittelbehälter mit einer Einschraubmöglichkeit für einen Rohrheizkörper (WÜ 2.2) und einem Drucksensor. Die Temperatur wird durch ein Widerstandsthermometer überwacht, während der Druck mit einem Absolutdrucksensor von STS gemessen wird. Der Kältemittelbehälter ist mit einem vorderen Schauglas ausgestattet, um den Füllstand zu überwachen. Zwei Swagelok-Rohrverschraubungen befinden sich an der oberen Seite des Kältemittelbehälters und eine ist an der Unterseite angeschweißt, um das flüssige und gasförmige Kältemittel im Kreislauf zu führen und zurück in den Tank zu leiten [13]. Das flüssige Kältemittel wird mit einer Membranpumpe (Typ FP 150 1,50 von KNF) vor dem Tank in den Kreislauf gepumpt. Die maximale Förderleistung beträgt 1,1 L/min und die Pumpe kann bei einer Medientemperatur von 20 bis 80°C eingesetzt werden. Ein Bypass wird eingebaut, da die Pumpe einen zu hohen Durchfluss aufweist. Die Pumpe wird mit einem Befestigungssystem des Herstellers am Rahmen befestigt, das vier Gummi-Lager enthält, um die Vibrationen zu dämpfen. Der Kompressor (Typ

N922S_E IP20) des Herstellers KNF befindet sich über dem Kältemittelbehälter. Der Kompressor kann gasförmiges Kältemittel mit einer Förderleistung von 21 L/min in den Kreislauf abgeben und hat im Dauerbetrieb einen maximal zulässigen Betriebsdruck von 4,0 bar. Die Verbindung der WÜ 2.1 mit dem Kaltwassernetz erfolgt mittels 1-Zoll-EPDM-Schläuchen, während die restliche Rohrleitung mit ½-Zoll-Edelstahlrohren und zugehörigen Verschraubungen realisiert wird. Die im Versuch verwendeten Ventile sind von Swagelok und befinden sich in verschiedenen Kreisläufen des Prüfstands [13].

Zusammenfassend besteht das System aus einem Wasserkreislauf und einem Kältemittelkreislauf, die jeweils von Pumpen angetrieben werden. Der Wasserkreislauf enthält einen WÜ zur Erwärmung des Wassers, einen Wassertank zur Speicherung des Wassers und einen Thermostat zur Regelung der Wassertemperatur. Der Kältemittelkreislauf enthält einen Verflüssiger zur Abgabe von Wärme an die Umgebung und einen Verdampfer zur Aufnahme von Wärme aus dem zu kühlenden Medium. Die Temperatur- und Druckdaten der beiden Kreisläufe werden durch Sensoren erfasst und von einem Messrechner gesteuert. Das gesamte System der Wasserseite ist durch konische Gewinde und Teflonband abgedichtet und die Rohre sind mit Rohrschellen befestigt [13]. Zusätzlich werden Schutzstangen an der Vorder- und Rückseite des Prüfstands angebracht, um die Sicherheit der vor Ort tätigen Prüfer zu gewährleisten Vgl. Abbildung 5.14.

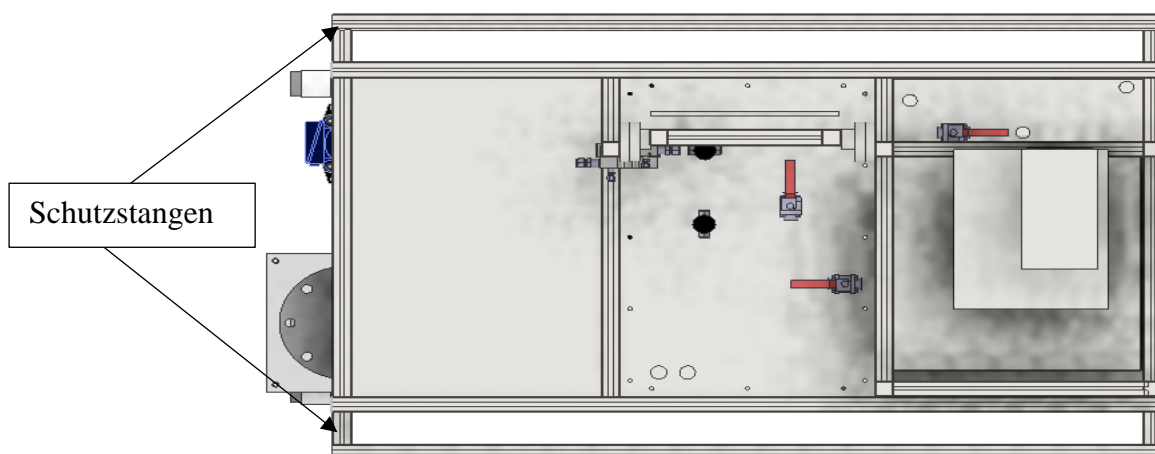


Abbildung 5.14: Versuchsaufbaus Schutzstangen.

6 Messtechnik

In der Wissenschaft sind präzise Messungen essenziell, um ein besseres Verständnis der untersuchten Prozesse zu erlangen. Bei der Analyse von Phasenwechsellvorgängen ist Messtechnik unerlässlich, um eine umfassende Charakterisierung zu ermöglichen. Optische Zugänglichkeit ist wichtig, um Strömungsformen und Oberflächeneigenschaften zu bestimmen. Gleichzeitig müssen physikalische Größen wie Druck, Massenströme und Temperaturen erfasst werden. Im vorliegenden Experiment ermöglicht der Versuchsstand die Beobachtung von Verdampfung und Kondensation mittels Hochgeschwindigkeitskamera und führt eine thermodynamische Bilanzierung durch.

6.1 Messaufnehmer- LabVIEW

LabVIEW ist eine graphische Programmiersprache, die hauptsächlich für die Datenerfassung, -analyse und -visualisierung verwendet wird. Das Besondere an LabVIEW ist die visuelle Darstellung des Programmcodes durch Symbole und Verbindungen, die als Blockdiagramm bezeichnet werden. Dadurch wird die Programmierung sehr intuitiv und leicht verständlich. LabVIEW wird in verschiedenen Bereichen eingesetzt, wie z.B. der Automatisierungstechnik, der Messtechnik, der Regelungstechnik, der Signalverarbeitung, der Bildverarbeitung und der Simulation. Es bietet eine breite Palette an Funktionen und Werkzeugen, einschließlich Echtzeit- und FPGA-Programmierung, die es ermöglichen, komplexe Anwendungen zu entwickeln. Insgesamt ist LabVIEW eine vielseitige und leistungsstarke Plattform, die es Ingenieuren, Wissenschaftlern und Forschern ermöglicht, Daten zu sammeln, zu verarbeiten und zu analysieren, um wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen [22].

Die Benutzeroberfläche für den Versuchsstand ist grundlegend in drei Teile gegliedert:

- Der erste Teil widmet sich der Messung von Temperaturen, Drücken, Massen- und Volumenströmen Vgl. Abbildung 6.1.
- Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Regelung und ermöglicht das Ein- und Ausschalten des Reglers sowie die Anpassung der Verstärkungswerte Vgl. Abbildung 6.1.

- Der dritte Teil ist für die Durchführung von Kapazitätsmessungen zuständig Vgl Abbildung 6.2.

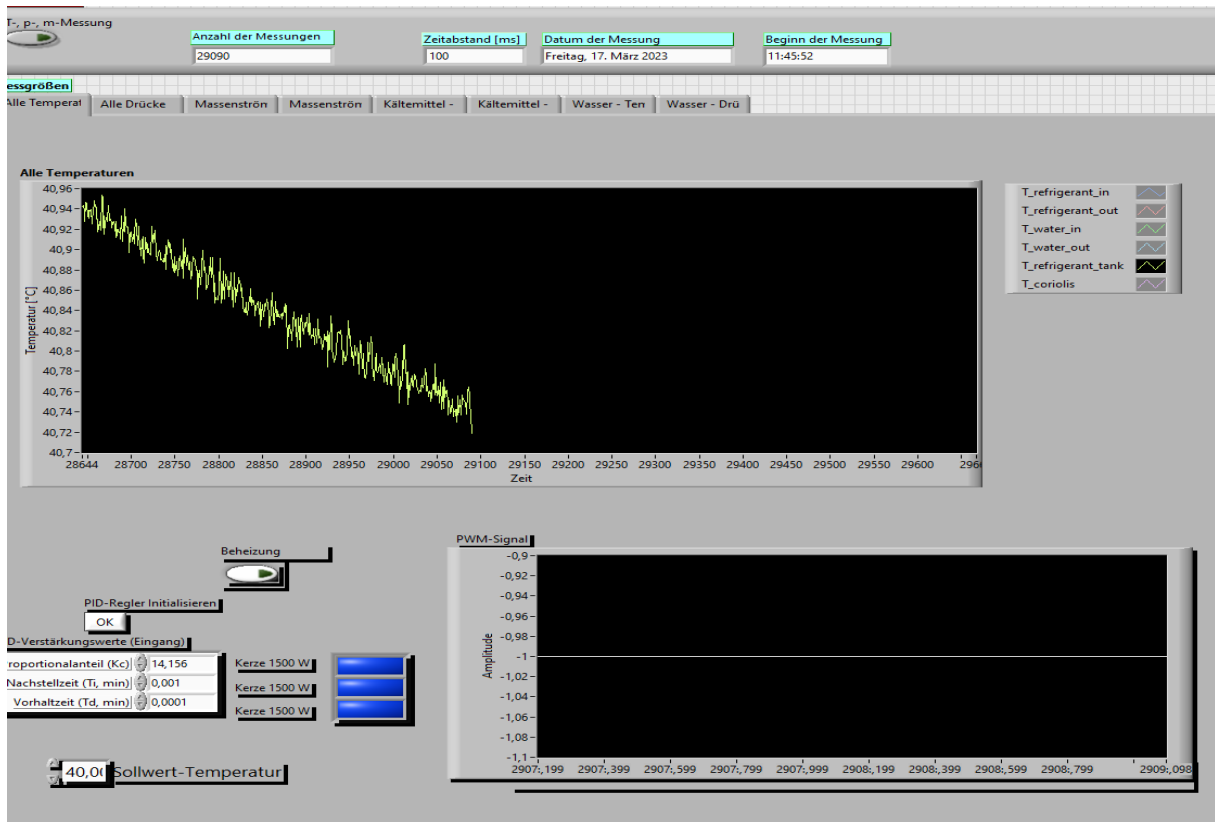


Abbildung 6.1: Programm Teil 1,2/ PID-Regler und PTM-Messungen.

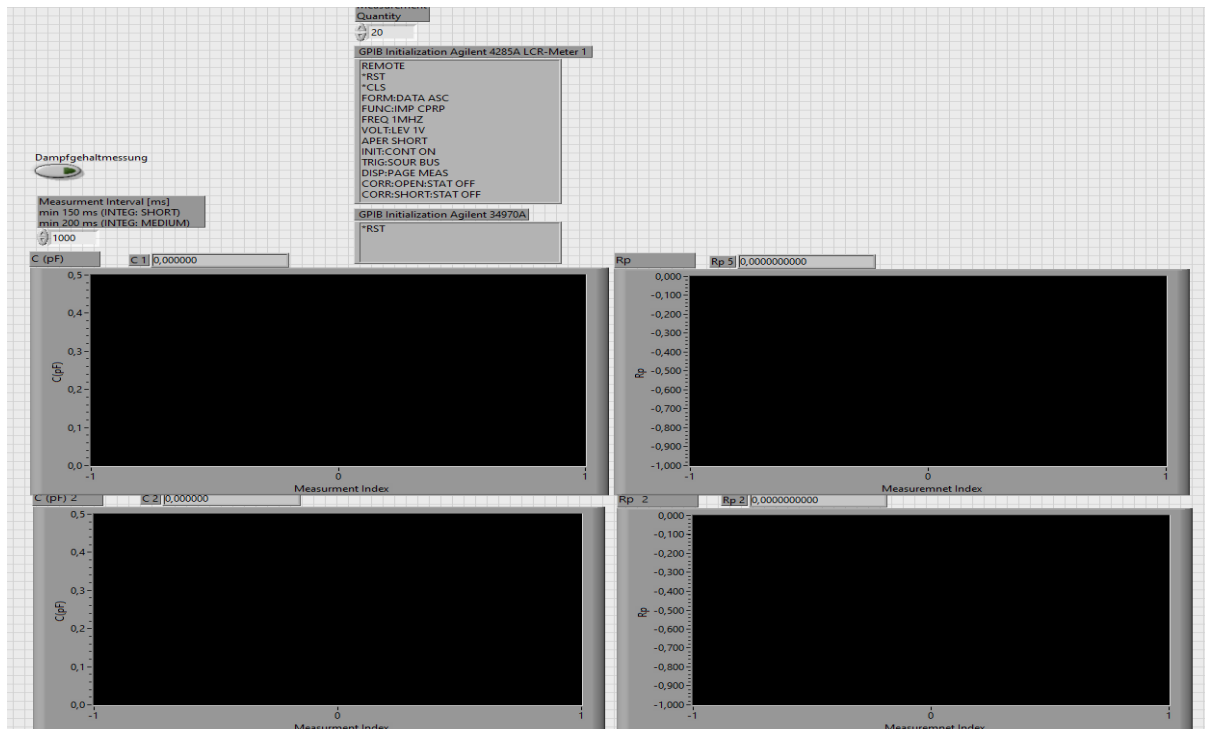


Abbildung 6.2: Programm Teil 3 / Dampfgehaltmessungen.

In Abbildung 6.3 sieht man die Konvertierung in SI-Einheiten bzw. die Kalibrierungswerte die für die Umrechnung notwendig sind. Das Programm erstellt Daten und führt gegebenenfalls eine Konvertierung in SI-Einheiten durch. Nach der Konvertierung werden die Daten in Textdateien in tabellarischer Form gespeichert und als Datei A und Datei B bezeichnet. Datei B enthält die von der Visualisierungsdatei umgewandelten Daten, während Datei A die Rohdaten, speichert, die von den Messumformern an den Messrechner übertragen werden.

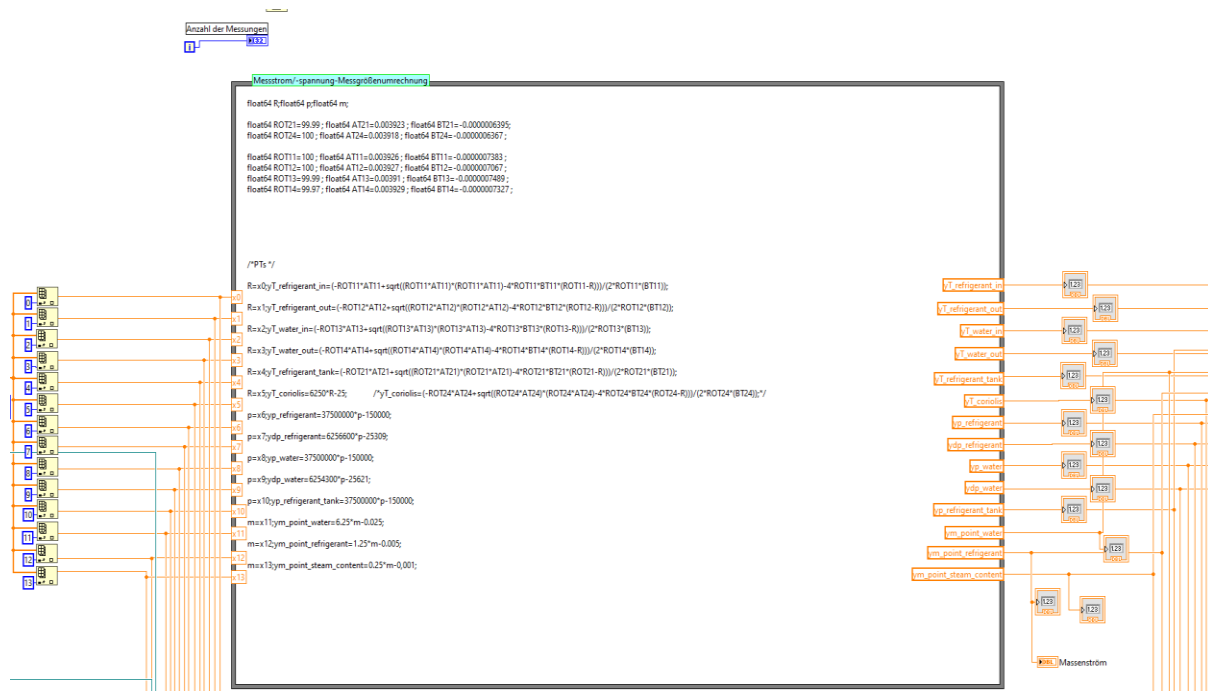


Abbildung 6.3: die Konvertierung in Si-Einheiten bzw. die Kalibrierungswerte.

6.2 Druckmessung

Um den Druck in einem System an verschiedenen Stellen zu messen, können piezoresistive Drucksensoren verwendet werden. Für die Erfassung des Differenzdrucks zwischen Ein- und Auslass des Versuchsmoduls werden speziell entwickelte Differenzdrucksensoren des Typs IPD40 von der Firma ICS Schneider Messtechnik eingesetzt. Diese Sensoren nutzen die piezoresistive Technologie, bei der der Druck auf eine Membran wirkt und eine Deformation hervorruft, die eine Änderung des elektrischen Widerstands eines Siliziumsensors bewirkt. Das erzeugte elektrische Signal wird dann in eine entsprechende Druckeinheit umgewandelt. Er nutzt eine Edelstahlmembran und Prozessanschluss, die laserverschweißt sind, um eine hohe Medienbeständigkeit und Langzeitstabilität zu gewährleisten [20][21].

Darüber hinaus werden drei Absolutdrucksensoren des Typs ATM.ECO von der Firma STS verbaut, um den Absolutdruck an verschiedenen Stellen im System zu messen. Zwei der Absolutdrucksensoren sind am Versuchsmodul angebracht und können den Absolutdruck des Kältemittels und des Wassers erfassen. Der dritte Absolutdrucksensor wird an der Rückführung des Kältemittels, oberhalb des Kältemittel tanks, platziert, um den Druck innerhalb des Tanks zu erfassen. Auch diese Sensoren nutzen die piezoresistive Technologie, um den Druck in ein elektrisches Signal umzuwandeln, das dann kalibriert und in eine entsprechende Druckeinheit umgerechnet wird. die Wirkprinzipsunterscheidung wird in Abbildung 6.4 durch eine schematische Darstellung verdeutlicht.

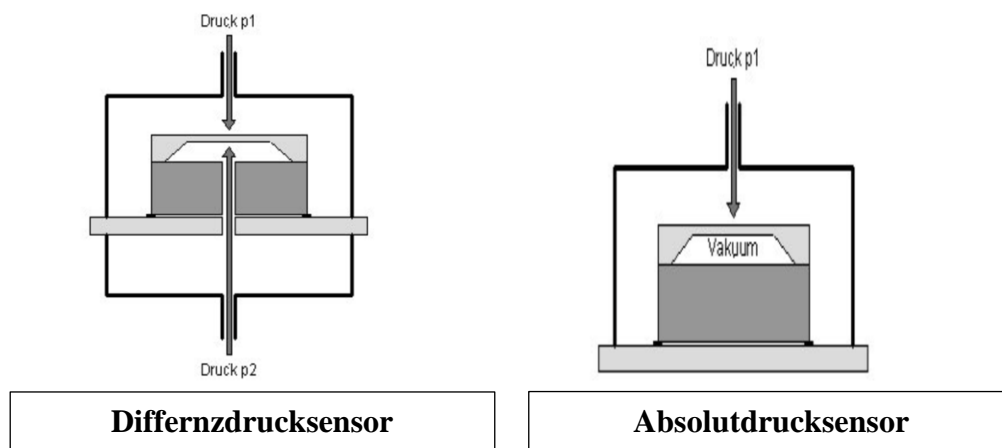


Abbildung 6.4: Wirkprinzipsunterscheidung der Absolut- und Drucksensoren [20].

Die Absolutdrucksensoren haben eine Messbereichsgrenze von 0 bis 6 bar, während die Differenzdrucksensoren eine Messbereichsgrenze von 0 bis 1 bar aufweisen.

Ein Absolutdrucksensor misst den absoluten Druck eines Mediums, d.h. den Druck im Verhältnis zum absoluten Vakuum. Dazu wird der Druck relativ zum Vakuum, also relativ zum absoluten Nullpunkt, gemessen. Im Gegensatz dazu misst ein Differenzdrucksensor die Differenz zwischen zwei Drücken. Hierbei wird der Druck an zwei verschiedenen Punkten gemessen und die Differenz zwischen diesen beiden Werten berechnet. Für die im Versuch verwendeten Drucksensoren gibt es zwei lineare Gleichungen:

$$P_{abs}(A) = 3,75 * 10^7 * X - 1,5 * 10^5 \quad (6.1)$$

$$P_{diff}(A) = 6,25 * 10^6 * X - 2,5 * 10^4 \quad (6.2)$$

eine für Absolutdrucksensoren (abs) und eine für Differenzdrucksensoren (diff).

Beide Gleichungen erfordern eine Umrechnung von Einheiten, aber die Gleichung für Differenzdrucksensoren gilt nur für neue Sensoren und wurden schon von Herrn Brauner kalibriert, um die Auswirkungen der Alterung zu berücksichtigen. Die Kalibrierung erfolgt mit einem Aufbau, der eine Druckwaage und einen Messrechner enthält. Das LabVIEW-Programm auf dem Messrechner zeichnet die gemessenen Stromstärken des Drucksensors auf und speichert sie in einer Tabelle. Dies wurde in der Arbeit von Herrn Brauner eingehend untersucht und genau beschreiben [13].

6.3 Temperaturmessungen

Im vorliegenden Versuchsmodul wird ein Widerstandsthermometer Pt100 genutzt, der auf dem Prinzip des Temperaturabhängigen Widerstands basiert. Dabei wird ein metallischer Leiter, der aus Platin besteht, als Sensor verwendet, da Platin eine sehr hohe Temperaturbeständigkeit und Langzeitstabilität aufweist. Wenn das Pt100 erhitzt wird, steigt der elektrische Widerstand, während er bei Abkühlung abnimmt. Die Beziehung zwischen Temperatur und Widerstand wird durch eine charakteristische Kennlinie beschrieben, die für jeden Pt100 spezifisch ist. Um die Temperatur zu messen, wird der Widerstand des Widerstandsthermometers mithilfe einer Messbrücke gemessen und in ein elektrisches Signal umgewandelt, das proportional zur Temperatur ist. Dieses Signal kann dann von einem Messgerät oder einer Steuerungseinheit weiterverarbeitet werden. Pt100 sind in der Industrie aufgrund ihrer hohen Genauigkeit und Langzeitstabilität weit verbreitet und werden insbesondere in der Prozesssteuerung und -überwachung sowie in der Wissenschaftliche Experimente eingesetzt [18][19].

Die Pt-100 Temperatursensoren müssen zuvor kalibriert werden. Dazu wird ein Aufbau verwendet, der die Sensoren in einen wassergefüllten Zylinder taucht, welches durch ein Thermostat des Typs 580 Oceanus-6 von ISOTECH auf verschiedene Temperaturen eingestellt werden kann. Der Zylinder wird durch einen Magnetrührer

durchmischt, um eine homogene Temperaturverteilung im Zylinder zu erreichen. Die Widerstandsthermometer werden mit dem Messrechner verbunden, der später in den Versuchsdurchführungen verwendet wird. Zusätzlich wird ein hochpräzises Pt-25 Präzisions-Platin-Widerstandsthermometer als Referenz in dem Zylinder eingeführt, das von der PTB kalibriert ist und die Temperatur auf ein 0,1 mK genau ermitteln kann. Die gemessenen elektrischen Widerstände der Sensoren werden als Rohdaten von einer LabVIEW-Datei erfasst. Zeitgleich nimmt eine andere Messeinheit des Typs micro K von ISOTECH die Messwerte des Pt-25 auf, um als Referenz für die Kalibrierung der Pt-100 Sensoren zu dienen.

Im Rahmen des Kalibrierungsprozesses wird ein Temperaturbereich von 10 bis 90 Grad Celsius festgelegt. Der Prozess beginnt bei 10 Grad Celsius und wird schrittweise um 20 Grad Celsius erhöht, bis die maximale Temperatur von 90 Grad Celsius erreicht ist. Anschließend wird die Temperatur schrittweise um 10 Grad Celsius reduziert, bis wieder eine Temperatur von 20 Grad Celsius erreicht wird, um den Hysterese Effekt zu erkennen. Während des Prozesses werden für jede konstant gehaltene Temperatur Messwerte des Pt100 und Pt25 für 10 Minuten aufgenommen, um eine spätere Bewertung der Ergebnisse zu ermöglichen. Die gemessenen Widerstände werden arithmetisch gemittelt und in die Calendar-van-Dusen-Gleichung 2. Ordnung:

$$Y(T) = R(T) = R_0(1 + A * T + B * T^2) \quad (6.3)$$

eingesetzt, um die Temperatur umzurechnen. Die Gleichung wird dann in kurvefit in Matlab eingegeben, um eine Regression durchzuführen. Durch diesen Prozess wird sichergestellt, dass die Messergebnisse auf eine genaue und zuverlässige Weise kalibriert werden können. Die Nennwiderstandsangabe R_0 bezieht sich auf den Widerstand eines Widerstandsthermometers bei einer Temperatur von 0 °C. Bei Pt 100 liegt der Nennwert idealerweise bei 100 Ω , jedoch kann dieser aufgrund unterschiedlicher Faktoren vom Normwert abweichen. Aus diesem Grund müssen der Nennwiderstand sowie die Koeffizienten A und B für jedes Widerstandsthermometer individuell ermittelt werden. Für die Bestimmung des Nennwiderstands sowie der Koeffizienten wird die folgende nach Temperatur umgestellte Calendar-van-Dusen-Gleichung 2. Ordnung Gleichung genutzt:

$$t = \frac{-R_0 * A + [(R_0 * A)^2 - 4 * R_0 * B * (R_0 - R)]^{\frac{1}{2}}}{2 * R_0 * B} \quad (6.4)$$

Für jeden Sensor wird eine individuelle Interpolation durchgeführt, um die in der Tabelle 6.1 aufgeführten Koeffizienten zu erhalten. Diese Werte werden verwendet, um die Koeffizienten für jeden Sensor in LabVIEW einzutragen, um eine Umrechnung der von den Sensoren gemessenen Daten zu ermöglichen.

Tabelle 6.1: die Koeffizienten der Kalibrierung.

Koeffizienten/Anpassungsqualität	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
R ₀	100	100	99,99	99,97
A	0,003926	0,003927	0,003921	0,003929
B	-7,383e-07	-7,067e-07	-7,489e-07	-7,327e-07
SSE	0,0007796	0,001335	0,001204	0,00126
RMSE	0,0114	0,01491	0,01416	0,01449

Basierend auf die Kalibrierung ist der SSE-Wert zwischen 0,0007796-0,0013 sehr niedrig, was auf eine gute Passung zwischen den beobachteten und vorhergesagten Werten hinweist. Der Root-Mean-Square Error (RMSE)-Wert liegt zwischen 0,011-0,0149 und gibt an, dass die durchschnittliche Abweichung der vorhergesagten Werte vom tatsächlichen Wert zwischen 1,1-1,49% liegt. Die Abbildung 6.5 zeigt die oben beschriebene Regression.

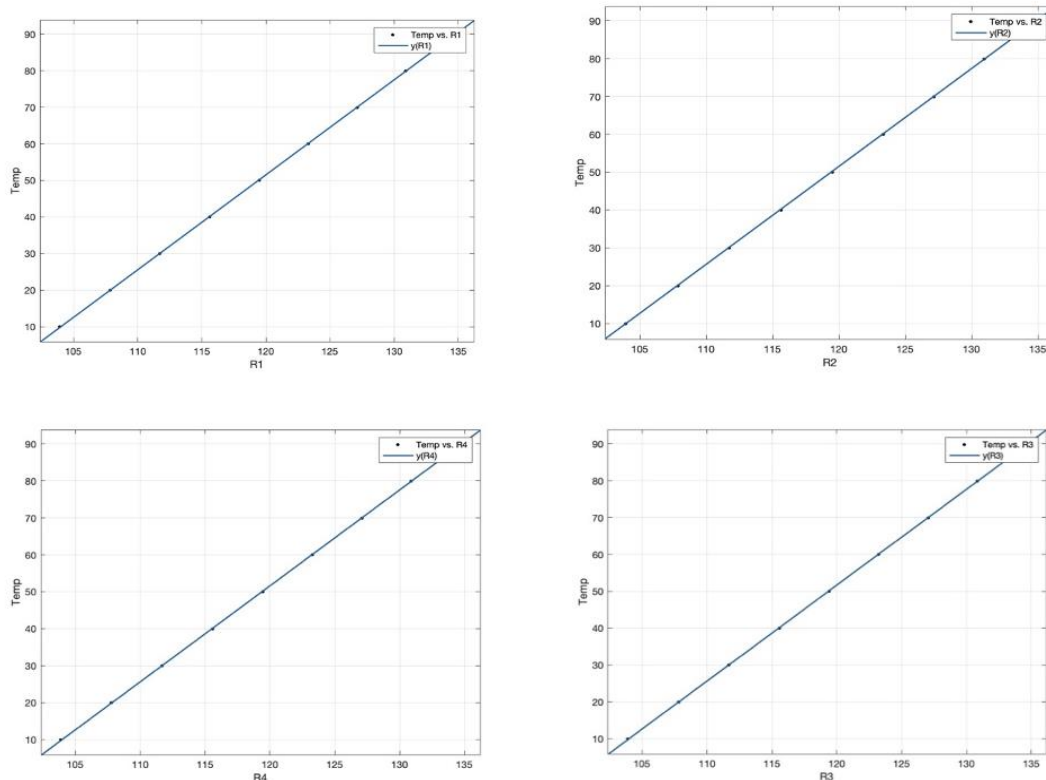


Abbildung 6.5: Diagramme der Regression.

6.4 Massendurchflussmesser- Coriolis

Für die Ermittlung des Durchflusses durch das Versuchssystem werden insgesamt drei Coriolis-Massendurchflussmesssysteme von zwei unterschiedlichen Herstellern eingesetzt. Im Kältemittelkreislauf sind zwei baugleiche Coriolis-Messsysteme des Herstellers Siemens mit der Produktbezeichnung Sitrans FC Mass 2100 Di 3 verbaut, die eine maximale detektierbare Durchflussrate von 250 kg/h aufweisen [14]. Im Wasserkreislauf ist ein Coriolis-System vom Hersteller Emerson Process Management mit der Bezeichnung Micro Motion F050S installiert, welches einen Durchfluss von maximal 8160 kg/h messen kann [15]. Das Gerät kann bei Temperaturen von -100 °C bis zu 204 °C betrieben werden und weist bei einer Temperatur von 25 °C einen zulässigen Maximaldruck von 100 bar auf. Beide Systeme arbeiten nach demselben Messprinzip, bei dem das Medium durch kleine, in Schwingung versetzte Rohre im Inneren des Coriolis-Messsystems geführt wird. Die Corioliskraft führt dabei zu einer unterschiedlichen Auslenkung von Einlass und Auslass der Rohre, wodurch eine messbare

Phasenverschiebung entsteht, die proportional zur Durchflussmenge ist. Das Wirkprinzip wird in Abbildung 6.6 durch eine schematische Darstellung verdeutlicht [16].

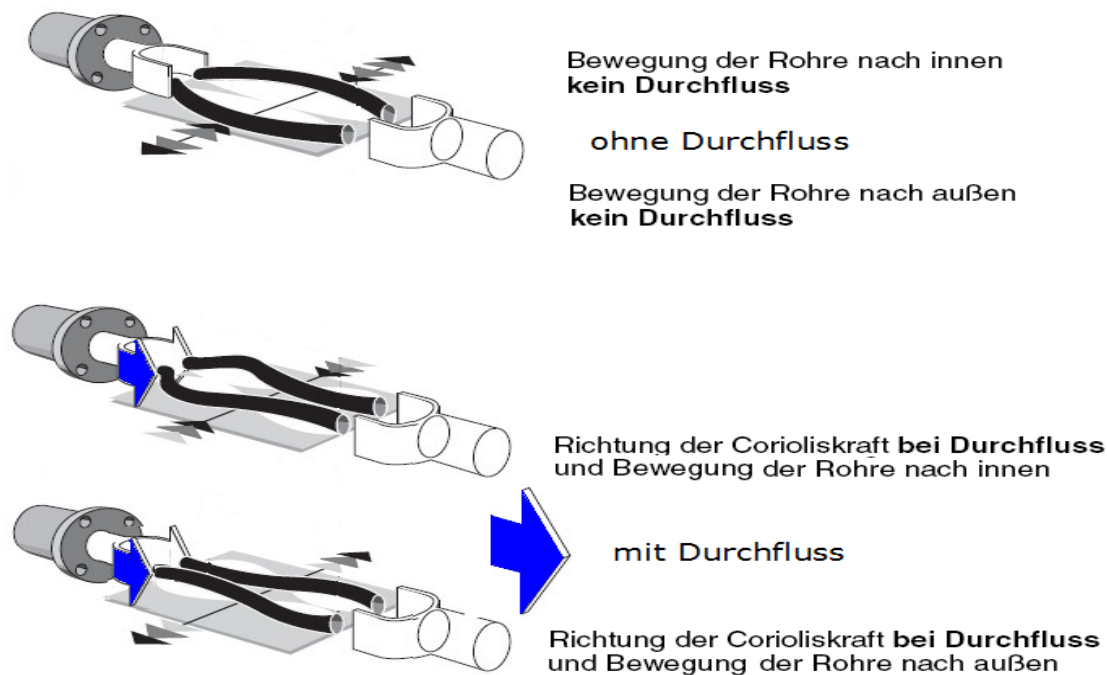


Abbildung 6.6: Wirkprinzip des Coriolis [17].

6.5 kapazitiven Dampfgehaltssensoren -Impedanzmessung

Eine Dampfgehaltsmessung ist von großer Bedeutung für die Analyse von Phasenwechselvorgängen, da sie wichtige Informationen für die Untersuchung der Oberflächen liefert, auf denen der Phasenwechsel stattfindet. Infolgedessen werden vier Kapazitätssensoren in der Kältemittelseite installiert. Das Funktionsprinzip des Dampfgehaltssensors beruht auf der Kapazitätsmessung eines Plattenkondensators. Wenn ein Material mit einer höheren Dielektrizitätszahl (entscheidende Größe) in das elektrische Feld zwischen der Messelektrode und der GND-Elektrode eindringt, wird die Kapazität des Feldes erhöht, was vom Sensor erfasst und ausgewertet wird [23]. Die Kapazität eines Plattenkondensators kann mithilfe der Gleichung:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (6.5)$$

berechnet werden, wobei C die elektrische Kapazität, ε die Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen den Platten, A die Fläche der Platten und d der Abstand

zwischen den Platten darstellen. Die Dielektrizitätskonstante eines Materials kann durch die Gleichung:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (6.6)$$

beschrieben werden, wobei ε_0 die elektrische Feldkonstante des Vakuums darstellt und eine konstante Größe ist. Der dimensionslose Faktor ε_r wird als relative Permittivitätszahl bezeichnet und ist sowohl von der Art des Materials als auch von der Temperatur und der Frequenz des elektrischen Feldes abhängig. Zur Messung der elektrischen Kapazität wird das LCR-Messgerät "4285A" von Agilent eingesetzt, das die erfassten Daten des Sensors in Kapazitätswerte umwandelt und an den Messrechner übermittelt.

Zur weiteren Charakterisierung der zweiphasigen Strömung auf der Kältemittelseite werden an vier verschiedenen Stellen kapazitiven Dampfgehaltssensoren eingesetzt, um die Messungen des Dampfgehalts durchzuführen und die Eigenschaften des strömenden Kältemittels zu erfassen. Die kapazitiven Dampfgehaltssensoren haben einen Durchmesser von 0,004 m und einen Querschnitt A von 50,2655 mm². Die relative Permittivitätszahl von Luft bei einer Temperatur von 20 °C beträgt 1,0006 [26]. Mit Hilfe der Formel 6.5 kann die Kapazität von Luft berechnet werden. Anschließend kann diese berechnete Kapazität mit den gemessenen Werten bei Luft verglichen werden. Das ergibt sich als berechneter Wert für die Kapazität der Luft zu $1,11 \cdot 10^{-13} [F]$. Dieser Wert kann dann in der folgenden Tabelle 6.2 mit den gemessenen Werten verglichen werden.

Tabelle 6.2: Kapazitätswerte der Sensoren.

Sensor	C1	C2	C3	C4
$\cdot 10^{-13} [F]$	1,11	1,10	1,08	1,11

Bei einer Betrachtung der gemessenen Werte für die kapazitiven Dampfgehaltssensoren fällt auf, dass die Werte nur geringfügig voneinander abweichen. Die gemessenen Werte liegen im Bereich von $1,08 - 1,11 \cdot 10^{-13} [F]$, während die berechnete Kapazität für Luft $1,11 \cdot 10^{-13} [F]$ beträgt.

Zur Kalibrierung eines kapazitiven Dampfgehaltssensors wird ein bekannter Dampfgehalt verwendet, der mithilfe der Gleichung:

$$X = \frac{\dot{m}_{Dampf}}{\dot{m}_{gesamt}} \quad (6.7)$$

gerechnet wird.

Zunächst wird der kapazitive Dampfgehaltssensor im Versuchsmodul installiert und während des Testlaufs werden seine Kapazität bei verschiedenen Temperaturen, Volumenströme und Dampfgehalten gemessen. Die gemessenen Daten werden dann mit dem tatsächlichen Dampfgehalt verglichen, um eine Korrelationsgleichung zwischen der Sensor-Kapazität und dem Dampfgehalt zu ermitteln. Diese Korrelationsgleichung kann mithilfe von kurvefit in Matlab erstellt und anschließend zur Bestimmung des Dampfgehalts mittels des Sensors verwendet werden.

Die Korrelationsgleichung basiert auf einem linearen Modell mit zwei unabhängigen Variablen, nämlich die Kapazität (x) und die Temperatur (y), sowie einem abhängigen Wert (f(x,y)), der die Dampfgehalt repräsentiert. Bei unterschiedlichen Volumenströmen und konstanter Temperatur sowie Dampfgehalt können die Volumenströme vernachlässigt werden, da ihre Veränderungen keinen signifikanten Einfluss auf die Messungen ausüben. Dies wird durch Abbildung 6.7 veranschaulicht.

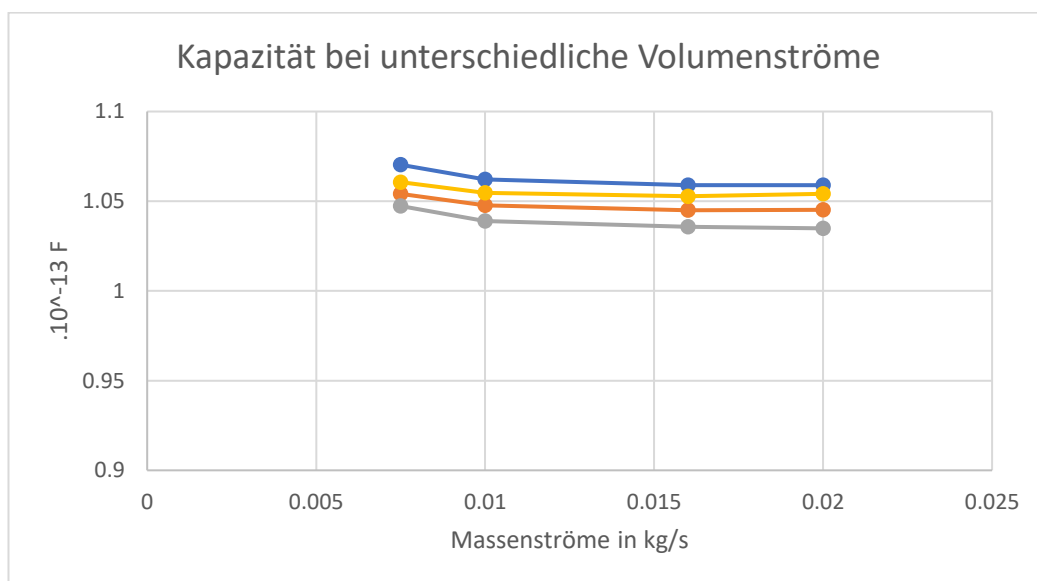


Abbildung 6.7: gemessenen Kapazität bei konstanter Temperatur sowie Dampfgehalt und unterschiedlichen Volumenströmen.

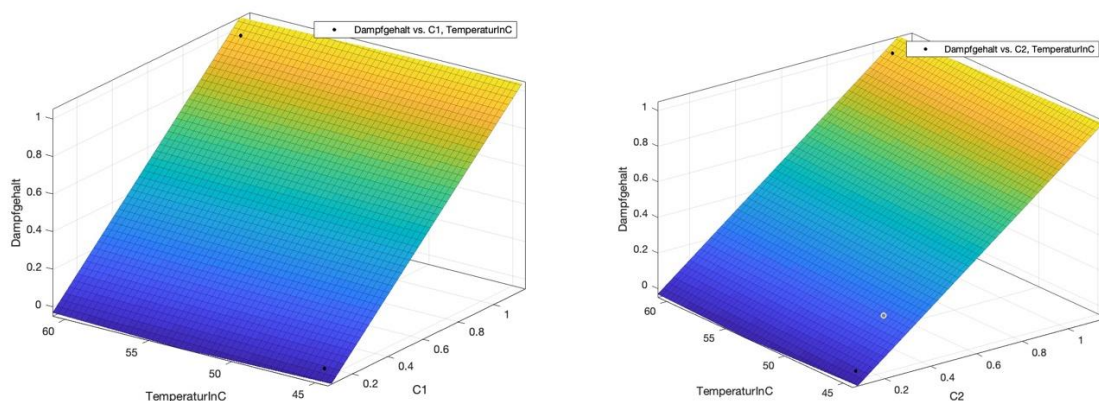
Die Abweichungen bei den unterschiedlichen Volumenströmen können auf Messunsicherheiten zurückgeführt werden, insbesondere auf Ungenauigkeiten bei der Messung der Volumenströme. Da der Dampfgehalt von Temperatur und Kapazität abhängt, werden die Kapazität und Temperatur als Einflussfaktoren in die Gleichung einbezogen. Die Tabelle 6.3 enthält die Parameter für die Korrelationsgleichungen der Kalibrierung, die zur Bestimmung des Dampfgehalts basierend auf der gemessenen Kapazität des Sensors und die Temperatur verwendet wird. Die allgemeine Korrelationsgleichung lautet:

$$f(x, y) = p^{00} + p^{10} * x + p^{01} * y \quad (6.8)$$

Tabelle 6.3: Korrelationsgleichungsparameter.

Sensor	R-square	p^{00}	p^{10}	p^{01}	SSE	RMSE
1	0,9987	-0,2446	1,018	0,002472	0,0013	0,03606
2	0,9986	-0,2469	1,029	0,002526	0,001374	0,03706
3	0,9989	-0,2347	1,044	0,002284	0,001114	0,03338
4	0,9984	-0,2554	1,019	0,002684	0,001589	0,03986

Basierend auf die Kalibrierung ist der Residuenquadratsummenfehler (SSE)-Wert zwischen 0,0011-0,0015 niedrig, was auf eine gute Passung zwischen den beobachteten und vorhergesagten Werten hinweist. Der RMSE-Wert liegt zwischen 0,033-0,039 und gibt an, dass die durchschnittliche Abweichung der vorhergesagten Werte vom tatsächlichen Wert zwischen 3,3-3,9% liegt. Die 3D Abbildung 6.8 zeigt die oben beschriebene Korrelationsgleichungen.



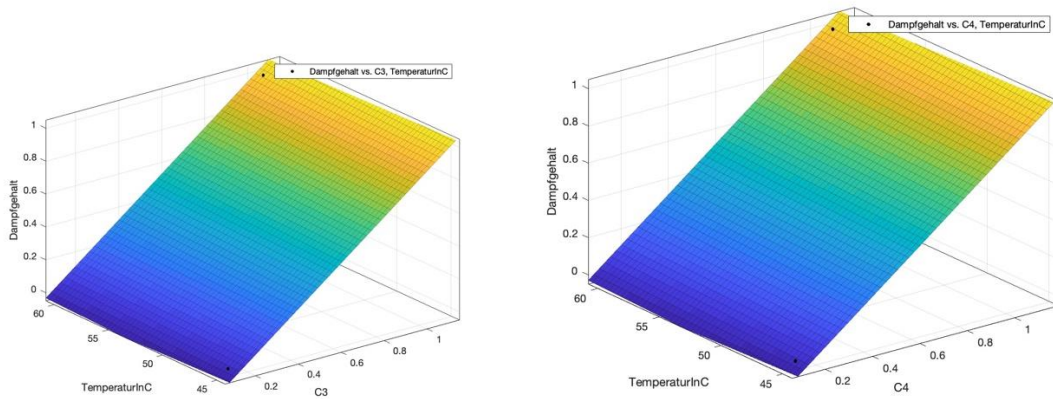


Abbildung 6.8: Diagramme der Kalibrierungsprozess für die Erklärung der Korrelationsgleichungen.

6.6 Hochgeschwindigkeitkamera

Wie schon oben genannt spielt die optische Zugänglichkeit eine wichtige Rolle, um die Strömungsformen und Eigenschaften der Oberflächen, auf denen der Phasenwechsel stattfindet, zu bestimmen. Daher wird eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt, um die Phasenwechselforgänge aufzuzeichnen und später die Bildverarbeitung durchzuführen.

Die Phantom 7380 ist ein hochentwickeltes Hochgeschwindigkeitskamarasystem. Die Phantom 7380 verfügt über einen rückseitig belichteten (BSI) 4-Megapixel-Sensor, der aufgrund seiner hohen Lichtempfindlichkeit und Durchsatzrate in der Lage ist, qualitativ hochwertige Aufnahmen zu erzeugen. Sie kann bei einer Auflösung von 2560 x 1664 bis zu 9.300 Bilder pro Sekunde aufnehmen und bei reduzierter Auflösung bis zu 444.000 Bilder pro Sekunde. Darüber hinaus bietet sie bis zu 256 GB RAM, 10 Giga-bit Ethernet sowie CineMag-Datenmanagement und ermöglicht erweiterte Datenerfassungssysteme durch programmierbare I/O. Hochgeschwindigkeitskamaras wie die Phantom 7380 sind in der Lage, Bilder mit extrem hohen Bildraten aufzunehmen und sind daher ideal für die Aufzeichnung von Bewegungen oder Prozessen, die für das menschliche Auge zu schnell sind, um sie zu erkennen [24].

Zur Bedienung der Hochgeschwindigkeitskamera Phantom 7380 ist die Nutzung der Phantom Camera Control (PCC) Software erforderlich. Mithilfe der PCC-Software

können verschiedene Einstellungen der Kamera wie Auflösung, Bildrate, Belichtung, Speichersegmentierung, Trigger Mode und automatische Funktionen vor der Aufnahme angepasst werden. Auch die Arbeit mit synchronisierten Kameras sowie das Verwalten und Konvertieren von Phantom Cine Rohdateien ist möglich. Die PCC-Software bietet auch erweiterte Funktionen zur Bildverarbeitung und -anpassung, wie beispielsweise das Anpassen von Belichtung und grundlegenden und fortgeschrittenen Bildparametern. Durch die Anwendung dieser Parameter als Metadaten können diese erst beim Konvertieren in ein anderes Format festgelegt werden. Des Weiteren bietet die PCC-Software die Möglichkeit, grundlegende Messfunktionen für die Bewegungsanalyse durchzuführen, deren Ergebnisse in einer Tabelle gespeichert werden können. Cine Rohdateien können einzeln oder in Batch-Funktionen bearbeitet und gespeichert werden. Vor dem Herunterladen können die Dateien präzise zugeschnitten oder ein ganzes CineMag oder CineFlash Laufwerk mit Aufnahmen heruntergeladen werden. Es wird empfohlen, die im Anhang beigefügte Einleitung zur Nutzung der Kamera sorgfältig durchzulesen, um sicherzustellen, dass alle notwendigen Schritte und Einstellungen für eine erfolgreiche Aufnahme berücksichtigt werden. Eine gründliche Einleitung kann dazu beitragen, Bedienungsfehler zu vermeiden und eine qualitativ hochwertige Aufnahme zu erzielen [25].

7 Inbetriebnahme

Zur Inbetriebnahme des Versuchstands sind bestimmte Schritte erforderlich, um sicherzustellen, dass alle Komponenten ordnungsgemäß funktionieren. Diese Schritte umfassen die Durchführung einer Leckageuntersuchung, die Justage der Regelung, die Isolierung und den Funktionstest aller Aggregate und Kreisläufe.

7.1 Leckage Untersuchung

Vor dem Testlauf des Versuchsmoduls ist es wichtig, einen Leckagetest durchzuführen, um sicherzustellen, dass insbesondere das Kältemittelsystem und die Wasserseite dicht sind und keine Undichtigkeiten aufweisen. Zunächst wird der Wassertank mit Wasser befüllt und die Pumpe in Betrieb genommen, um potenzielle Leckagen in den Rohrleitungen aufzuspüren.

Wenn es zu einer Leckage kommt und Tropfen entstehen, werden die Rohrverbindungen überprüft und gegebenenfalls erneut mit Teflonband abgedichtet. Um den Leckagetest in der Kältemittelseite durchzuführen, wird in der Regel Stickstoff als Testgas verwendet, da es ungiftig und nicht brennbar ist und sich bei Undichtigkeiten im System leicht nachweisen lässt. Zur Überwachung des Druckverlusts wird ein Drucksensor in die Rohrleitung integriert und der Versuchsaufbau schrittweise mit Drücken von 2 bis 3 bar beaufschlagt. Wenn während des Leckagetest Stickstoff in das System eingefüllt wird und es keine Lecks gibt, bleibt das Stickstoffgas im System. Wenn jedoch Lecks vorhanden sind, entweicht das Stickstoffgas aus dem System, und der Druck im System fällt ab. Auf diese Weise können Undichtigkeiten erkannt und behoben werden, bevor das Kältemittel eingefüllt wird. Wenn nach der Überwachung eine bedeutende Leckage festgestellt wird, kommt ein Lecksuchmittel zum Einsatz, um die Quelle zu identifizieren. In Abbildung 7.1 ist die Leckage nach der Verwendung des Lecksuchmittels aufgrund der Blasenbildung genau zu identifizieren.



Abbildung 7.1: Leckage Identifizierung durch Lecksuchmittels.

In Fällen von Leckagen sollten die Schraubverbindungen zunächst sorgfältig nachgezogen und anschließend auf Schäden überprüft werden. Gegebenenfalls müssen beschädigte Schrauben ausgetauscht werden.

Die folgende Tabelle 7.1 zeigt den Druckverlust innerhalb einer Stunde.

Tabelle 7.1: der gesamt Druckverlust des Systems innerhalb einer Stunde.

Zeitab- schnitt	Gemessene Druck	Druckverlust In bar
0-5 min	2,98 bar	0
5-10 min	2,98 bar	0
10-15 min	2,98 bar	0
15-20 min	2,98 bar	0
20-25 min	2,98 bar	0
25-30 min	2,97 bar	0,01
30-35 min	2,97 bar	0
35-40 min	2,97 bar	0
40-45 min	2,96 bar	0,01
45-50 min	2,96 bar	0
50-55 min	2,96 bar	0
55-60 min	2,95 bar	0,01
	Gesamtsystem-Druckverlust innerhalb einer Stunde	0,03 bar

Ein Druckverlust von 0,03 bar innerhalb einer Stunde ist ein geringer Verlust und deutet darauf hin, dass das System im Allgemeinen dicht ist.

Um die Dichtheit eines Systems sicherzustellen, soll ein Vakuum-Leckagetest durchgeführt werden. Dieser Test ist notwendig, da der Versuchsmodul vor der Durchführung des eigentlichen Experiments evakuiert werden muss, um optimale Bedingungen zu gewährleisten. Hierbei wird das System zunächst mit einer Vakuum Pumpe der Firma KNF evakuiert. Sobald das System evakuiert ist, wird das Vakuum im System aufrechterhalten und der Druck mittels eines Drucksensors überwacht, ähnlich wie beim Einsatz von Stickstoff. Bei dem Leckagetest im Vakuum ist mit einem Druckverlust von 0,01 bar innerhalb von 2 Stunden zu rechnen.

Um sicherzustellen, dass das Versuchsmodul den Dichtheitsanforderungen entspricht, wird die Leckagerate mithilfe der folgenden Formel bestimmt:

$$q_L = \frac{\Delta p * V}{\Delta t} \quad (7.1)$$

Es wird für das Kältemittelsystem ein Volumen von 0,0163346 m³ angenommen [13]. Daraus ergibt sich eine Leckagerate im Vakuum, die wie folgt berechnet wird:

$$\begin{aligned} q_{L,vakuum} &= \frac{(0,01 \text{ bar}) * 0,0163346 \text{ m}^3}{2 \text{ h}} = 0,081673 \frac{\text{bar} * \text{l}}{\text{h}} \\ &= 0,02268694 \frac{\text{mbar} * \text{l}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Und die Leckagerate bei der Untersuchung mit Stickstoff beträgt:

$$q_{L,stickstoff} = \frac{(0,03 \text{ bar}) * 0,0163346 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 0,490038 \frac{\text{bar} * \text{l}}{\text{h}} = 0,13612 \frac{\text{mbar} * \text{l}}{\text{s}} \quad (7.3)$$

Mit den zuvor berechneten Werten kann überprüft werden, ob die Dichtheitsanforderungen des Systems erfüllt werden können.

7.2 Justage der Regelung

Wie bereits im Kapitel 6 erwähnt, wird für die Temperaturregelung ein PID-Regler eingesetzt. Es gibt keine allgemeingültige Formel oder Wertetabelle, die zuverlässige Verstärkungswerte für PID-Regler liefert, da die optimale Verstärkung von verschiedenen Faktoren abhängt, wie z.B. der Art des Systems, der Störungen und den Anforderungen an die Regelung. Die Auswahl der Verstärkung erfordert daher oft Erfahrung und die Anwendung von Trial-and-Error-Methoden. Es gibt jedoch einige gängige Methoden zur Einstellung der Verstärkung, wie z.B. das Ziegler-Nichols-Verfahren [28][34], welches auf der Beobachtung der Schwingungscharakteristik des Regelkreises basiert. Es wird empfohlen, die Verstärkung basierend auf Erfahrungswerten und durch Ausprobieren in der realen Anwendung anzupassen, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Die Verstärkung K_c stellt einen bedeutenden Parameter für PID-Regler dar, da sie beeinflusst, in welchem Maße der Regler auf eine Regelabweichung reagiert. Eine zu niedrige Verstärkung kann dazu führen, dass der Regler nicht schnell genug auf Störungen reagiert und die Regelabweichung sich schleichend aufbaut. Im Gegensatz dazu kann eine zu hohe Verstärkung Instabilitäten und Schwingungen im Regelkreis verursachen. Eine ausgewogene Wahl der Verstärkung ist daher erforderlich, um eine stabile und schnelle Regelung zu gewährleisten [32].

Die Integralzeit T_n beschreibt die Zeit, die erforderlich ist, damit der Integralanteil des PID-Reglers eine Veränderung der Regelabweichung bemerkt und daraufhin reagiert. Bei anhaltender Regelabweichung wird der Integralanteil größer und trägt dazu bei, die Regelabweichung zu korrigieren. Eine längere Integralzeit bewirkt eine stärkere Berücksichtigung von Änderungen der Regelabweichung über längere Zeiträume, während eine kürzere Integralzeit schnelle Korrekturen für kurzfristige Schwankungen ermöglicht [32].

Die Ableitungszeit T_d gibt an, wie lange es dauert, bis der Ableitungsanteil des PID-Reglers auf eine Veränderung der Regelabweichung reagiert. Der Ableitungsanteil nutzt die Geschwindigkeit der Veränderung der Regelabweichung, um eine

Vorhersage über zukünftige Änderungen der Regelabweichung zu treffen. Eine längere Ableitungszeit ermöglicht dem Regler, langsamer auf Änderungen der Regelabweichung zu reagieren, während eine kürzere Ableitungszeit schnellere Anpassungen an Änderungen der Regelabweichung erlaubt [32]. Basierend auf Erfahrungswerten aus ähnlichen Versuchsaufbau am Institut für Thermodynamik werden zunächst folgende Verstärkungswerte untersucht und getestet:

Tabelle 7.2: Verstärkungswerte basierend auf Erfahrungswerten.

K_c - Verstärkung	0,5
T_n -Integralzeit/Nachstellzeit	0,001
T_v -Ableitungszeit/Vorhaltzeit	0,0005

Die Verstärkungswerte aus Tabelle 7.2 führten zu einer inakzeptablen Temperaturregelung, daher wird auf Trial-and-Error-Methoden zurückgegriffen. Mit Trial-and-Error-Methoden ist gemeint, dass durch Ausprobieren von verschiedenen Verstärkungswerten und anschließender Beobachtung der Ergebnisse, nach und nach eine geeignete Verstärkung für den PID-Regler gefunden wird. Dabei werden die erzielten Ergebnisse kontinuierlich bewertet, um eine schrittweise Verbesserung der Regelung zu erreichen. Um mit dem Ziegler-Nichols-Verfahren zu starten, sollte die Reglerverstärkung langsam erhöht werden, bis das System beginnt zu schwingen. Die Verstärkung, bei der das System zu schwingen beginnt, wird als kritische Verstärkung notiert. Außerdem sollte die Periodendauer der Schwingung gemessen und als kritische Periodendauer notiert werden. Anhand dieser Werte können die Einstellungen des PID-Reglers bestimmt werden. Eine gängige Methode ist, die Verstärkung auf 0,6 der kritischen Verstärkung, die Integralzeit auf 0,5 der kritische Periodendauer und die Ableitungszeit auf 0,125 der kritische Periodendauer einzustellen [34]. Die Ergebnisse, die durch die Anwendung des Ziegler-Nichols-Verfahrens [28] und der Trial-and-Error-Methoden [34] erzielt werden, sind in der Tabelle 7.3 nach Zuverlässigkeit absteigend geordnet.

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Verstärkungswerte nach Ziegler-Nichols-Verfahrens und der Trial-and-Error-Methoden.

K_c - Verstärkung	T_n -Integralzeit/Nachstellzeit	T_v -Ableitungszeit/Vorhaltzeit
14,156	0,001	0,0001
14,186	0,001	0,0001
14,4	0,001	0,0001
14,4	0,003	0,0001
40	0,01	0
50	0,1	0,0009
45	0,1	0,000625

Die Verstärkungswerte $K_c=14,156$, $T_n=0,001$ und $T_v=0,0001$ werden angewendet, da diese Einstellungen zu einer optimalen Regelung führt und eine minimale Temperaturabweichung von lediglich 0,3 K erreicht wird.

7.3 Isolierung

Für die Isolierung des Versuchsmoduls und seiner Rohrleitungen wird Polyurethanschaum als Isolierungsmaterial eingesetzt. Polyurethanschaum (PUR-Schaum) ist aufgrund seiner hervorragenden Isoliereigenschaften, guten Adhäsion auf verschiedenen Oberflächen, Feuerbeständigkeit, Langlebigkeit und der Möglichkeit, in verschiedenen Formen und Dichten hergestellt zu werden, ein vielseitiges Isoliermaterial und wird daher auch für die Isolierung von Rohrleitungen und Tanks verwendet [27]. Eine schlechte Isolierung kann zu einem Energieverlust führen, der sich negativ auf die Effizienz des Versuchsmoduls auswirkt. Die Isolierung dieser Komponenten kann dazu beitragen, den Energieverlust zu minimieren und die Messgenauigkeit zu erhöhen. Dies führt zu einer Verbesserung der Funktionalität und Effizienz des Versuchsmoduls insgesamt. Die Isolierung von Tanks und Rohrleitungen gewährleistet auch die Stabilität der Prozessbedingungen, indem sie eine konstante Temperatur und Druck aufrechterhält. Darüber hinaus trägt die Isolierung von Tanks und Rohrleitungen in Versuchsmodulen zur Sicherheit der Bediener bei, indem sie eine thermische Barriere schafft, die Verletzungen durch heiße Oberflächen vermeidet. Die Abbildung 7.2 zeigt die Isolierung der Versuchsapparatur.

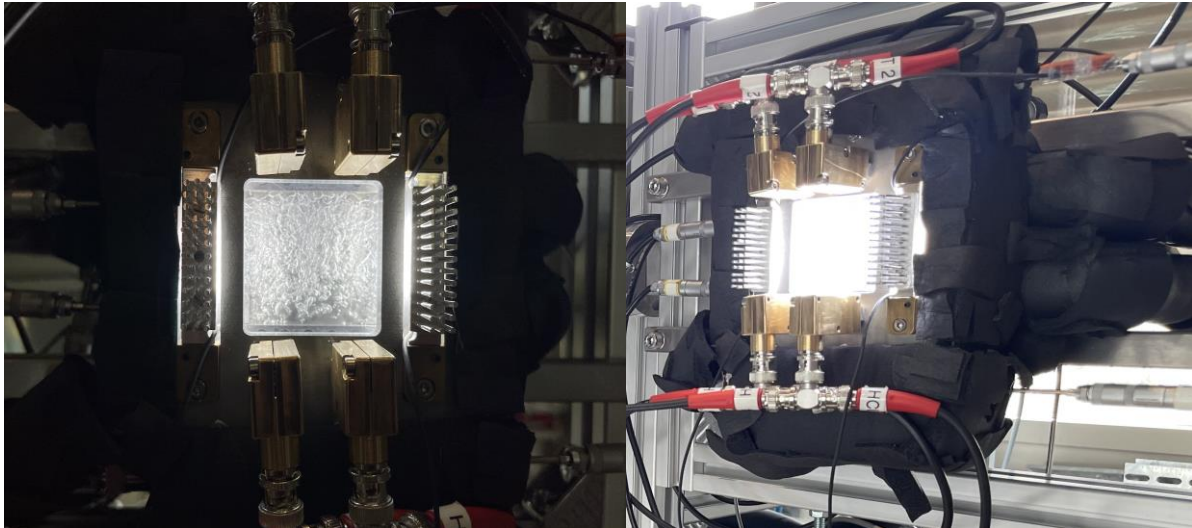


Abbildung 7.2: Isolierung der Versuchsanlage.

7.4 Funktionstest der Aggregate und Kreisläufe

Nach erfolgreicher Durchführung der Leckageuntersuchung, Justage der Regelung und Isolierung sollen alle Aggregate und Kreisläufe auf ihre Funktion getestet werden. Zunächst wird der Verdampfungs- und Kondensationsprozess getestet. Der Test wird mit unterschiedlichen Volumenströmen durchgeführt.

7.4.1 Verdampfung

Hier wird die Pumpe eingeschaltet und die Temperatur des Kältemittels im Tank auf 45 °C und die des Wassers auf 60 °C eingestellt, während der Verdampfer in diesem Fall ausgeschaltet bleiben soll. Die Ventile V2.1 und V2.5 sind zu öffnen, während die anderen geschlossen bleiben sollen, siehe Abbildung 4.1 im Kapitel 4. Die in Abbildung 7.3 gezeigten Bilder zeigen die Verdampfung bei unterschiedlichen Volumenströmen, nämlich bei einem kleinen Volumenstrom (linkes Bild) und bei einem großen Volumenstrom (rechtes Bild). Die Bilder dokumentieren eine zuverlässige Testdurchführung des Versuchsstands während des Verdampfungsprozesses. Basierend auf den während des Tests durchgeführten Messungen wird eine Energiebilanz erstellt, um die abgegebenen Energieströme zu berechnen. Der abgegebene Wärmestrom des Wassers kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (T_2 - T_1) \quad (7.4)$$

Die folgende Tabelle 7.4 enthält abgegebenen Wärmeströme bei drei unterschiedlichen Massenströme.

Tabelle 7.4: abgegebenen Wärmeströme sowie die Wärmeverluste.

Abgegebener Wärmestrom	Massenströme
-0,0932928 kw	0,0142 kg/s
-0,08576482 kw	0,0111 kg/s
-0,0812699 kw	0,0109 kg/s

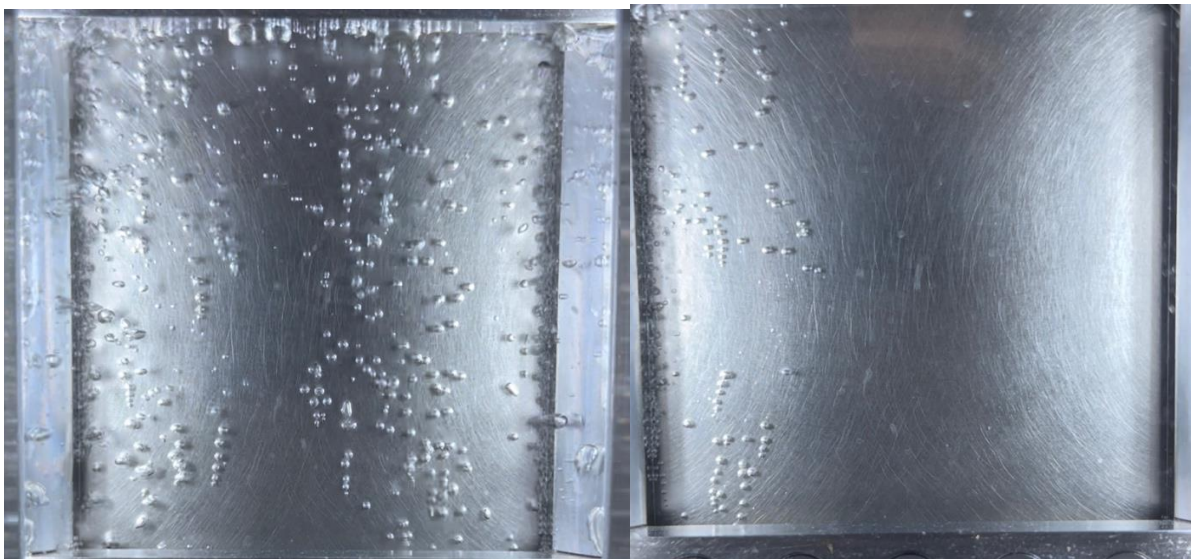


Abbildung 7.3: Verdampfung bei unterschiedlichen Volumenströmen.

Zusätzlich bilden sich bei höheren Massenströmen bzw. Abgegebener Wärmestrom weniger Blasen, wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist, da der abgegebene Wärmestrom in diesem Fall geringer ist.

7.4.2 Kondensation

Im Gegenteil wird hier die Pumpe ausgeschaltet und die Temperatur des Kältemittels im Tank auf 45 °C und die des Wassers auf 20 °C eingestellt, während der Verdampfer in diesem Fall eingeschaltet ist. Die Ventile V2.4 und V2.6 sind zu öffnen, während die anderen geschlossen bleiben sollen, siehe Abbildung 4.1 im Kapitel 4. Die in Abbildung 7.4 gezeigten Bilder zeigen die Kondensation bei unterschiedlicher Wassertemperatur, nämlich bei einem 20 C (linkes Bild) und bei 30 C (rechtes Bild). Es ist

schwierig, genaue Vorhersagen bei der Kondensation zu treffen, daher wird in diesem Bereich nur grob vorgegangen.



Abbildung 7.4: Kondensation bei unterschiedlicher Wassertemperatur.

Bei einer Wassertemperatur von 20 °C bildet sich das Kondensat hauptsächlich in Form von einzelnen Tropfen, während Filmkondensation eher selten auftritt. Wenn die Wassertemperatur jedoch auf 30 °C erhöht wird, nimmt die Tropfenkondensation zu und die Filmkondensation tritt deutlich häufiger auf. In diesem Fall sind die Tropfenkondensate bei 30 °C kleiner im Vergleich zu denen bei 20 °C. Wenn der Wärmeübergangskoeffizient niedrig ist, kann dies dazu führen, dass sich mehr Tropfenkondensat auf der Oberfläche ansammelt, bevor es abfließen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei 20 °C der Temperaturgradient sowie der Wärmeübergangskoeffizient hoch sind, während bei 30 °C der Wärmeübergangskoeffizient niedriger ist. Die Filmkondensation ist lediglich in den Aufzeichnungen sichtbar.

Ein weiterer interessanter Aspekt betrifft die Kondensationsfläche bzw. die Fläche des Tropfens, da diese in einem umgekehrten Verhältnis zum Wärmeübergangskoeffizienten steht. Je höher die Wärmeübertragung ist, desto kleiner ist die Fläche der Tropfenkondensation.

7.4.3 Verdampfung bei unterschiedlichen Dampfgehalten

Hier wird sowohl die Pumpe als auch der Verdampfer eingeschaltet und die Temperatur des Kältemittels im Tank auf 45 °C und die des Wassers auf 60 °C eingestellt. Die Ventile V2.1, 2.3, 2.4 und V2.6 sind zu öffnen, während die anderen geschlossen bleiben sollen, siehe Abbildung 4.1 im Kapitel 4. Die in Abbildung 7.5 gezeigten Bilder zeigen die Verdampfung bei unterschiedlichen Dampfgehalten, nämlich bei einem großen Dampfgehalt (linkes Bild) und bei einem kleinen Dampfgehalt (rechtes Bild).



Abbildung 7.5: Verdampfung bei unterschiedlichen Dampfgehalten.

Bei verschiedenen Dampfgehalten ändert sich die Anzahl und Verteilung der Blasen. Zudem kann die Gesamtfläche der Verdampfung nicht mehr als konstant betrachtet werden. Wie in Abbildung 7.5 dargestellt, sind bei hohem Dampfgehalt die kleinen Blasen auf der linken Seite nicht mehr sichtbar. Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, wachsen die Blasen entlang der Strömungsrichtung, wie in diesem Beispiel beobachtet werden kann. Im unteren Bereich bzw. auf der rechten Seite des linken Bildes ist nur die Blasenströmung zu erkennen, während auf der linken Seite die Pfropfen- und Schaumringströmung sichtbar wird. Im zweiten Bild, bei niedrigem Dampfgehalt, ist ausschließlich die Blasenströmung zu beobachten, da in diesem Fall der vorhandene Dampfgehalt geringer ist. Dies führt dazu, dass die anderen Strömungsformen mehr Zeit benötigen, um in Erscheinung zu treten.

8 Messergebnisse und Auswertung

Für die Analyse von Phasenwechselforgängen wird, wie im Kapitel 5 beschrieben, die Verwendung einer Schnellgeschwindigkeitskamera gewählt, um die Phasenwechselforgänge aufzuzeichnen und eine spätere Auswertung zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang geht es nicht nur um die Strömungsvisualisierung zur Analyse des Verhaltens von Fluiden in PWÜ, sondern auch um die Bestimmung der Blasenbildungsgröße und -anzahl sowie deren Verteilung, was mit Bildverarbeitung analysiert werden kann.

Die Bildverarbeitung, auch bekannt als Image Processing, kann mithilfe verschiedener Programme und Tools durchgeführt werden. Allerdings ist MATLAB in diesem Bereich ein hervorragendes Programm. In MATLAB ist eine Image Processing Tools vorhanden, der eine umfangreiche Zusammenstellung von Referenzalgorithmen und Workflow-Anwendungen für die Bildverarbeitung, Analyse, Visualisierung und Entwicklung von Algorithmen bietet. Die Toolbox nutzt Deep-Learning- und klassische Bildverarbeitungstechniken zur Durchführung von Aufgaben wie der Bildsegmentierung und -verbesserung, Rauschunterdrückung, geometrischen Transformationen und Bildregistrierung [30]. Das kann auch für spätere Bildverarbeitungsprozesse sehr hilfreich sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird der von Herrn Kahlfeld geschriebene MATLAB-Code genutzt, welches im nächsten Abschnitt näher betrachtet und beschrieben wird.

Zunächst wird der Versuchsstand in Betrieb genommen und die Hochgeschwindigkeitskamera vor dem Versuchsstand platziert. Der Versuchsstand wird zunächst mit einem einphasigen flüssigen Kältemittel betrieben, wobei der Massenstrom schrittweise von maximal bis zum möglicherweise kleinsten Wert variiert wird. Der Grund dafür ist, dass bei unterschiedlichen Massenströmen auch unterschiedliche Anzahlen, Verteilungen und Größen von Blasenbildung erkennbar sind. Dies ermöglicht am Ende einen umfassenden Bildverarbeitungsprozess.

8.1 MATLAB Code

Der erste Code dient dem Einlesen des Videos und der Darstellung mit einem Video-Player-Fenster. In den ersten beiden Zeilen des Codes werden das VideoFileReader-Objekt "Video" und das VideoPlayer-Objekt "Videoplayer" definiert. Das "Position"-Argument in der Video-Player-Zeile legt die Position und Größe des Video-Player-Fensters auf dem Bildschirm fest. Die dritte Zeile initialisiert die Variable "img" mit dem Wert 1. Die while-Schleife in der dritten Zeile wird solange ausgeführt, bis das Video beendet ist. Innerhalb der Schleife wird jeder Frame des Videos nacheinander gelesen und in der Variablen "frame" gespeichert. Die nächste Zeile speichert das aktuelle Frame als JPEG-Bild mit einem eindeutigen Namen auf der Festplatte ab. Die Variable "img" wird um 1 erhöht, um dem nächsten Bild einen anderen Dateinamen zuzuweisen. Das Frame wird in der folgenden Zeile von uint8 auf double konvertiert, um es im Video-Player anzeigen zu können. Die letzte Zeile des Schleifenkörpers zeigt das aktuelle Frame mit Hilfe des Video-Players an. Wenn alle Frames des Videos abgespielt werden, wird die Schleife beendet und das Programm beendet seine Ausführung Vgl. Abbildung 8.1.

```
1. Video = vision.VideoFileReader('0,0196.m4v'); %Name des Videos
2. Videoplayer = vision.VideoPlayer('Position', [700, 200, 768, 768]);
3. img = 1;
4.
5. while ~isDone(Video)
6.     frame = Video.step();
7.
8.     filename=strcat('frame',num2str(img),'.jpg');
9.     imwrite(frame ,filename);
10.    img=img+1;
11.    frame = im2uint8(frame);
12.    Videoplayer.step(frame);
13.
14. end
```

Abbildung 8.1: Erste Code-Teil.

Der zweite Code dient dazu, Blasen in aufeinanderfolgenden Bildern, die im ersten Teil generiert, zu identifizieren. Die Identifikation erfolgt durch Subtraktion eines Hintergrundbilds vom aktuellen Bild. Das Hintergrundbild wird erzeugt, indem die Differenz zwischen Bildern, die in einer bestimmten Entfernung voneinander liegen, subtrahiert wird. Die for-Schleife in der neunten Zeile lädt die aufeinanderfolgenden Bilder, berechnet die Differenz zwischen ihnen und subtrahiert die Differenz vom Originalbild, um den Hintergrund zu erzeugen. Die Hintergrundbilder werden gespeichert, um

später den Durchschnitt der Hintergrundbilder zu berechnen. Die nächsten Zeilen berechnen den Durchschnitt der Hintergrundbilder und schreiben ihn in eine Datei namens "FinalBackground.jpg". Die folgende for-Schleife durchläuft jedes Bild zwischen dem ersten und dem letzten Frame und subtrahiert den Hintergrund vom aktuellen Bild. Es wird ein Graustufenbild erzeugt, das dann in ein Binärbild umgewandelt wird. Die Größe des Binärbildes wird auf Blasen innerhalb des definierten Größenbereichs gefiltert. In der letzten Schleife des Skripts wird die Gesamtfläche der Blasen berechnet. Die Variable "Vapor" speichert die Fläche des identifizierten Dampfes (in Pixeln) und schreibt sie in die Datei "AreaofBubbles.txt". Die letzte Zeile löscht alle JPEG-Dateien, die während des Skripts generiert werden Vgl. Abbildung 8.2.

```

1. FirstFrame = 1; %Erster auszuwertender Frame
2. LastFrame = 120; %Letzter auszuwertender Frame, muss um den Wert
3. % "distance" kleiner sein als die insgesamt vorhandene Frames
4. distance = 10; %Distanz der Frames für die Subtraktion zur Hintergrundzeugung
5. SmallestBubble = 40 ; %Kleinstes als Blase identifiziertes Objekt
6. Sensitivity=0.06;%Sensitivität beim binär umwandeln höher = weniger sensitiv
7. img = 1;%Variable zum Laden der Bilder
8.
9. for K=FirstFrame:LastFrame
10.  frame1 = imread(['frame',num2str(K),'.jpg']);
11.  nextFrame = K+distance;
12.  frame2 = imread(['frame',num2str(nextFrame),'.jpg']);
13.  Bubbles = imsubtract(frame1,frame2);
14.  Background = imsubtract(frame1,Bubbles);
15.  filename=strcat('Background',num2str(img),'.jpg');
16.  imwrite(Background ,filename);
17.  img=img+1;
18. end
19.
20. BackgroundAdd = im2double(imread('Background1.jpg'));
21. for L=2:LastFrame-FirstFrame+1
22.  Background1=im2double(imread(['Background',num2str(L),'.jpg']));
23.  BackgroundAdd= imadd(BackgroundAdd,Background1);
24. end
25.
26. FinalBackground=BackgroundAdd/(LastFrame-FirstFrame+1);
27. imwrite(FinalBackground ,'FinalBackground.jpg');
28. file = fopen('AreaofBubbles.txt','wt');
29.
30. for M=FirstFrame:LastFrame
31.  frame = imread(['frame',num2str(M),'.jpg']);
32.  FinalBackground = imread('FinalBackground.jpg');
33.  workframe = imsubtract(frame,FinalBackground);
34.  Gray = rgb2gray(workframe);
35.  BWraw = imbinarize(Gray, Sensitivity);
36.  BWfiltered = bwareafilt(BWraw,[SmallestBubble 1000]);
37.  filename=strcat('Verarbeitet',num2str(M),'.jpg');
38.  imwrite(BWraw ,filename);%Speichern des Binärbilds zur Qualitätseinschätzung
39.  img = img + 1;
40.  Vapor = sum(sum(BWfiltered));%Fläche des Dampfes [Pixel]
41.  fprintf(file,'%d',Vapor);
42.  fprintf(file,'\n');
43.  disp(Vapor);
44. end
45.
46.
47. %delete *.jpg;

```

Abbildung 8.2: Zweite Code-Teil.

Der dritte Code wird zur Erkennung von Blasen in Bildern genutzt. Es besteht aus mehreren Abschnitten, die verschiedene Funktionen ausführen.

Der erste Abschnitt enthält die Definition von Variablen, die später im Code verwendet werden. Diese Variablen umfassen den ersten und letzten auszuwertenden Frame, die Distanz zwischen den Frames, das kleinste und größte identifizierte Objekt, die Sensitivität beim binären Umwandeln und den Größenunterschied zwischen den Größenintervallen zur Sortierung Vgl. Abbildung 8.3.

```
1. FirstFrame = 1;
2. EndingFrame=121;
3. Backgrounddistance = 119;
4. LastFrame = FirstFrame+Backgrounddistance;
5. distance = 10;
6. SmallestBubbleStart =20;
7. BiggestBubble = 400;
8. Sensitivity=0.06;
9. Sizedifference = 40;
10. file = fopen('NumberofBubbles.txt','wt');
11.
12. Final = 1;
13.
```

Abbildung 8.3: Dritte Code, Erste Abschnitt.

Im nächsten Abschnitt werden die Bilder geladen und verarbeitet. Der Code verwendet eine Schleife, um die Bilder einzeln zu laden und die Hintergrunderzeugung durchzuführen. Die Variable "img" wird dabei verwendet, um die generierten Hintergrundbilder zu speichern Vgl. Abbildung 8.4.

```
14. while LastFrame < EndingFrame
15.     img = 1;
16.     for K=FirstFrame:LastFrame
17.         frame1 = imread(['frame',num2str(K),'.jpg']);
18.         nextFrame = K+distance;
19.         frame2 = imread(['frame',num2str(nextFrame),'.jpg']);
20.         Bubbles = imsubtract(frame1,frame2);
21.         Background = imsubtract(frame1,Bubbles);
22.         filename=strcat('Background',num2str(img),'.jpg');
23.         imwrite(Background ,filename);
24.         img=img+1;
25.     end
26.
27.     L = 2;
28.     BackgroundAdd = im2double(imread('Background1.jpg'));
29.     for L=2:Backgrounddistance+1
30.         Background1=im2double(imread(['Background',num2str(L),'.jpg']));
31.         BackgroundAdd= imadd(BackgroundAdd,Background1);
32.     end
33.
```

Abbildung 8.4: Dritte Code, Zweite Abschnitt.

Im dritten Abschnitt wird der endgültige Hintergrund erstellt, indem alle zuvor generierten Hintergrundbilder addiert und durch die Anzahl der insgesamt vorhandenen Frames dividiert werden. Danach werden die Blasen in jedem Frame erkannt und gezählt. Hierbei wird eine Schleife verwendet, um jedes Bild nacheinander zu laden und die Blasen zu zählen. Der Code verwendet die Funktion "bwareafilt", um Objekte in verschiedenen Größenbereichen zu filtern. Die Anzahl der erkannten Blasen wird in die Datei "NumberofBubbles.txt". geschrieben Vgl. Abbildung 8.5. Für jedes Frame werden mehrere Werte erfasst, welche die Anzahl der Blasen in verschiedenen Größenklassen repräsentieren. Die Größenklassen werden durch die Variablen "SmallestBubble", "BiggestBubble" und "Sizedifference" definiert.

```

1. FinalBackground=BackgroundAdd/(Backgrounddistance+1);
2. FinalBackgroundName = strcat('FinalBackground',num2str(Final),'.jpg');
3. imwrite(FinalBackground ,FinalBackgroundName);
4.
5.
6. for M=FirstFrame:LastFrame
7.     SmallestBubble = SmallestBubbleStart;
8.     frame = imread(['frame',num2str(M),'.jpg']);
9.     FinalBackground = imread(['FinalBackground',num2str(Final),'.jpg']);
10.    workframe = imsubtract(frame,FinalBackground);
11.    Gray = rgb2gray(workframe);
12.    BWraw = imbinarize(Gray, Sensitivity);
13.    filename=strcat('Verarbeitet',num2str(M),'.jpg');
14.    imwrite(BWraw ,filename);
15.    while SmallestBubble < BiggestBubble
16.        BWfiltered = bwareafilt(BWraw,[SmallestBubble 400]);
17.        BWfiltered=~BWfiltered;
18.        B = bwboundaries(BWfiltered);
19.        NB = length(B);
20.        disp(NB);
21.        fprintf(file,'%d\t',NB);
22.        SmallestBubble = SmallestBubble + Sizedifference;
23.    end
24.    fprintf(file,'\n');
25. end
26. Final = Final + 1;
27. FirstFrame = FirstFrame + Backgrounddistance;
28. LastFrame = LastFrame + Backgrounddistance;
29. end
30.
31.
32. %delete *.jpg;

```

Abbildung 8.5: Dritte Code, dritte Abschnitt.

8.2 Bildverarbeitungsprozesses

Im Kontext des Bildverarbeitungsprozesses wird lediglich der Verdampfungsprozess betrachtet und ausführlich beschrieben, da bei der Kondensation oder der Zweiphasenströmung der Bildverarbeitungsprozess nicht ausreichend geeignet ist.

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera wird ein 1,9 Sekunden Cine-Video aufgezeichnet, welches am Ende ein Zeitlupenvideo von ungefähr 11 Minuten ergibt. Das Video wird zunächst in das Avi-Format oder für Mac-Systeme in das m4v-Format konvertiert und wenn nötig verkürzt, damit es von MATLAB erkannt und abgespielt werden kann. Das Programm öffnet wie im Abschnitt 8.1 beschrieben ein neues Fenster, in dem das Video abgespielt wird und erzeugt dabei die 728 Frames, die für die Bildverarbeitung benötigt werden. Siehe Abbildung 8.6.

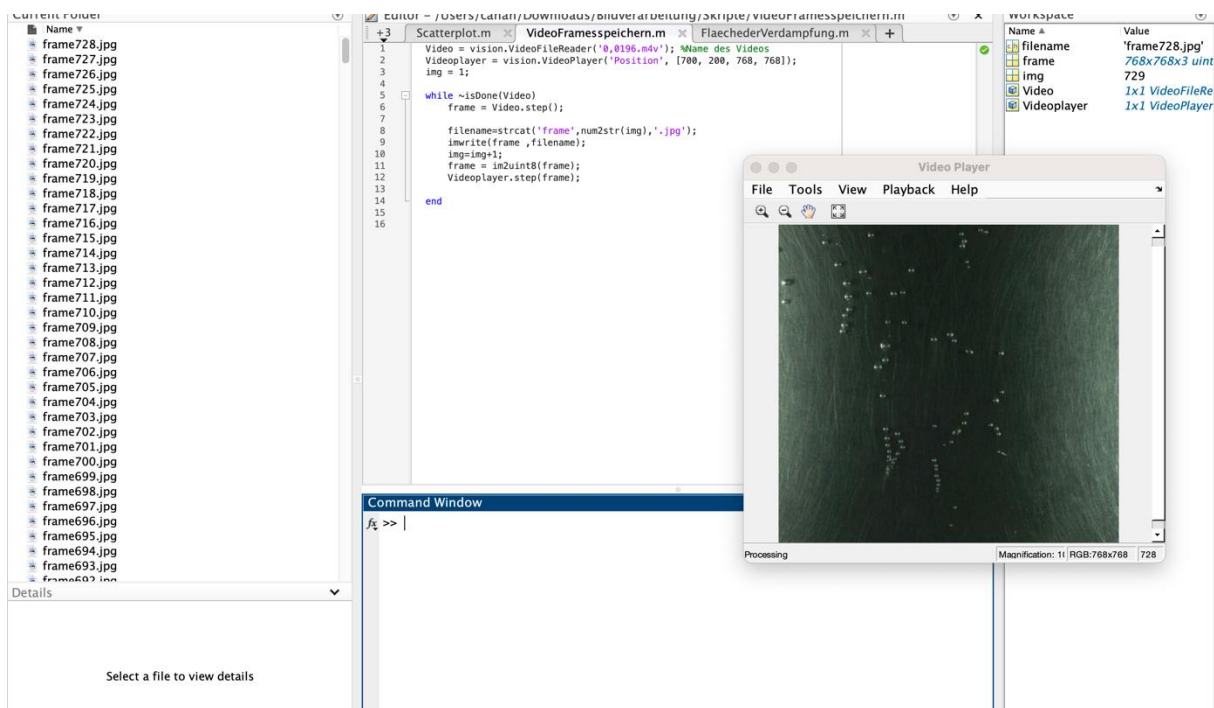


Abbildung 8.6: Die erzeugten Frames und das Videoplayer.

Anschließend sollte der zweite Code verwendet werden, um die Datei "Areaof-Bubbles" zu erzeugen Vgl. Abbildung 8.8. Hierbei werden sowohl die verarbeiteten Frames als auch die Finalhintergrundbilder erstellt, um die Gesamtfläche der Verdampfung zu rechnen, wie in Abbildung 8.7 dargestellt.

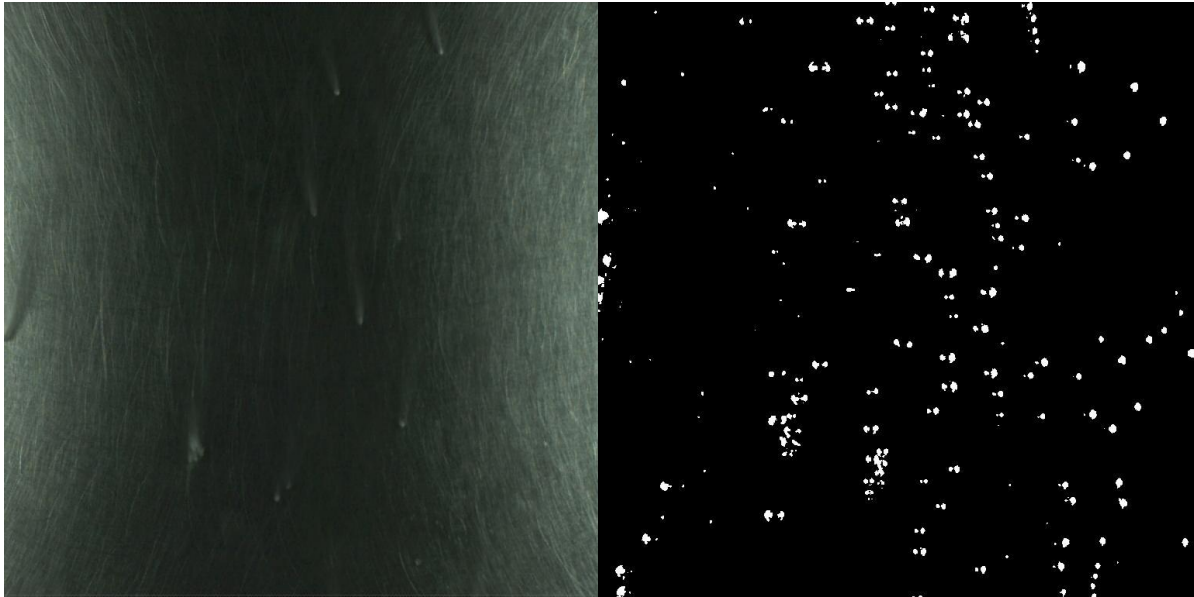


Abbildung 8.7: (Linkes Bild- Finalhintergrundbild) - (Rechtes Bild- Verarbeitete Frame).

Für die Zählung der Blasenbildung soll der letzte Code aufgerufen werden, um die Datei "NumberofBubbles" zu erzeugen. Dabei werden nochmal die Finalhintergrundbilder und die verarbeiteten Frames erstellt, wie in Abbildung 8.7 dargestellt.

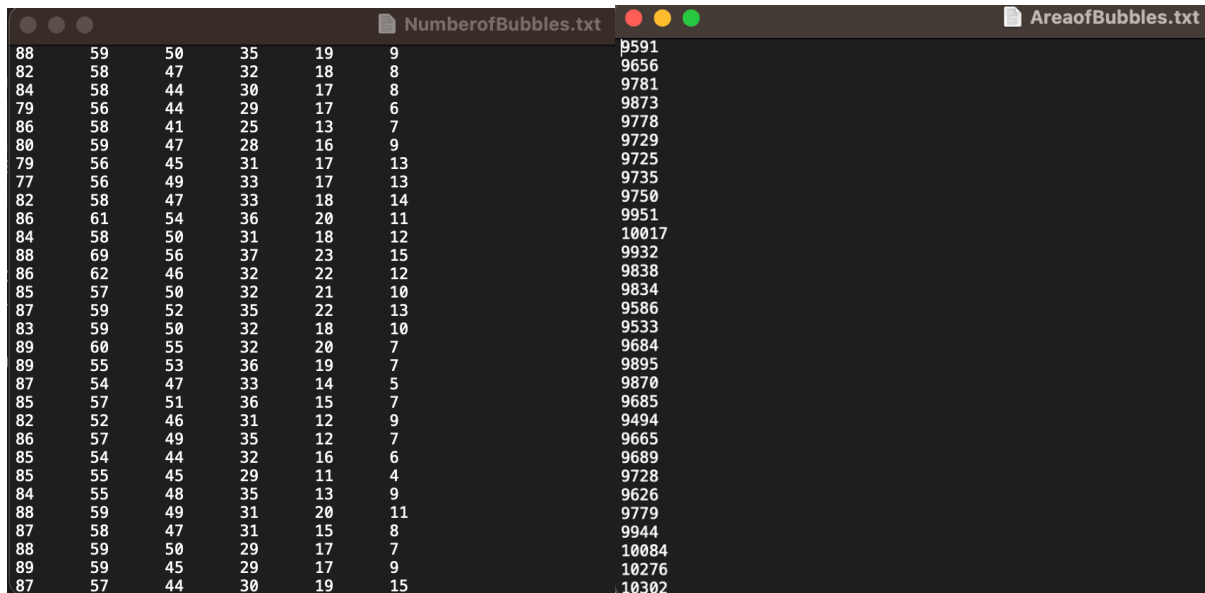


Abbildung 8.8: (Linkes Bild- NumberofBubbles.txt) - (Rechtes Bild- AreaofBubbles.txt).

Für die Optimierung des Bildverarbeitungsprozesses sollten die Parameter in Abbildung 8.2 und 8.3 angepasst werden, um verbesserte Ergebnisse zu erzielen.

8.2.1 Parameterbeschreibung und deren Auswirkungen auf die Bildverarbeitung

Der wichtigste Parameter ist die Sensitivität. Wenn sich die Sensitivität ändert, beeinflusst dies die Anzahl der Pixel, die in den detektierten Blasenregionen identifiziert werden. Die Sensitivität wird während der Binarisierung des Bildes angewendet, siehe Abbildung 8.5, Zeile 45. Die Funktion "imbinarize" konvertiert das Graustufenbild 'Gray' in ein binäres Bild, indem sie alle Pixelwerte, die größer als der Schwellenwert (in diesem Fall die Sensitivität) sind, auf 1 setzt und alle anderen auf 0. Eine höhere Sensitivität impliziert, dass mehr Pixel als Hintergrund angesehen werden und somit weniger Pixel zu den detektierten Blasenregionen beitragen. Zusammenfassend lässt sich sagen: Eine Erhöhung der Sensitivität führt zu einer geringeren Detektion von Blasenpixeln und resultiert in einer kleineren ermittelten Blasenfläche. Hingegen führt eine Verringerung der Sensitivität zu einer erhöhten Detektion von Blasenpixeln, was in einer größeren ermittelten Blasenfläche resultiert.

Die Variablen "SmallestBubble" und "BiggestBubble" definieren den kleinsten und größten Blasenbereich (in Pixeln), der als echte Blase angesehen wird. "SmallestBubble" wird verwendet, um kleine Objekte oder Bildrauschen, welche keine echten Blasen darstellen, zu filtern. In Abbildung 8.2 ist kein "BiggestBubble"-Parameter vorhanden, da der Wert 1000 in der Funktion "bwareafilt" die obere Grenze für die Blasengröße repräsentiert. In diesem Fall bedeutet dies, dass die größte zu berücksichtigender Blase eine Fläche von 1000 Pixeln aufweisen kann. Im Gegensatz dazu kann in Abbildung 8.3 Zeile 7 die Variable "BiggestBubble" definiert werden. Letztendlich macht dies jedoch keinen Unterschied, da der Wert innerhalb der Funktion "bwareafilt" angepasst werden kann.

Die "Backgrounddistance" steuert, wie oft der Hintergrund während der Analyse aktualisiert wird. Wenn die "Backgrounddistance" kleiner ist, wird der Hintergrund häufiger aktualisiert. Wenn die "Backgrounddistance" jedoch zu klein ist, kann es schwierig sein, eine genaue Hintergrundschätzung zu erhalten. Wenn die "Backgrounddistance" größer ist, wird der Hintergrund seltener aktualisiert, was zu einer stabileren Hintergrundschätzung führt, aber möglicherweise nicht gut für schnell ändernde Hintergründe geeignet ist.

Die Variable "distance" bestimmt, wie weit die beiden Frames voneinander entfernt sind. Ein größerer Wert für "distance" führt zu einer größeren Differenz zwischen den beiden Frames, während ein kleinerer Wert für "distance" eine geringere Differenz bewirkt.

"SizeDifference" ist eine Variable, die den Größenunterschied (in Pixeln) zwischen aufeinanderfolgenden Schritten bei der Analyse der Blasenfläche definiert. "SizeDifference" wird verwendet, um die Größe des kleinsten Blasenbereichs ("Smallest-Bubble") schrittweise zu erhöhen, siehe Abbildung 8.5, Zeile 55. Um die Anzahl der Blasen in verschiedenen Größenklassen zu klassifizieren.

8.3 Bildverarbeitungsansätze zur Analyse von Verdampfungsprozessen

Bei der Analyse eines Verdampfungsprozesses auf einer Platte sind die optimalen Parameter von den Eigenschaften der Blasen z.B. Größe und Form, den Umgebungsbedingungen z.B. Beleuchtung und der Qualität der aufgenommenen Bilder abhängig. Daher müssen die Parameter gegebenenfalls angepasst werden, um die bestmögliche Leistung für den Bildverarbeitungsprozess zu erzielen.

Der gesamte Prozess soll für die in der Tabelle aufgeführten Massenströme durchgeführt und anschließend verglichen werden.

Tabelle 8.1: Massenströme in kg/s.

0,012	0,0065	0,0083	0,0100	0,0124	0,0142	0,0151	0,0163	0,0172	0,0180	0,196
-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------

Nach sorgfältiger Abschätzung und Experimentieren werden die folgenden Parameter ausgewählt und genutzt:

"Backgrounddistance" = 90
"distance" = 10
"SmallestBubble" = 40
"BiggestBubble" = 400
"Sensitivity" = 0,06
"Sizedifference" = 20

Hier werden 120 Einzelbilder (Frames) untersucht.

Nach Durchführung des Prozesses für jede Massenstrom-Einstellung wird festgestellt, dass bei der fortgeschrittenen Verdampfung bzw. sehr hoher Anzahl von Blasenbildung und sehr niedrigen Massenströmen eine Bildererkennung nicht mehr möglich ist. Wie in Abbildung 8.9 zu sehen ist, die Erstellung von Finalhintergrundbildern und Verarbeitete Bildern durch den Code sind sehr schlecht bewertbar.

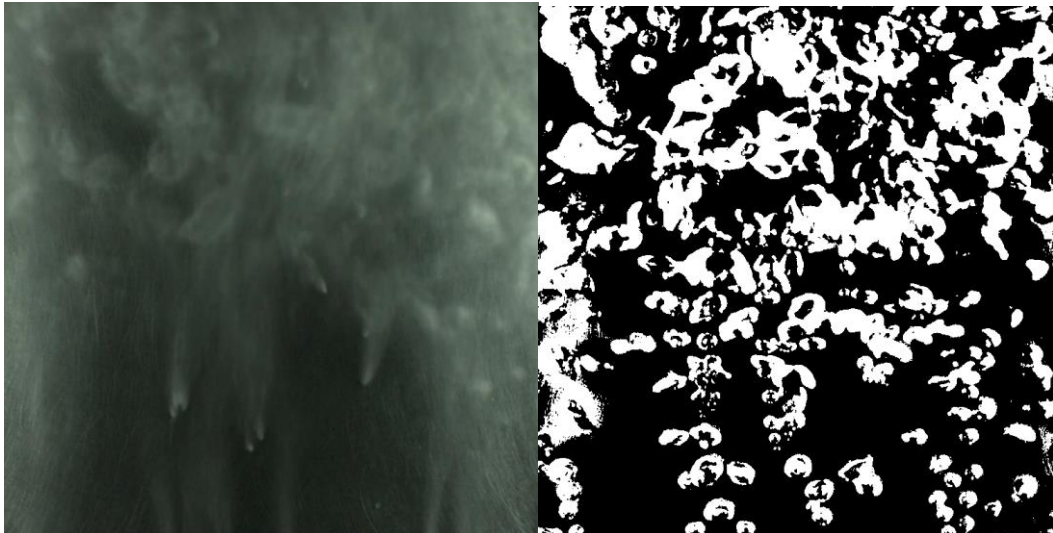


Abbildung 8.9: Finalhintergrundbildern (links) und Verarbeitete Bildern (Rechts) bei Massenstrom von 0,0012 kg/s.

Folglich kann ab einem Massenstrom von 0,0065 kg/s der Bildverarbeitungsprozess durchgeführt werden. Für die nächsten Auswertungsschritte werden nur die folgenden fünf unterschiedlichen Massenströme:

Messpunkt 1: 0,0065 kg/s

Messpunkt 2: 0,0124 kg/s

Messpunkt 3: 0,0151 kg/s

Messpunkt4: 0,0172 kg/s

Messpunkt 5: 0,0196 kg/s

Berücksichtigt.

In Abbildung 8.11 ist ein Boxplot dargestellt. Das Diagramm beschreibt die Verteilung der Blasen bzw. die Gesamtfläche des identifizierten Dampfes in Abhängigkeit von unterschiedlichen Massenströmen. Es zeigt sich, dass bei einem größeren Massenstrom die Gesamtfläche der Verdampfung kleiner ist. Dies lässt sich auch visuell anhand der Abbildung 8.10 erkennen.

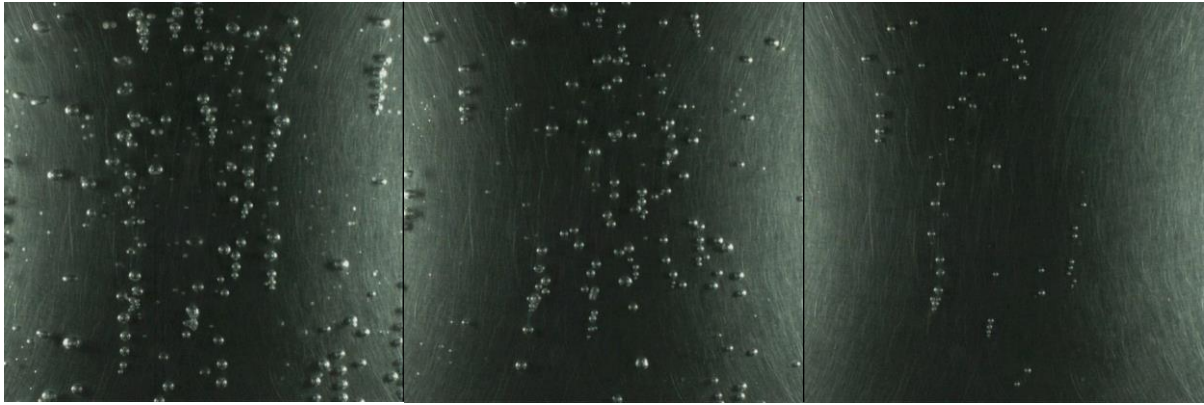


Abbildung 8.10: Verdampfung bei unterschiedlichen Massenströmen.

Das linke Bild zeigt eine Verdampfung bei einem Massenstrom von 0,0065 kg/s, während das mittlere Bild bei 0,0124 kg/s und das rechte Bild bei 0,0196 kg/s aufgenommen wird.

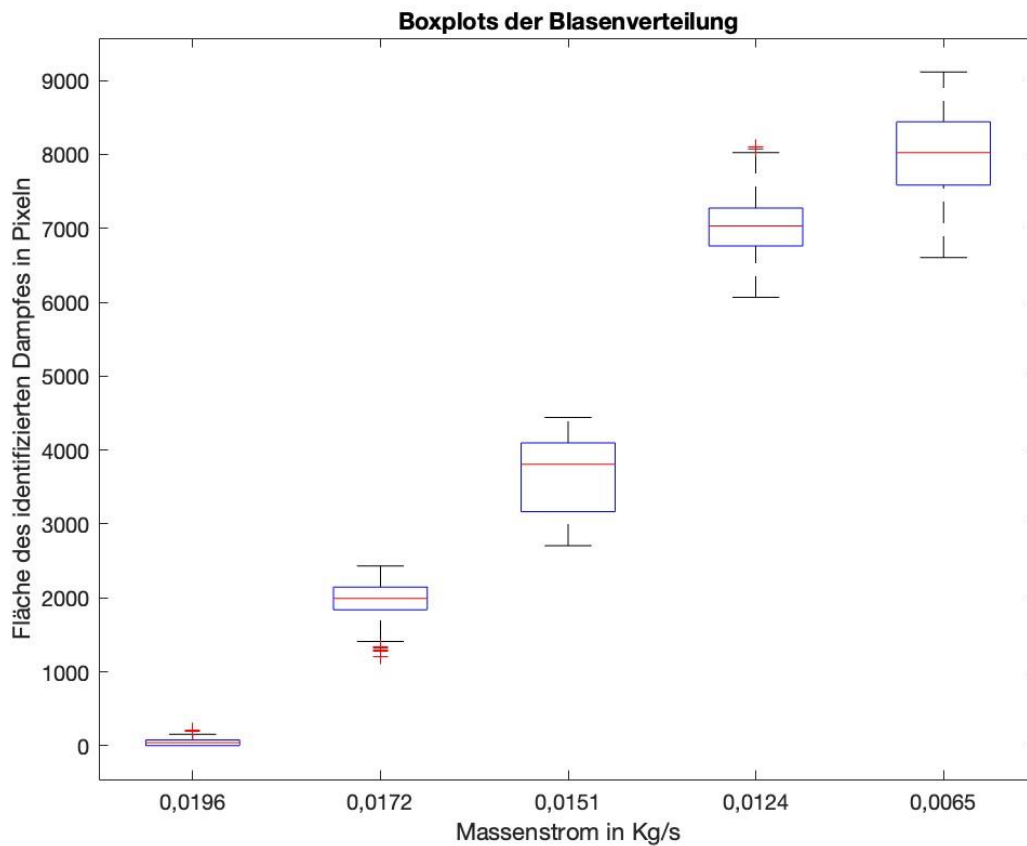


Abbildung 8.10: Die Gesamtfläche des identifizierten Dampfes in Abhängigkeit von unterschiedlichen Massenströmen.

Die Blöcke bei jedem Massenstrom repräsentieren Gruppen von Werten, die zwischen dem Maximal- und Minimalwert ohne Ausreißer liegen. Die Minimal- und Maximalwerte, die als Ausreißer gelten, treten sehr selten auf und sind als rote Linien außerhalb des Blocks dargestellt. In anderen Worten bedeutet dies, dass bei den 120 untersuchten Frames die extrem großen und extrem kleinen Gesamtflächen der Verdampfung, die außerhalb des Bereichs liegen, nicht häufig vorkommen. Zum Beispiel liegt der Bereich des Blocks bei einem Massenstrom von 0,0196 zwischen 0 und 151 Pixeln, während die zwei Punkte 202 Pixel und 216 Pixel als Ausreißer gelten.

Bei einem größeren Massenstrom verringert sich die abgegebene bzw. aufgenommene Energie, wie im Kapitel 7 beschreiben, was zu einer verlangsamt Verdampfung führt. Außerdem wirkt sich die gesteigerte Fließgeschwindigkeit negativ auf den Verdampfungsprozess aus, da das Kältemittel in diesem Fall weniger Zeit hat, um Wärme aufzunehmen und zu verdampfen. Zudem ist zu beachten, dass sich die Turbulenz bei einem erhöhten Massenstrom erhöht, was zu einer effizienteren Vermischung des bereits verdampften und nicht verdampften Kältemittels führt. Aufgrund dieser Faktoren verringert sich die Gesamtfläche der Verdampfung.

Angenommen, es existiert bei jedem Massenstrom eine bestimmte Gesamtfläche der Verdampfung, dann verändert sich die Gesamtfläche in Abhängigkeit vom Massenstrom, wie in Abbildung 8.11 dargestellt. Dies wird erreicht, indem der Mittelwert der Gesamtfläche aus den 120 Frames ermittelt wird. Die schwarz gezeichnete Linie verdeutlicht, wie die Abhängigkeit linear approximiert werden kann.

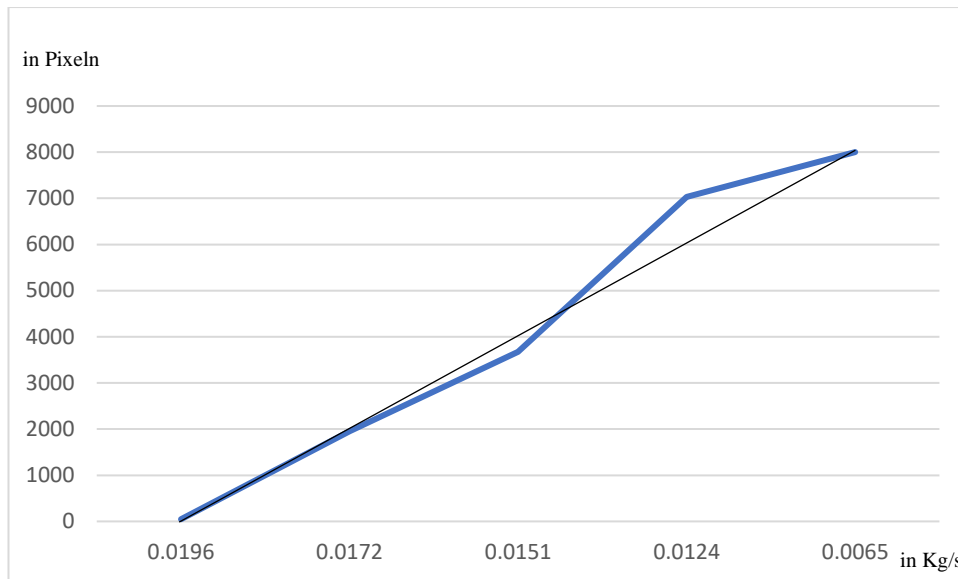


Abbildung 8.11: die Gesamtfläche in Abhängigkeit vom Massenstrom.

Dies kann in der Tat wichtige Erkenntnisse liefern, insbesondere in Bezug auf die Funktionsweise des Verdampfungsprozesses am Versuchsstand sowie des Bildverarbeitungsprozesses. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtfläche der Verdampfung stark von der Massenströmung abhängt. Dabei gilt: Je kleiner der Massenstrom, desto größer ist die Verdampfungsfläche. Dies zeigt, dass der Verdampfungsprozess wie erwartet funktioniert. Außerdem deuten die Ergebnisse und das Diagramm in Abbildung 8.11 darauf hin, dass die Gesamtfläche der Verdampfung bei einem bestimmten Massenstrom nahezu konstant bleibt und sich mit der Vergrößerung der Massenströme nahezu linear ändert. Diese Beobachtungen sind wertvoll, um das Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse zu vertiefen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Optimierung des Versuchsmodul zu ergreifen.

Die Anzahl der Blasen bei verschiedenen Massenströmen wird in zehn unterschiedliche Größenklassen klassifiziert, wie in Abbildung 8.12 dargestellt.

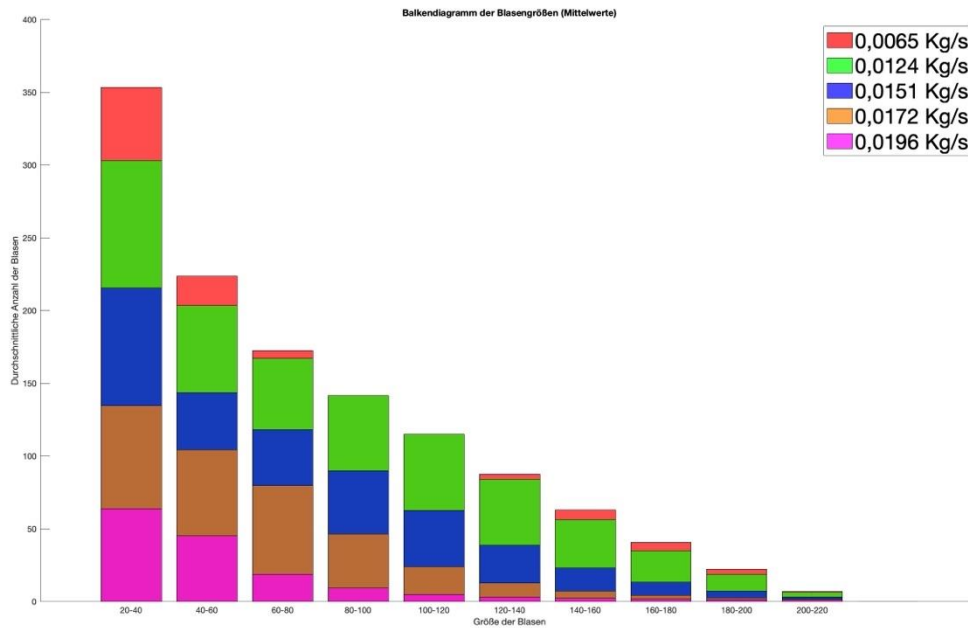


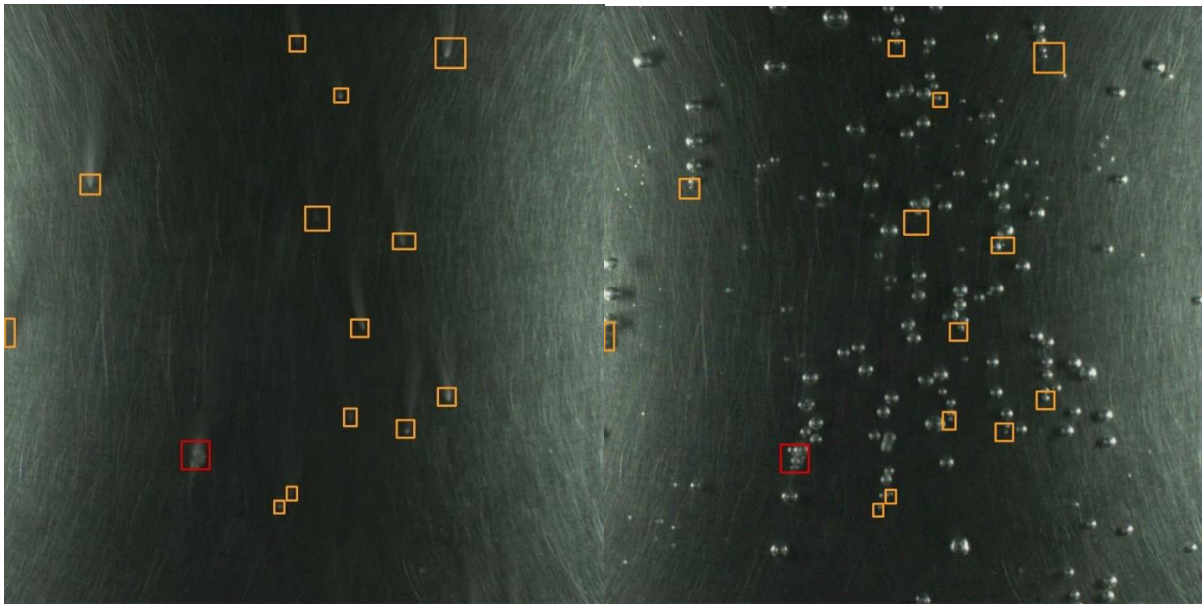
Abbildung 8.12: Die Anzahl der Blasen bei verschiedenen Massenströmen.

Das Balkendiagramm in Abbildung 8.12 veranschaulicht deutlich, wie sich die Anzahl und Größe der Blasen bei unterschiedlichen Massenströmen verändert. Jeder Massenstrom ist durch eine unterschiedliche Farbe gekennzeichnet, und jede Spalte beschreibt eine Größenklasse von 20 Pixeln entlang der X-Achse, beginnend bei 20. Die Y-Achse beschreibt die durchschnittliche Anzahl der Blasen für jede Spalte bzw. Größenklasse.

Ebenso wie bei der Gesamtfläche der Verdampfung zeigt sich, dass die Anzahl der Blasen bei größeren Massenströmen geringer ist. Dies lässt sich ebenso visuell anhand der Abbildung 8.10 erkennen.

Wenn die Wandtemperatur durch Erhöhung des zugeführten Wärmestroms gesteigert wird, bilden sich ab einer bestimmten Temperatur Dampfblasen. Diese entstehen an spezifischen Stellen der Heizfläche. Mit zunehmendem Wärmestrom steigt die Anzahl der gebildeten Dampfblasen. Dies lässt sich anhand der Abbildung 8.10 und der Tabelle 8.4 erkennen. Dampfblasen entstehen typischerweise an bevorzugten Stellen fester Oberflächen oder an suspendierten Partikeln. Der Prozess beginnt mit der Bildung von Keimen, die ausreichend groß sind, um gegen Auflösung stabil zu bleiben.

Diese Keime können dann weiterwachsen und schließlich zu sichtbaren Blasen führen
Vgl. Abbildung 8.13 [31].



**Abbildung 8.13: (Linkes Bild-Finalbackgroundbild) - (Rechtes Bild-Frame1)
Keimbildung bei 0,0151 kg/s.**

Es gibt zwei Haupttypen der Keimbildung: homogene und heterogene Keimbildung. In den meisten Fällen dominiert die heterogene Keimbildung. Die homogene Keimbildung, bei der Blasen aufgrund der natürlichen Molekülbewegungen spontan entstehen, spielt eine untergeordnete Rolle, daher liegt der Fokus ausschließlich auf der heterogenen Keimbildung. Die Heterogene Keimbildung ist ein Vorgang, bei dem die Keimbildung auf Oberflächen oder Fremdpartikeln stattfindet, welche als Keimbildungszentren fungieren [31]. Dies kann durch die gelb gezeichneten Kästchen in Abbildung 8.13 dargestellt werden.

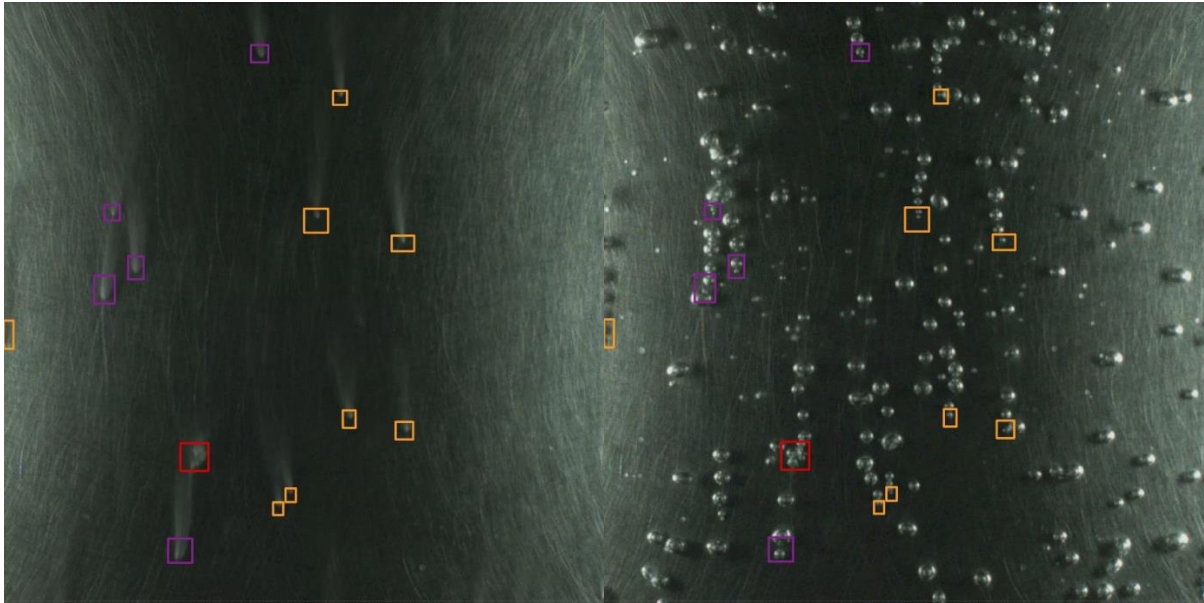


Abbildung 8.14: (Linkes Bild-Finalbackgroundbild) - (Rechtes Bild-Frame1) Keimbildung bei 0,0172 kg/s.

Diverse Faktoren tragen zur bevorzugten Entstehung heterogener Keimbildung bei, wie das Vorhandensein von Verunreinigungen, Oberflächenrauheit Vgl. Abbildung 8.13 oder 8.14 (die roten Kästchen) und unterschiedliche Oberflächenenergien, die von entscheidender Bedeutung sind. Die Unterschiede, die man zwischen den beiden Abbildungen 8.13 und 8.14 sehen kann, sind mit lila Kästchen markiert. In Abbildung 8.14 ist der Massenstrom geringer, was zu unterschiedlichen Oberflächenenergien führt. Der Grund für die Annahme, dass die roten Kästchen Verunreinigungen oder Oberflächenrauheit darstellen, die zur Keimbildung beigetragen haben, liegt darin, dass sie bei jedem unterschiedlichen Massenstrom auftreten (siehe Abbildung 8.15), während die anderen Keimbildungen nicht immer bei verschiedenen Massenströmen präsent sind [31].

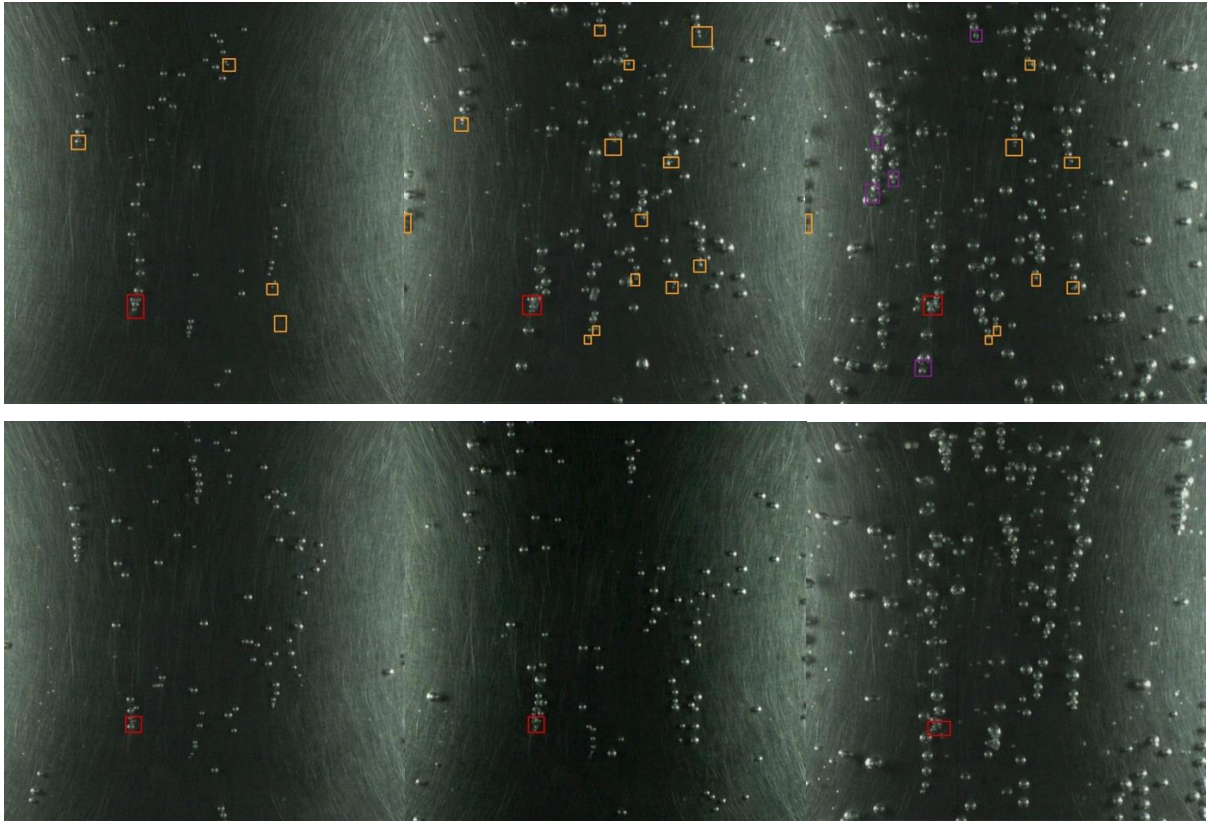


Abbildung 8.15: Keimbildung bei unterschiedlichen Massenstrom.

Die während der Evakuierung möglicherweise nicht entfernten Inertgase spielen hier ebenfalls eine entscheidende Rolle. Laut Herren Karl in seinem Buch "Wärmeübergang beim Kondensieren und Sieden" ist die Verwendung von Inertgasen eine zweckmäßige Methode zur Verstärkung der Keimbildung und damit auch des Wärmeübergangs. Obwohl Inertgase nahezu die gleiche Temperatur wie die Flüssigkeit aufweisen und kein Wärmeaustausch stattfindet, beeinflussen sie die Strömung im System merklich, was zur Verstärkung der Keimbildung und Verbesserung des Wärmeübergangs beiträgt [31].

Die Keimbildung ist zwar für das weitere Blasenwachstum notwendig, der für die Keimbildung übertragene Wärmestrom ist jedoch unerheblich im Vergleich zum insgesamt abgegebenen Wärmestrom. Die Wachstumsgeschwindigkeit hängt von dem Druckunterschied zwischen Blase und Flüssigkeit ab, den Trägheits- und Reibungskräften in der Flüssigkeit, der Oberflächenspannung sowie dem Transport von Wärme und der leichter siedenden Komponente durch die Flüssigkeit an die Blasenoberfläche [31].

In der Flüssigkeit entsteht kurzzeitig ein Unterdruck unterhalb der Blase, der die sich ablösenden Blasen vorübergehend in Wandnähe hält. Aufgrund des Unterdrucks befindet sich die Flüssigkeit in einem metastabilen Zustand mit hoher Überhitzung. Die überhitzte Flüssigkeit kann selbst als Keim für neue Blasen dienen, sodass neben der heterogenen Keimbildung in den Vertiefungen der Wand auch eine homogene Keimbildung in Wandnähe (siehe Abbildung 8.16 weiß markierte Oberfläche) möglich ist [31].

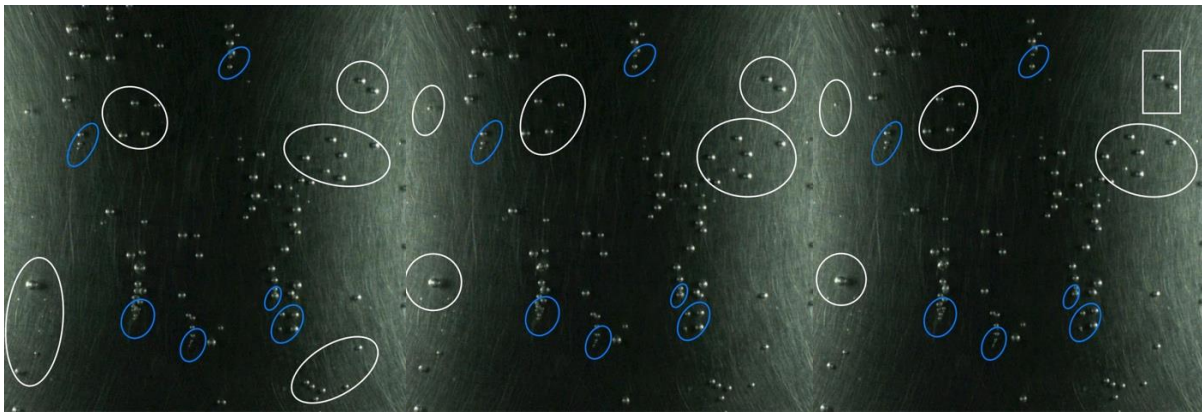


Abbildung 8.16: homogene Keimbildung in Wandnähe.

Diese Betrachtungen verdeutlichen ebenfalls, warum die Beschaffenheit der Oberflächenstruktur eine bedeutende Rolle für den Wärmeübergang spielt.

9 Verbesserungsmaßnahmen

9.1 Fließschema des Versuchsstands

Im vierten Kapitel wird das Fließschema dargestellt, jedoch sollen hier nun einige Verbesserungsmaßnahmen genannt werden. Das Kältemittel fließt nach dem Austreten aus der Versuchsapparatur in die zweite WÜ 2.2, wie in Abbildung 3.1 im Kapitel 4 dargestellt. Von dort aus tritt es in den Massendurchflussmesser C2.1 ein. Dies führte dazu, dass der Massenstrom nicht korrekt gemessen wird, da das Kältemittel zunächst in den WÜ gesammelt und abgekühlt werden sollte, bevor es in den Coriolis-Durchflussmesser eintritt. Dies führte zu großen Schwankungen bei der Messung des Gesamt-Massenstroms. Außerdem hatte die Abkühlung des Kältemittels einen negativen Einfluss auf die Temperaturregelung im Tank, da das Kältemittel mit sehr niedriger Temperatur wieder in den Tank eintritt, während es im Tank selbst höher ist. Aus diesem Grund wird das Fließdiagramm, wie in Abbildung 9.1 dargestellt, aktualisiert und angepasst, so dass der Gesamt-Massenstrom nicht mehr gemessen wird, sondern der Massenstrom der Dampf- und Flüssigphase einzeln mit einem einzigen Coriolis-Durchflussmesser gemessen wird.

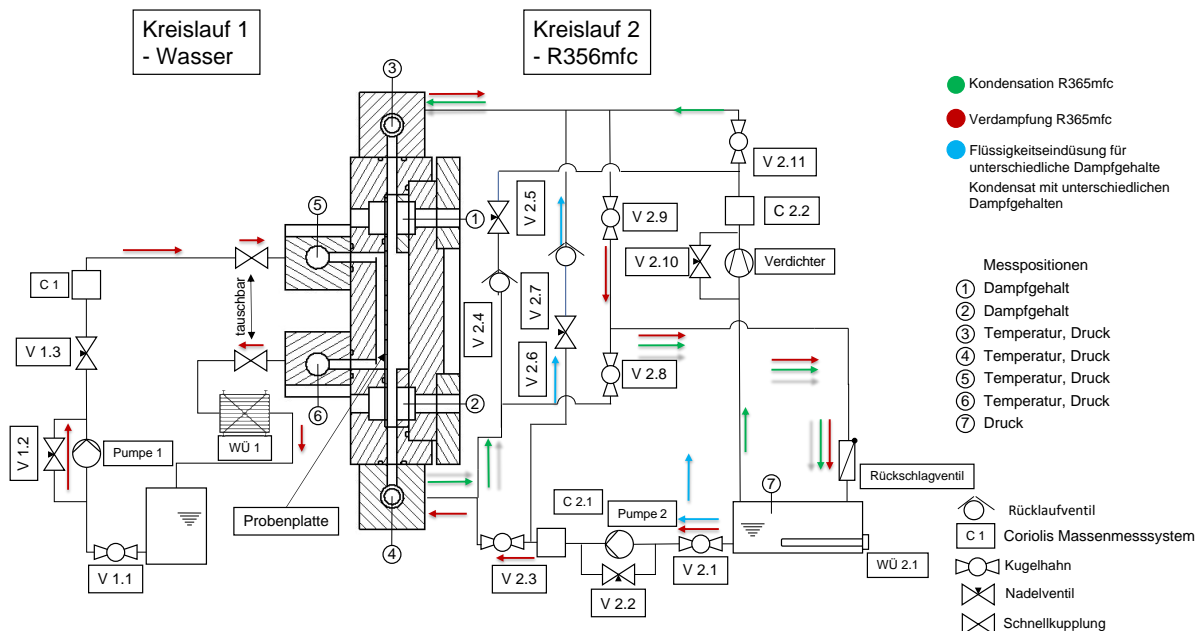


Abbildung 9.1: Aktualisierte Fließdiagramm des Versuchsstands.

Dazu wird ein Rücklaufventil V2.4 in Verbindung mit einer Nadelventil V2.5 verwendet, um unerwünschten Rückfluss von flüssigem Kältemittel in den Verdichter zu verhindern.

9.2 Auslegung eines internen Heizelements in dem Coriolis

Um die Massenströme des Dampfes mit einem Coriolis-Durchflussmesser genau messen zu können, ist es tatsächlich erforderlich, die Messung einphasig durchzuführen und Kondensation zu vermeiden. Um dies zu erreichen, kann der Coriolis-Durchflussmesser beheizt werden, um die Temperatur konstant zu halten. Daher sollen die konvektiven Wärmeverluste im Coriolis-Durchflussmesser berechnet werden. Auf diese Weise kann der erforderliche Wärmestrom bestimmt werden, der benötigt wird, um die Temperatur des Coriolis-Durchflussmessers konstant zu halten bzw. die Kondensation zu vermeiden. Der Coriolis-Durchflussmesser hat einen Durchmesser von 10 cm und eine Länge von 28 cm. Die Isolierungsschicht des Durchflussmessers wird in diesem Fall mit einer Dicke von 0,2 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/(mk) angenommen. Der angenommene Betriebspunkt des Coriolis-Durchflussmessers beträgt 100 °C, während die Umgebungstemperatur bei 20 °C liegt. Es wird angenommen, dass die Temperatur der Außenseite der Isolierungsschicht bei 70 °C liegt, um den Wärmeübertragungskoeffizienten zu berechnen:

$$\mathcal{L} = \frac{\pi \cdot d}{2} \quad (9.1)$$

$$Nu = \left[0,752 + 0,387 \cdot \left(Ra * f_3(Pr)^{\frac{1}{6}} \right)^2 \right] \text{ mit } f_3(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad (9.2)$$

$$Gr = \frac{g \beta_{\infty} \mathcal{L}^3 |\vartheta_w - \vartheta_{\infty}|}{\nu^2} \quad (9.3)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (9.4)$$

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{\mathcal{L}} \quad (9.5)$$

Schließlich wird angenommen, dass die Wärmestromdichte durch Konvektion gleich groß ist wie die Wärmestromdichte durch Wärmeleitung, um mit den Iterationsschritten zu beginnen [29]. Der Formel für die Iteration:

$$\dot{Q}_{konv} = \dot{Q}_{Leitung} \quad (9.6)$$

$$\vartheta_{iteration} = \frac{1}{\left(\alpha * d_a + \frac{1}{R\pi l}\right)} * \left(\frac{1}{R\pi l} * \vartheta_i + \alpha * d_a * \vartheta_{\infty}\right) \quad (9.7)$$

Tabelle 9.1: Iterationsschrittswerte.

Schritt	Wärmeübergangskoeffizient α In [W/m^2K]	Wärmeverluststrom \dot{Q} In [W]	$\vartheta_{iteration}$ In [$^{\circ}C$]
1	5,864673322	14,30115016	44,17894329
2	4,751253756	12,98327536	46,14198281
3	4,859169107	13,12475719	45,93787926
4	4,848214662	13,11054468	45,95845227
5	4,849321524	13,11198226	45,95637205

Die Ergebnisse der Iterationsschritten kann der Tabelle 9.1 entnommen. Folglich wird eine Leistung von ungefähr 13,5 W benötigt, um den Coriolis-Durchflussmesser bei einer konstanten Temperatur zu betreiben.

Als Alternative für die Beheizung des Coriolis-Durchflussmessers kann das Fluid selbst beheizt werden. Eine Möglichkeit hierfür wäre die Temperaturregelung des Fluids mithilfe eines Thermostats. Eine effektivere Methode könnte die direkte elektrische Beheizung des Fluids sein, um eine präzise Temperaturkontrolle sicherzustellen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, eine voll funktionsfähige Versuchsumgebung bereitzustellen, um zukünftige Untersuchungen von zweiphasigen Wärmeübergangsprozessen zu ermöglichen. Dazu gehörten die verschiedenen Aufgaben wie die Kalibrierung von Temperatur- und Kapazitätssensoren, Isolierung, Justage von PID-Regler und Funktionstests der Aggregate und Kreisläufe. Darüber hinaus wird das LabVIEW-Programm optimiert, um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten. Des Weiteren werden Bildverarbeitung und Auswertung von Messergebnissen durchgeführt, Verbesserungsmaßnahmen wie die Aktualisierung des Fließschemas und die Auslegung eines internen Heizelements im Coriolis vorgenommen.

Nach der Auswertung der Ergebnisse aus den Testläufen und der Durchführung von Bildverarbeitungsprozessen wird festgestellt, dass die Oberflächenstruktur eine essenzielle Rolle bei Phasenwechsellvorgängen spielt. Des Weiteren wird beobachtet, dass durch die Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen eine höhere Genauigkeit der Messergebnisse erzielt werden kann, da beispielsweise die Massenströme präziser gemessen werden können. Dies ermöglicht eine genauere Aussage über die Veränderungen der Massenströme. Darüber hinaus wird eine Erklärung bezüglich der Entstehung homogener und heterogener Keimbildung und deren Einflüsse auf die Wärmeübertragung erarbeitet. Diese Erkenntnisse werden später bei der Analyse von Phasenwechsellvorgängen auf nano- und mikrotechnologisch bearbeiteten Oberflächen von großer Bedeutung sein.

Es ist empfehlenswert, bei der späteren Durchführung der Versuchsumgebung und der Bildverarbeitung darauf zu achten, dass der Versuchsstand gut evakuiert wird, um Inertgase und Verunreinigungen zu entfernen. Diese Faktoren können die Keimbildung beeinflussen und somit die experimentellen Ergebnisse verfälschen. Darüber hinaus ist es von großer Bedeutung, den Programmcode kontinuierlich zu verbessern und an die spezifischen Anforderungen anzupassen. Des Weiteren sollte besondere Aufmerksamkeit auf die Lichtquelle und die Einstellung der Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera gelegt werden, um sie optimal an die Versuchsbedingungen anzupassen. Diese Faktoren haben einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Bildverarbeitung und dadurch auch auf die Genauigkeit der Analyse.

11 Literaturverzeichnis

- [1] POLZIN, A. 2020. Verdampfung und Kondensation in Plattenwärmeübertragern mit mikrostrukturierter Oberfläche. Dissertation. Hannover
- [2] saVREE, 2023. Plate Heat Exchanger (PHE), [Zugriff am: 25.12.2022]. Verfügbar unter: <https://savree.com/en/3d-models/plate-heat-exchanger-phe>
- [3] Yang, Q.; Wang, L. 1996.: Thermal performance and maldistribution of multipass plate heat exchangers. In: Wang, B. (Hrsg.): Heat Transfer Science and Technology, China: Higher Education Press, S. 621–626
- [4] Ayub, Z. H. 2003.: Plate Heat Exchanger Literature Survey and New Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Refrigerant Evaporators. Heat Transfer Engineering 24 (5), S. 3–16.
- [5] Arten der Wärmeübertragung und die für sie üblichen Bauformen der Wärmeübertrager. 2006. In: VDI-Wärmeatlas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1343-1344. ISBN 978-3-540-25504-8.
- [6] STEPHAN, P., S. KABELAC, M. KIND, D. MEWES, K. SCHABER und T. WETZEL, Hg. 2002. VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Neunte, überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, VDI-Buch. ISBN 978-3-662-10743-0.
- [7] BAEHR, H.D. und K. STEPHAN. 2016. Wärme- und Stoffübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-49676-3.
- [8] Westwater, J. W. 1959. BOILING HEAT TRANSFER, [Zugriff am: 01.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.jstor.org/stable/27827380?seq=1>

[9] Connor, N. 2019. Was ist Siedekrise – Kritischer Wärmestrom – Definition. Thermal Engineering. [Zugriff am: 05.04.2023]. Verfügbar unter: https://www.thermal-engineering.org/de/was-ist-siedekrise-kritischer-warmestrom-definition/?utm_content=cmp-true

[10] kegami, Y., Mutair, S., & Kawabata, Y. 2015. Experimental and Numerical Investigations on Plate-Type Heat Exchanger Performance. Open Journal of Fluid Dynamics, 5, 92-98. [Zugriff am: 06.02.2023]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4236/ojfd.2015.51011>

[11] Muley, A. and Manglik, R.M. 1999. Experimental Study of Turbulent Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Plate Heat Exchanger with Chevron Plates. Journal of Heat Transfer, 121, 110-117. [Zugriff am: 09.03.2023]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2825923>

[12] DR.-ING. GRABENSTEIN, V. 2014. Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Kondensation in Plattenwärmeübertragern. Dissertation. Hannover

[13] Brauner, S. 2022. Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsumgebung zur Visualisierung von Kondensations- und Verdampfungsvorgängen. Hannover

[14] SIEMENS AG. Coriolis flowmeters [online]. 2010 SITRANS F C MASS 2100 Di 3-40 Operating Instructions. [Zugriff am: 12.03.2023]. Verfügbar unter: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/364/45027364/att_30499/v1/MASS2100_3-40_OI_En_en-US.pdf

[15] MICRO MOTION und EMERSON. Produktdatenblatt: Micro Motion Messsysteme [online]. 2021. Produktübersicht und technische Daten. [Zugriff am: 17.01.2022]. Verfügbar unter: <https://www.emerson.com/de-de/catalog/coriolis-de-de/micro-motion-sku-f050p-de-de?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&facetLimit:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&orderBy:&partsOrderBy:&pageView:list&miPrice:&maxPrice:&pageSize:&facetRange:&>

[16] MICRO MOTION und EMERSON. Micro Motion Messsysteme der F-Serie für Durchfluss und Dichte [online], Februar 2022 [Zugriff am: 03.12.2022]. Verfügbar unter: <https://www.emerson.com/documents/automation/micro-motion-messsysteme-der-f-serie-f%C3%BCr-durchfluss-und-dichte-de-64814.pdf>

[17] Wikipedia. (n.d.). Coriolis-Massendurchflussmesser. [Zugriff am: 09.02.2023]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Coriolis-Massendurchflussmesser#/media/Datei:Dibujo_Dos_tubo1.PNG

[18] Tec-Science. (n.d.). Wie funktioniert ein Widerstandsthermometer? [Zugriff am: 16.01.2023]. Verfügbar unter: <https://www.tec-science.com/de/thermodynamik-waermelehre/temperatur/wie-funktioniert-ein-widerstandsthermometer/>

[19] Temperatur Profis. (n.d.). Funktionsweise PT100. [Zugriff am: 01.02.2023]. Verfügbar unter: <https://temperatur-profis.de/temperaturfuehler/funktionsweise-pt100/>

[20] First Sensor. (n.d.). Druckarten. [Zugriff am: 03.02.2023]. Verfügbar unter: <https://www.first-sensor.com/de/produkte/drucksensoren/drucksensoren-und-transmitter/druckarten.html>

[21] CS Schneider Messtechnik GmbH. (n.d.). Differenzdrucktransmitter IPD 40. [Zugriff am: 03.02.2023]. Verfügbar unter: <https://www.ics-schneider.de/produkte/differenzdrucktransmitter-ipd-40/>

[22] National Instruments. (n.d.). LabVIEW. [Zugriff am: 21.01.2023]. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-de/shop/labview.html>

[23] Baumer. (n.d.). Funktionsweise und Technologie von kapazitiven Sensoren. [Zugriff am: 03.02.2023]. Verfügbar unter: https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-kapazitiven-sensoren/a/Know-how_Function_Capacitive-sensors

[24] Phantom Camera. (n.d.). [Zugriff am: 15.02.2023]. Verfügbar unter: <https://www.phantomcamera.de/>

[25] Phantom High-Speed. (n.d.). Phantom Features. [Zugriff am: 22.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.phantomhighspeed.com/resourcesandsupport/phantomresources/phantomfeatures>

[26] Hagmann, G. 2003.: Grundlagen der Elektrotechnik. 10. Aufl. Wiebelsheim: AULA- Verlag

[27] Isosax. (n.d.). Polyurethanschaum. [Zugriff am: 29.02.2023]. Verfügbar unter: <https://www.isosax.de/polyurethanschaum>

[28] Wikipedia. 2021. Ziegler–Nichols method. [Zugriff am: 03.02.2023]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method

[29] SCHARF, P.D.-I.R. Wärmeübertragung I. 2021. Wissensspeicher zur Vorlesung. Hannover: Leibniz Universität Hannover

[30] MathWorks. (n.d.). Image Processing Toolbox. [Zugriff am: 21.02.2023]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/products/image.html>

[31] Stephan, K. 1988. Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83159-1>, ISBN-13 :978-3-540-18075-3

[32] Aström, K. J., & Hägglund, T. 2006. Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. ISBN 978-1556179426.

[33] Lefebvre, A. H. 1989. Atomization and Sprays. Hemisphere Publishing Corporation. New York, USA. ISBN 978-0891166032

[34] Ziegler, J.G., & Nichols, N.B. 1942. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, 64, 759-768.

12. Anhang

Einleitung zur Nutzung der Phantom-Kamera:

- Platzieren Sie die Phantom-Kamera-Stand auf einem Stativ oder einer anderen stabilen Oberfläche und stellen Sie sicher, dass sie bzw. die Linse in einem Abstand von ca. 10 cm vom Prüfstand positioniert ist Vgl. Abbildung 12.1.
- Achten Sie darauf, dass beim Aufsetzen der Optik kein Licht in die Kamera eintreten darf bzw. muss die Beleuchtung ausgeschaltet werden.
- Setzen Sie die zusätzliche Vergrößerungslinse auf die Kamera auf. Überprüfen Sie, ob die Vergrößerungslinse sicher befestigt ist.
- Bringen Sie die 50 mm Optik an der Kamera an.
- Stellen Sie sicher, dass die Kamera korrekt an den Computer angeschlossen ist und dass die Phantom-Kamera-Software (PCC oder Phantom 675.2) ordnungsgemäß installiert ist. Öffnen Sie die Phantom-Kamera-Software und stellen Sie sicher, dass die Kamera erkannt wird Vgl. Abbildung 12.2.
- Stellen Sie in der Software die Auflösung auf 768 x 768 und die Sampling-Rate auf 2000 ein.
- Stellen Sie den Belichtungswert (Exposure) auf 496,5 ein und aktivieren Sie den EDR-Modus mit einem Wert von 490.
- Stellen Sie den Trigger-Modus auf "Last =3565" ein, so dass die Kamera das letzte Ereignis aufzeichnet, das ausgelöst wird.
- Überprüfen Sie die Fokus-Einstellungen der Kamera und stellen Sie sicher, dass das Versuchsmodul scharf aufgenommen wird. Sie können die Kamera manuell fokussieren
- Starten Sie die Aufnahme und überwachen Sie die Kamera, um sicherzustellen, dass alles wie erwartet funktioniert.
- Wenn die Aufnahme abgeschlossen ist, übertragen Sie die Daten auf Ihren Computer unter Play und dann Save.

Bitte beachten Sie, dass die tatsächlichen Einstellungen und Schritte je nach den spezifischen Anforderungen Ihrer Aufnahme variieren können. Es ist wichtig, sicherzustellen, dass die Kamera und der Prüfstand stabil positioniert sind, um unerwünschte Bewegungen während der Aufnahme zu vermeiden.

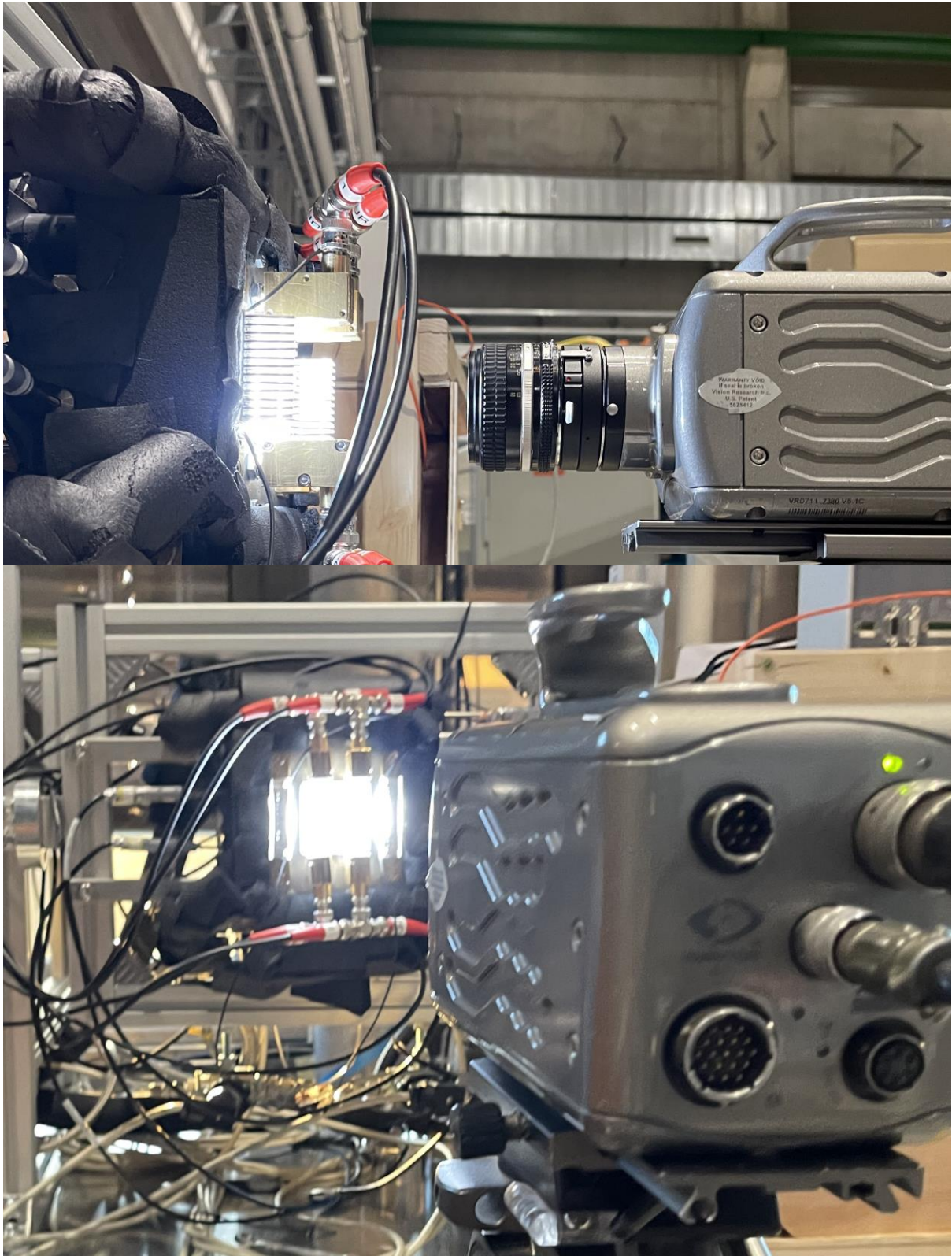


Abbildung 12.1: Positionierung der Kamera.

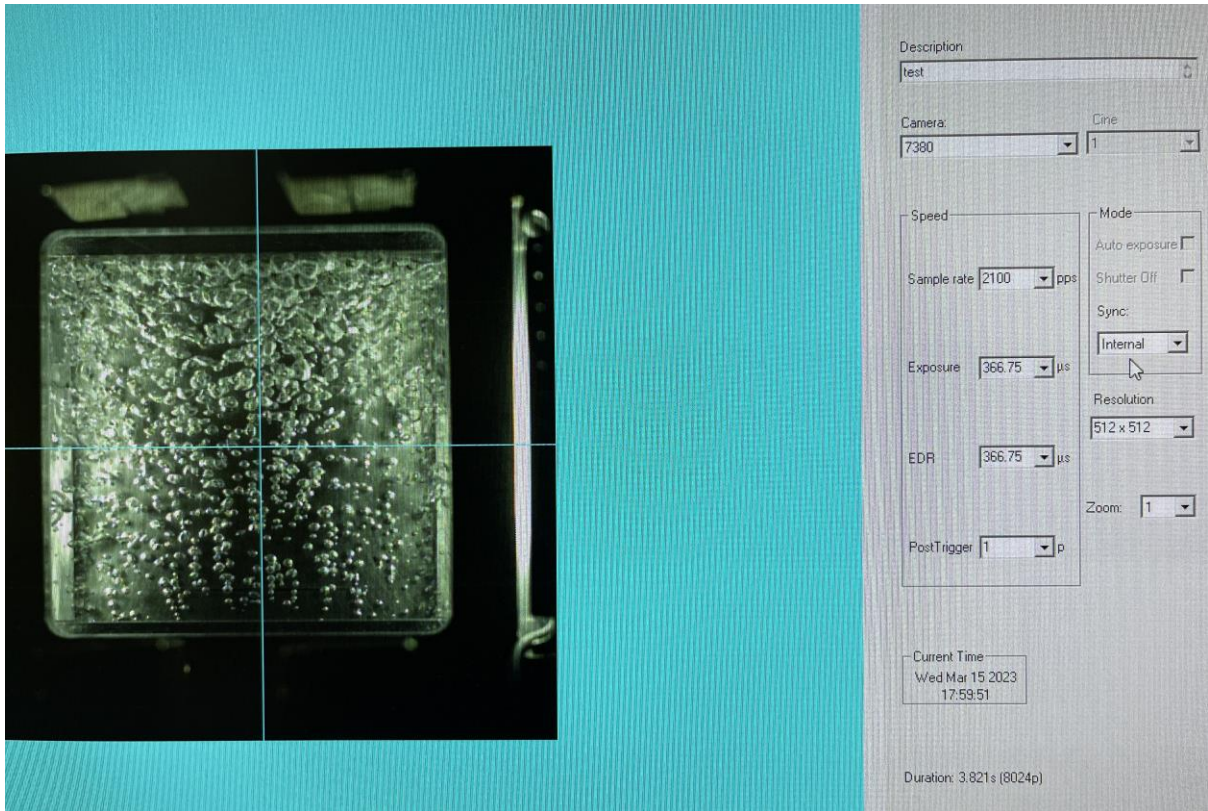


Abbildung 12.2: Benutzeroberfläche des PCC-Programms.

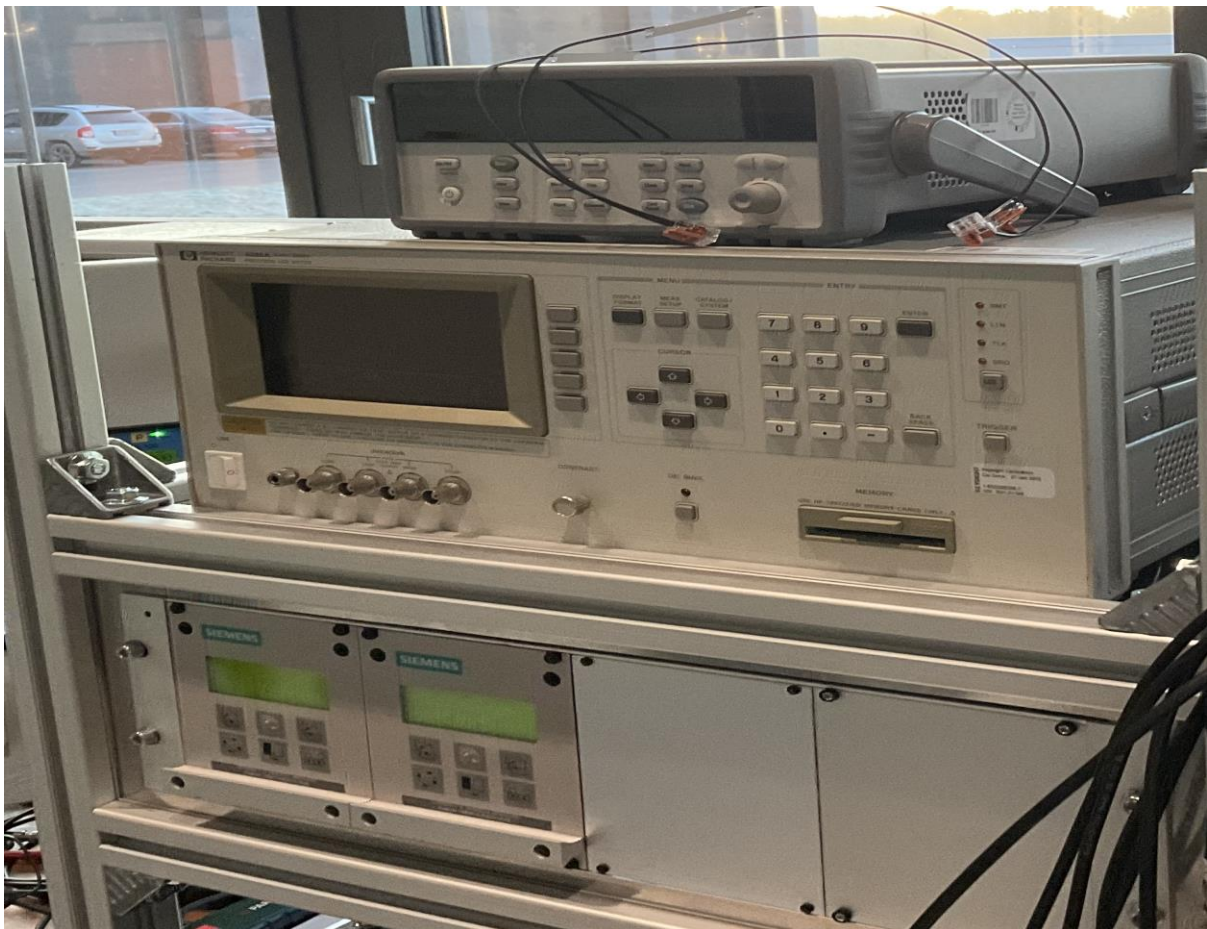


Abbildung 12.3: Messgeräte zur Signalumwandlung von kapazitiven Sensoren.

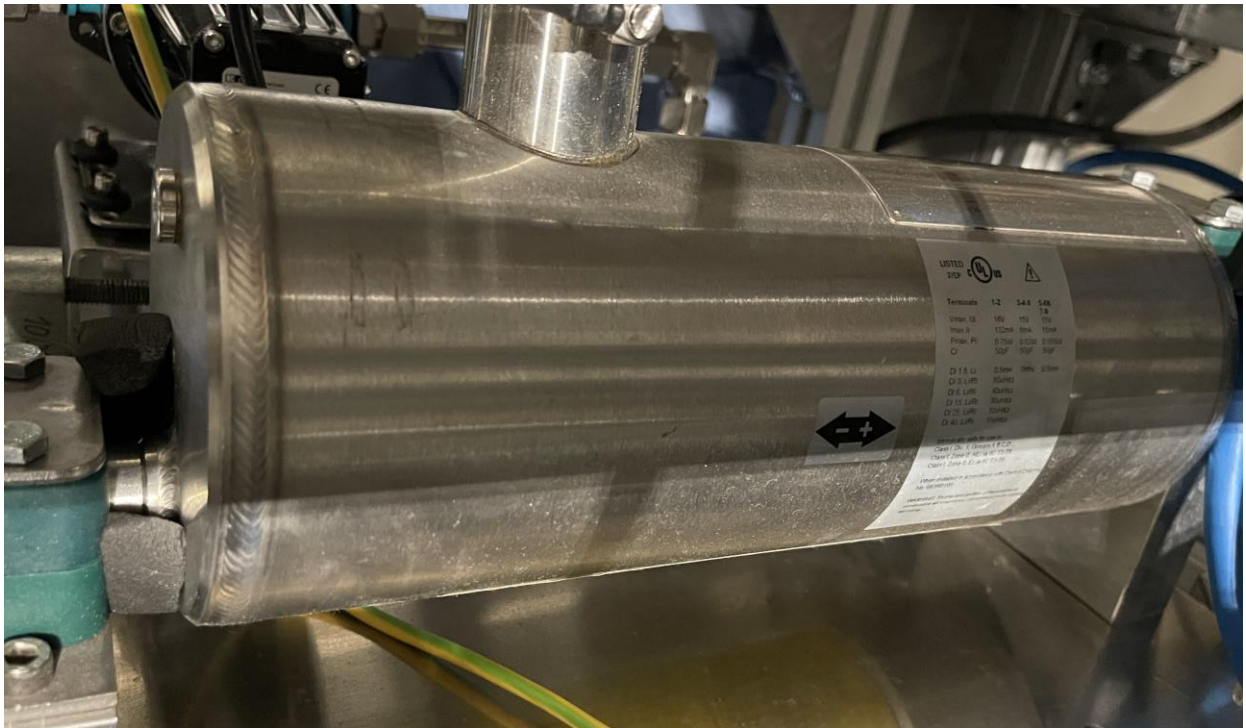


Abbildung 12.4: Coriolis-Durchflussmesser, der dafür das interne Heizelement ausgelegt.

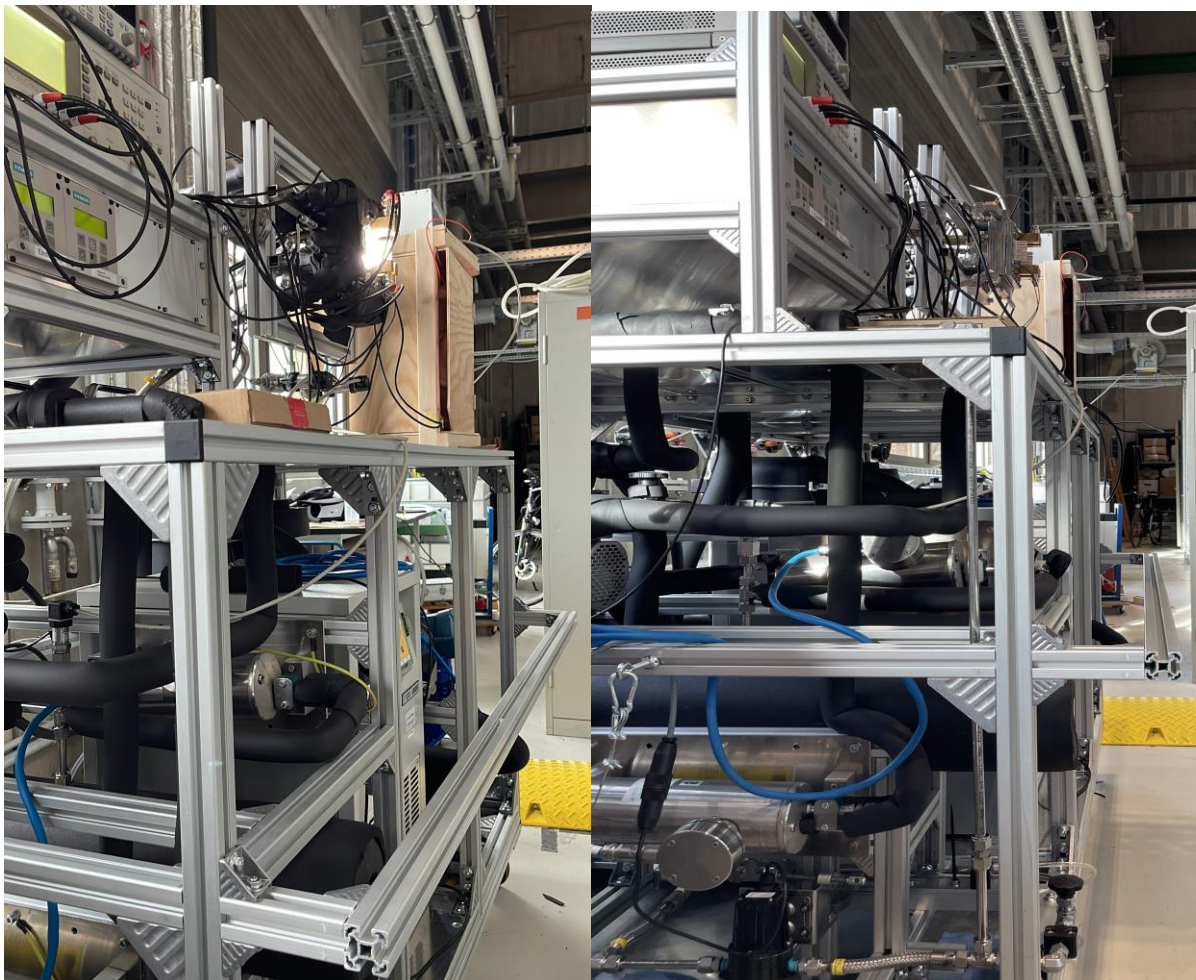


Abbildung 12.5: Experimentelle Umgebung