

## Diplomarbeit

# Wärmeleitung und Scherbeanspruchung beim Auftauprozess von Fruchtstücken

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.Ing.)

Eingereicht von:

**Raphael PIERINGER**

MatrNr. 01126958

---

Eingereicht an der:

TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Betreuung:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Harasek (TU Wien)

Projektass. Dipl.-Ing. Christian Jordan (TU Wien)

Projektass. Dipl.-Ing. Zsolt Harsfalvi BSc (TU Wien)

Technische Universität Wien - Institut für Verfahrenstechnik,  
Umwelttechnik und Techn. Biowissenschaften/E166  
Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Wien, 28. August 2018

Diese Arbeit wurde von der Förderstelle FFG im Rahmen des Projektes *AGRANA-FROM FIELD TO CUP-a new level of quality and naturalness in fruit preparations* mit der Projektnummer 849264 unterstützt.

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung Diplomarbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

---

Wien, 28. August 2018, Raphael Pieringer

# Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei meiner Familie, meinen Freunden, meinen Studienkollegen und meinen Arbeitskollegen bedanken, da sie mich in der Zeit meines Studiums begleitet haben. Sie machten diesen Lebensabschnitt zu etwas Besonderem, an das ich mich immer gerne zurückerinnern werde.

Für die Chance diese Arbeit zu schreiben, möchte ich mich bei Herrn Professor Michael Harasek sehr herzlich bedanken, da ich Teil eines hervorragenden Teams sein durfte. Die Praxisnähe und die Hoffnung, dass meine Arbeit zur Verbesserung der Prozesse von Morgen führt, hat mich sehr für diese Arbeit motiviert. Hierbei möchte ich mich bei *AGRANA Fruit Austria GmbH* für das Ermöglichen dieser Diplomarbeit und die Möglichkeit, die entsprechenden Anlagen zu besichtigen bedanken.

Weiters möchte ich mich vor allem bei meinem Betreuer Zsolt Harssfalvi bedanken, der mir stets mit guten Ratschlägen zur Seite stand. Für fachspezifische Gespräche, in denen ich viel Wissen sammeln konnte, möchte ich mich bei Christian Jordan bedanken.

Meine Freunde und Kollegen aus den CFD-Meetings möchte ich an dieser Stelle ebenfalls erwähnen, da sie für ein angenehmes Arbeitsklima sorgten, in dem jeder stets für fachspezifische Fragen zur Verfügung stand. Bei meinen Kollegen aus der CFD-Kammer möchte ich mich ebenfalls bedanken, da sie durch unsere Tischfußballturniere zur Auflockerung beitrugen und ich mich dadurch mit neuer Energie meiner Aufgabe widmen konnte.

# Kurzfassung

Pasteurisationsprozesse werden häufig in der Lebensmittelindustrie durchgeführt, um die Haltbarkeit der Lebensmittel zu verlängern. CFD-Simulationen werden vermehrt in diesem Bereich eingesetzt, einerseits um Schwachstellen der Geometrie von Pasteurisationsanlagen zu finden und somit einer unzureichenden Pasteurisierung vorzubeugen, andererseits um die Produktqualität durch eine schonendere Pasteurisation zu verbessern. Diese Diplomarbeit behandelt den Aufwärmprozess eines Pasteurisationsprozesses mittels einer computerunterstützten Strömungssimulation (CFD) und wurde durch die Firma *AGRANA Fruit Austria GmbH* beauftragt. Es sollen dabei eingefrorene, würfelige Fruchtstücke bis zu der gewünschten Temperatur des Pasteurisationsprozesses durch ein pseudoplastisches Fluid aufgewärmt werden. Bei diesem Prozess finden eine Aufwärmung und ein Auftauvorgang statt. Durch den erforderlichen Rührprozess wird das Fruchtstück mechanisch belastet. Diese werden durch das Programm *OpenFOAM* simuliert. Das Ziel ist dabei die Scherspannung auf der Oberfläche des Fruchtstückes zu simulieren, da diese entscheidend dafür ist, ob das Fruchtstück eine unerwünschte Zerkleinerung erfährt.

Nach der Einleitung und der Theorie, welche zum Thema hinführen soll werden Experimente zur Messung der Stoffeigenschaften von Erdbeermarmelade durchgeführt. Hier wird der Zusammenhang zwischen Schergeschwindigkeit, Scherspannung und Temperatur gemessen und durch eine Formel ausgedrückt. Anschließend wird das Experiment in *OpenFOAM* simuliert. Dadurch wird die Simulation überprüft und es zeigte sich, dass die Simulation mit dem Experiment übereinstimmt. Die Überprüfung ist notwendig, da der Code zur Berechnung der Schergeschwindigkeit hinzugefügt wurde. Nun wird der Aufwärm-/Auftauprozess simuliert, wobei sich anhand der aufgestellten Enthalpiebilanz zeigte, dass der Auftauvorgang falsch berechnet wird. Es stellte sich heraus, dass der Solver Probleme mit der Lösung, der für die Schmelzenthalpie erstellten fiktiven  $c_p$ -Funktion hat. Diese wurde daraufhin durch eine stufenförmige  $c_p$ -Funktion über den Schmelzbereich ersetzt und dadurch konnte der Solver den Auftauvorgang berechnen. Der Aufwärmvorgang wurde jedoch weiterhin falsch dargestellt. Nach einer intensiven Fehlersuche stellte sich heraus, dass die Wärmeleitfähigkeit nicht, wie zuvor, durch eine Konstante beschrieben werden darf, da die Funktion der Wärmeleitfähigkeit essentiell für die Simulation des Auftauvorganges ist. Es musste ein Experiment zur Anpassung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt werden, da in der Literatur nur konstante Werte für diese Stoffe gefunden wurden. Durch die Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit in der Simulation wurde die Funktion der Wärmeleitfähigkeit

der Kartoffel schrittweise ermittelt. Danach konnte der Aufwärm-/Auftauvorgang des Experimentes mit sehr guter Annäherung simuliert werden. Nachdem vorerst kubische Kartoffelstücke wegen der besseren Handhabung für die Experimente verwendet wurden, wurden die Stoffwerte auf jene von Erdbeeren als Feststoff und Erdbeermarmelade als Fluid bei der Simulation geändert. Nun wurden mehrere Simulationen von Erdbeerstücken in Erdbeermarmelade durchgeführt. Das erzielte Ergebnis dabei ist, die richtige Simulation der an der Oberfläche der Fruchtstücke wirkenden Scherspannung. Diese verändern sich je nach der Viskosität, welche von der Schergeschwindigkeit und der Temperatur, also vom Auftauvorgang, anhängig ist. Da nun die Scherspannung richtig berechnet wird, können verschiedene Feststoff-Flüssigkeit-Systeme in Folgearbeiten dieser Diplomarbeit kombiniert und berechnet werden. Die simulierte Scherspannung an der Oberfläche des Fruchtstücks muss mit Literaturdaten der maximalen Scherspannung des Feststoffes verglichen werden. Somit kann die Rührgeschwindigkeit so angepasst werden, dass die Feststoffe nicht zerkleinert werden.

# Abstract

In the food industry, pasteurization is often used to prolong the shelf life of produce. CFD-simulations are increasingly used in this area to find weaknesses in the geometry of pasteurization plants and therefore prevent inadequate pasteurization. Furthermore, these simulations are used to improve the product quality by a gentler pasteurization process. This thesis deals with the warm-up process of a pasteurization process by means of a computer aided flow simulation (CFD) and was sponsored by *AGRANA Fruit Austria GmbH*. Frozen cubic fruit pieces are warmed up to the desired temperature of the pasteurization process by a pseudoplastic fluid. This process involves warming, melting, and mechanical stress on the fruit piece, which is simulated by the program *OpenFOAM*. The aim is to simulate the shear stress on the surface of the fruit piece, as this is crucial for knowing if the fruit piece undergoes an unwanted crushing.

After the introduction and the theory that lead to the main topic, experiments are carried out to measure the material properties of strawberry jam. Here the relationship between shear rate, shear stress and temperature is measured and expressed by a formula. Then the experiment is simulated in *OpenFOAM*. This will verify the simulation and show that the simulation was consistent with the experiment. This test is necessary as the code for calculating the shear rate has been added at this stage. As a next step, the warm-up / thawing process is simulated and the established enthalpy balance shows that the thawing process is calculated incorrectly. It showed that the solver has problems with the solution of the fictional  $c_p$ -Funktion, which has been created for the enthalpy of fusion. This was then replaced by a cascaded  $c_p$ -Funktion across the melting range, allowing the solver to calculate the melting process. However, the warm-up process was still misrepresented. After an intensive error search, it showed that the thermal conductivity cannot, as seen before, be described by a constant, as the function of the heat conductivity has a strong effect on the thawing process. Therefore, an experiment had to be carried out to adjust the thermal conductivity since only constant values are given in the literature. By adjusting the function of the thermal conductivity in the simulation, the function of the thermal conductivity of the potato was determined step by step. Thereafter, the warm-up / thawing process of the experiment could be simulated with very good approximation.

Initially, cubic potato pieces were used in the experiment because of better handling. For the simulations, the used material changed to strawberries as a solid and strawberry jam as a liquid. As a next step, several simulations of strawberry

pieces in strawberry jam were carried out. The obtained result is the correct simulation of the shearing stress acting on the surface of the fruit pieces. These results may change depending on the viscosity which varies according to changes in the shear rate and the temperature (thawing process).

Now that the shear stress is calculated correctly, different solid-liquid systems can be combined and calculated in other works following this thesis. The simulated shear stress at the surface of the fruit piece has to be compared with literature data dealing with the maximum shear stress of solids. As a result, the stirring speed can be adjusted and the solids are not crushed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.3	Literaturrecherche zu themenbezogenen CFD-Simulationen . . . . .	3
1.3.1	Aufwärm-, Schmelz- und Abkühlvorgang . . . . .	3
1.3.2	Nichtnewtonsche Fluide und Zweistoffgemische . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>6</b>
2.1	Geschichtliches zum Pasteur Effekt . . . . .	6
2.2	CFD & Pasteurisierung . . . . .	8
2.3	Scherspannung und Schergeschwindigkeit . . . . .	8
2.4	Auftauvorgang in der CFD-Simulation . . . . .	10
2.5	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	12
2.6	Vorgehensweise für die CFD-Simulation . . . . .	13
2.6.1	Geometrie . . . . .	14
2.6.2	Vernetzung . . . . .	14
2.6.3	Simulation . . . . .	16
2.7	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl) . . . . .	19
2.8	Literaturrecherche der Stoffdaten . . . . .	19
2.8.1	Maximale Scherspannung von Obst . . . . .	19
2.8.2	Stoffdaten von Kaltlagergütern . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Überprüfung der Simulation der Schergeschwindigkeit</b>	<b>21</b>
3.1	Experimente zur Bestimmung der Schergeschwindigkeit . . . . .	21
3.1.1	Vorbereitung . . . . .	22
3.1.2	Messungen der Schergeschwindigkeiten . . . . .	22
3.1.3	Anpassung der Modellparameter . . . . .	26
3.2	Simulation der Schergeschwindigkeit mittels OpenFoam . . . . .	30
3.2.1	<i>OpenFOAM</i> Case Setup . . . . .	30
3.2.2	Ergebnisse . . . . .	33

---

<b>4</b>	<b>Überprüfung der Simulation des Auftauvorganges</b>	<b>36</b>
4.1	Simulation des Schmelzvorganges einer Eiskugel . . . . .	36
4.1.1	Verwendete <i>OpenFOAM</i> Files . . . . .	37
4.2	Überprüfung der Enthalpie . . . . .	39
4.3	Aufbau eines multiPhase Cases . . . . .	41
4.4	Zusammenfassung . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Experimente und Simulation des Auftauvorganges</b>	<b>44</b>
5.1	Experimente zum Auftauvorgang . . . . .	44
5.1.1	Wählen eines geeigneten Fruchtstücks . . . . .	45
5.1.2	Auslegung des Strömungskanals . . . . .	48
5.1.3	Auslitern der Pumpe . . . . .	51
5.1.4	Versuchsaufbau . . . . .	54
5.1.5	Versuchsdurchführung . . . . .	58
5.1.6	Ergebnisse der Experimente . . . . .	59
5.2	Simulation des Auftauvorganges . . . . .	68
5.2.1	Verwendete Stoffwerte . . . . .	68
5.2.2	Simulation der Pegelhöhe . . . . .	72
5.2.3	Vergleich der Simulation mit den Experimenten . . . . .	74
5.3	Zusammenfassung . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Experimente zur Wärmeleitfähigkeit und Dichtebestimmung</b>	<b>79</b>
6.1	Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	79
6.1.1	Aufbau des Experimentes . . . . .	80
6.1.2	Ergebnis des Experimentes . . . . .	82
6.1.3	Aufbau der Simulation . . . . .	83
6.1.4	Ermittlung der Stoffdaten . . . . .	84
6.1.5	Ergebnisse der Simulation . . . . .	85
6.2	Experiment zur Dichtebestimmung von Kartoffeln . . . . .	87
6.3	Simulationsergebnisse mit einer Funktion der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	88
6.4	Zusammenfassung . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Simulation des Auftauvorganges von Fruchtwürfeln</b>	<b>94</b>
7.1	Simulation der Erwärmung einer Erdbeere in verschiedenen Lagen . . . . .	96
7.2	Simulation der Erwärmung mehrerer Würfeln in beliebigen Lagen . . . . .	102
7.3	Zusammenfassung . . . . .	106
<b>8</b>	<b>Optimierung des Pasteurisationsprozesses</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>110</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	110
9.2	Ausblick . . . . .	111

---

<b>A Messdaten und <i>OpenFOAM</i>-Files zu Kapitel 3</b>	<b>I</b>
<b>B Kontrolle der Enthalpiedifferenz</b>	<b>IV</b>
<b>C Messdaten der Experimente im Strömungskanal</b>	<b>V</b>
<b>D Files zur Berechnung des Aufwärm- vorgangs im Strömungskanal</b>	<b>XII</b>
<b>E Benötigte Stoffwerte für die Simulation</b>	<b>XVIII</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Ziel der Diplomarbeit . . . . .	2
2.1	Prozessverlauf einer Pasteurisierung . . . . .	7
2.2	Verformung eines Fluidelementes bei ebener, laminarer Scherströmung . . . . .	9
2.3	Zusätzliche Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von der Schergeschwindigkeit bei gleicher Temperatur. . . . .	10
2.4	Kontinuierlicher Verlauf der $c_p$ -Funktion beim Schmelzvorgang . . . . .	12
2.5	Spezifische Wärmeleitfähigkeit von Eis und Wasser im Arbeitsbereich. . . . .	13
2.6	Schritte zur CFD Simulation und Beispiele von verwendeten Programmen. . . . .	14
2.7	Hinzugefügter Code zur Berechnung der Schergeschwindigkeit . . . . .	17
2.8	Grundsätzlicher Aufbau eines <i>OpenFOAM</i> Cases. . . . .	18
3.1	Messaufbau für die Viskositätsmessung . . . . .	24
3.2	Zusammenhang der Scherspannung mit steigender Schergeschwindigkeit bei Erdbeermarmelade. . . . .	25
3.3	Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit bei Erdbeermarmelade. . . . .	26
3.4	Einzelne Bereiche des simulierten Rotationsviskosimeters. . . . .	31
3.5	Definition der Geschwindigkeit des inneren Kegels des Rotationsviskosimeters im u-File. . . . .	32
3.6	Definition der temperaturabhängigen Schergeschwindigkeit in <i>thermophysicalProperties</i> . . . . .	33
3.7	Paraview Postprocessing: Geschwindigkeitsfeld im Rotationsviskosimeter . . . . .	34
4.1	Auftauvorgang einer Kugel aus Eis in einem Flüssigkeitsstrom. . . . .	37
4.2	Verzeichnisbaum des verwendeten <i>OpenFOAM</i> Cases. . . . .	38
4.3	$c_p$ -Funktion im File <i>thermophysicalProperties</i> zur Kontrolle der Enthalpiebilanz. . . . .	39
4.4	Abweichung der Enthalpiedifferenz $dH$ beim Schmelzen einer Eiskugel. . . . .	40
4.5	Simulationsergebnisse des Tutorials <i>damBreaking</i> . . . . .	42

4.6	Verändertes Tutorial <i>damBreaking</i> . . . . .	43
5.1	Würfelig zugeschnittene Früchte . . . . .	47
5.2	Konstruktionszeichnungen des Strömungskanals . . . . .	50
5.3	Horizontales Geschwindigkeitsprofil vor dem Fruchtstück bei der Simulation des gesamten Strömungskanals. . . . .	50
5.4	Volumenströme bei verschiedenen Pumpenleistungen des Umlaufthermostates. . . . .	52
5.5	Aufbau des Experimentes zur Validierung des Schmelz- und Aufheizvorganges. . . . .	56
5.6	Zusammengebaute Vorrichtung zur Fixierung des Kartoffelstücks und Konstruktion der Lochplatte zur Positionierung der Sensoren. . . . .	57
5.7	Relative Temperaturabweichung der Pt1000-Elemente. . . . .	60
5.8	Relative Temperaturabweichung der Pt100-Elemente. . . . .	60
5.9	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 1 . . . . .	62
5.10	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 2 . . . . .	62
5.11	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 3 . . . . .	63
5.12	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 4 . . . . .	63
5.13	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 5 . . . . .	64
5.14	Aufwärmvorgang, Experiment Nr. 6 . . . . .	64
5.15	Aufwärmvorgang, der Experimente V1, V2, V3 und V4. . . . .	66
5.16	Mittelwert der Experimente V1, V2, V3 und V4 mit den Fehlerbalken für die jeweilige Messung. . . . .	66
5.17	Vergleich der Temperaturen im Mittelpunkt des Fruchtstückes . . . . .	67
5.18	Funktion der Dichteänderung von Wasser als Funktion der Temperatur. . . . .	69
5.19	<i>Thermophysical Properties</i> mit den ermittelten Funktionen für die Simulation des Aufwärmvorganges des Experimentes. . . . .	71
5.20	Aufbau eines neuen Cases zur Simulierung der Pegelhöhe auf Basis des Tutorials <i>damBreaking</i> . . . . .	73
5.21	Skizze des kleinen Strömungskanals . . . . .	74
5.22	Auswertung des berechneten Aufwärmvorgangs in <i>Paraview</i> . . . . .	75
5.23	Auswertung der Simulation mit der Funktion <i>Plot Over Line</i> in <i>ParaView</i> . . . . .	76
5.24	Vergleich des Experimentes bei einer Fluidtemperatur von 47 °C mit verschiedenen Simulationen. . . . .	77
6.1	Aufbau für das Experiment zur Validierung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	81
6.2	Querschnitt der Kartoffel nach dem Experiment und Skizze der Anordnung der Bohrungen. . . . .	81
6.3	Temperaturabgleich der verwendeten Sensoren. . . . .	82
6.4	Korrigierte Temperatur der Sensoren zur Validierung der Wärmeleitfähigkeit. . . . .	83

6.5	Vernetzung der Geometrie im Programm <i>Gambit</i> im Bereich des Heizstabes und der Pt100 Sensoren rund. . . . .	84
6.6	Kontrolle der Gitterqualität in <i>Gambit</i> . . . . .	84
6.7	Temperaturkurven des Aufheizvorganges. Vergleich zwischen Experiment und Simulation. . . . .	86
6.8	Vergleich der Aufheizkurven von verschiedenen Simulationen (Variation $c_p$ -Werte) mit dem Experimentes. . . . .	86
6.9	Vergleich der Aufheizkurven von verschiedenen Simulationen (Variation $\lambda$ -Werte) mit dem Experimentes. . . . .	87
6.10	Vergleich von Experiment Nr. 3 mit der Simulation des Aufwärmprozesses mit verschiedenen Wärmekapazitäten . . . . .	89
6.11	Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität vom Feuchtigkeitsgehalt der Kartoffel . . . . .	90
6.12	Vergleich von Experiment Nr. 3 mit zwei Simulationen ( $\lambda$ -Funktion und konstanter $\lambda$ -Wert) . . . . .	91
6.13	Vergleich von Experiment Nr. 1 (Tabelle 5.3) mit der dazugehörigen Simulation. . . . .	91
6.14	Vergleich von Experiment Nr. 5 (Tabelle 5.3) mit der dazugehörigen Simulation. . . . .	92
7.1	Lage und Vernetzung des geraden Würfels im Strömungskanal. . . .	96
7.2	Aufwärmvorgang in einem gerade im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	97
7.3	Scherspannungen beim Aufwärmvorgang an einem gerade im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	98
7.4	Lage und Vernetzung des schrägen Würfels im Strömungskanal. . . .	99
7.5	Aufwärmvorgang in einem schräg im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	100
7.6	Scherspannungen beim Aufwärmvorgang an einem schräg im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	101
7.7	Anordnung von drei Erdbeerstücke im Strömungskanal. . . . .	103
7.8	Vernetzung der Schnittebenen bei drei Erdbeerstücken . . . . .	103
7.9	Aufwärmvorgang in drei chaotisch im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	104
7.10	Scherspannung beim Aufwärmvorgang an drei chaotisch im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. . . . .	105
8.1	Iterative Erstellung der optimalen Funktion der Umdrehungsgeschwindigkeit . . . . .	108
8.2	Funktion der optimalen Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührwerks . . . . .	109

A.1	File <i>u</i> für die Berechnung der Schergeschwindigkeit im Rotationsviskosimeter. . . . .	II
A.2	File <code>./constant/medium/thermophysicalProperties</code> anhand der Berechnung des Cases-Cylinder j100 T26. . . . .	III
B.1	Für die Zusammenfassung der einzelnen Simulationsdaten nötiges <i>Python</i> -Skript. . . . .	IV
D.1	Beispiel des T Files bei einer Fluidtemperatur von 47 °C . . . . .	XII
D.2	<code>controlDict</code> des Auftauvorgangs des Kartoffels. . . . .	XIII
D.3	Zuordnung der Regionen zu deren physikalischem Zustand -> fest oder flüssig (Pfad im Case: <code>./constant/regionProperties</code> ). . . . .	XIII
D.4	Definition der Randbedingungen im Strömungskanal (Pfad im Case: <code>./constant/liquidF/boundary</code> ). . . . .	XIV
D.5	Implementierung der Stoffwerte beim Aufwärmvorgang im File <i>thermophysicalProperties</i> . . . . .	XV

# Tabellenverzeichnis

2.1	Zellenqualität anhand der Skewness . . . . .	16
2.2	Reihenfolge der Einheiten, wie sie in <i>OpenFOAM</i> -Files eingegeben werden müssen. . . . .	18
2.3	Beschreiben der Einheit der Kraft in <i>OpenFOAM</i> . . . . .	18
3.1	Verfügbare Messsysteme für das Rotationsviskosimeter . . . . .	23
3.2	Funktionen der Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit von Erdbeermarmelade. . . . .	27
3.3	Vergleich der gemessenen Viskosität und der berechneten Viskosität nach der Vereinheitlichung des Exponenten $n$ . . . . .	28
3.4	Aufgestellte Matrix zur Berechnung der Koeffizienten zur Berechnung der dynamischen Viskosität. . . . .	28
3.5	Durch das Lösen der Matrix berechnete Koeffizienten. . . . .	29
3.6	Angegebenes Nettogewicht, abgewogenes Brutto- und Tara- Gewicht und im Datenblatt angegebene Dichte für Wasser . . . . .	30
3.7	Drehzahl bei einem Arbeitspunkt von einer Schergeschwindigkeit von $100\text{ s}^{-1}$ . . . . .	32
3.8	Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit jenen des Experimentes zur Validierung. . . . .	35
5.1	Berechnungen der Geschwindigkeiten im Strömungskanal. . . . .	54
5.2	Verwendete Sensortypen und Messstellen. . . . .	58
5.3	Versuchskombinationen für die Validierung des Aufwärmvorganges. . . . .	59
5.4	Berechnete Funktionen für die Korrektur des Offsets der Temperatursensoren. . . . .	61
5.5	Versuchskombinationen für die Bestimmung der Fehlerbalken für das Experiment 3 in Tabelle 5.3. . . . .	65
5.6	Stoffwerte für Kartoffel spät . . . . .	68
5.7	Koeffizienten für die auf den Arbeitsbereich optimierten Funktionen von $\rho_{\text{Wasser}}$ , $\mu_{\text{Wasser}}$ und $c_{p, \text{Wasser}}$ . . . . .	70
5.8	Lagerungsbedingungen und Stoffeigenschaften von Kaltlagergütern . . . . .	72
6.1	$\Delta T$ der einzelnen Sensoren in $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	82

6.2	Literaturdaten für die Wärmeleitfähigkeit von Kartoffeln. . . . .	85
6.3	Experiment zur Bestimmung der Dichte von Kartoffeln. Massen in g, Volumen in ml und Dichte in $\text{kg/m}^3$ . . . . .	88
A.1	Messungen der Viskositätsänderung von Erdbeermarmelade beim Aufwärmvorgang 1ter Teil. . . . .	I
A.2	Messungen der Viskositätsänderung von Erdbeermarmelade beim Aufwärmvorgang 2ter Teil. . . . .	II
C.1	Geförderter Volumenstrom je nach eingestellter Pumpenleistung am Umlaufthermostat. . . . .	V
C.2	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $37\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $1,6\text{ l/min}$ . . . . .	VI
C.3	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $37\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $0,8\text{ l/min}$ . . . . .	VII
C.4	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $47\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $1,6\text{ l/min}$ . . . . .	VII
C.5	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $47\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $0,8\text{ l/min}$ . . . . .	VIII
C.6	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $23\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $1,6\text{ l/min}$ . . . . .	IX
C.7	Aufwärmvorgang im Strömungskanal, Fluidtemperatur = $23\text{ }^\circ\text{C}$ , Fluidgeschwindigkeit = $0,8\text{ l/min}$ . . . . .	X
C.8	Temperaturabgleich der für das Aufwärmexperiment verwendeten Sensoren. . . . .	X
C.9	Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang eines außen isolierten, quaderförmigen Kartoffelstückes. . . . .	XI
D.1	Daten der simulierten Aufwärmkurven für <i>Kartoffel süß</i> , <i>Kartoffel früh</i> und <i>Kartoffel spät</i> . . . . .	XVI
D.2	Verschiebung des kältesten Punktes zum Mittelpunkt des Würfels. . .	XVII
E.1	Benötigte Stoffwerte für die Simulation . . . . .	XVIII
E.2	Benötigte Stoffwerte für die Simulation . . . . .	XIX

## Verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
$A$	$\text{m}^2$	vom Wärmestrom durchflossene Fläche
$b$	$\text{m}$	Breite des Überfallwehrs
$c_p$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmekapazität
$d_i$	$\text{m}$	Rohrinnendurchmesser
$D$	$\text{s}^{-1}$	Schergeschwindigkeit
$g$	$\text{m s}^{-2}$	Schwerebeschleunigung auf der Erde
$h$	$\text{m}$	Höhe des Wasserspiegels über dem Wehr
$h_{\text{fus}}$	$\text{J kg}^{-1}$	Schmelzenthalpie
$KD$	-	Konstante für die Umrechnung von Schergeschwindigkeit auf die Drehzahl $n_{U/\text{min}}$
$l$	$\text{m}$	Schichtdicke
$l_R$	$\text{m}$	Länge der Rohrleitung
$m_i$	$\text{kg}$	Masse
$P$	$\text{W}$	Aufgenommene Leistung des Heizelements
$Q$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Abfluss
$\dot{Q}$	$\text{W}$	Wärmestrom
$r_{\text{Ruehrwerk}}$	$\text{m}$	Radius Rührwerkes
$R_a$	$\text{mm}$	Radius des Messrohres im Rotationsviskosimeters
$R_i$	$\text{mm}$	Radius des Messkörpers im Rotationsviskosimeters
$Re$	-	Reynoldszahl
$t$	$\text{s}$	Zeit
$T$	$\text{K}$	Temperatur
$u$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit
$u_{\text{Inlet}}$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit am Inlet des Strömungskanals
$U_{\text{Freistrah}}$	$\text{m s}^{-1}$	Freistrahlgeschwindigkeit
$U_{\text{Ruehrwerk}}$	$\text{min}^{-1}$	Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührwerkes
$\dot{V}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	durch die Pumpe des Umlaufthermostates geförderter Volumenstrom
$y^+$	-	dimensionslose Wanddistanz
$\Delta T$	$\text{K}/^\circ\text{C}$	Temperaturdifferenz
$\alpha_i$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Wärmeübergangszahl, Wärmeübergangskoeffizient
$\dot{\gamma}$	$\text{s}^{-1}$	Schergeschwindigkeit
$\delta$	-	Verhältnis von $R_a$ zu $R_i$
$\delta_s$	$\text{m}$	Länge der laminaren unteren Schicht

$\delta^+$	-	dimensionslose Grenzschichtdicke
$\kappa, \lambda_i$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_R$	-	Rohrreibungsbeiwert
$\mu$	-	Überfallbeiwert
$\mu_i$	-	Faktoren zur Berechnung des Überfallbeiwertes
$\nu_i, \nu$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	kinematische Viskosität
$\eta_i, \eta$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	dynamische Viskosität
$\rho_i$	$\text{kg m}^{-3}$	Dichte
$\tau$	$\text{N m}^{-2}$	Schub- oder Scherspannung
$\tau_W$	$\text{N m}^{-2}$	Wandschubspannung
$\Theta_{\min}$	Grad (Winkel)	minimaler Winkel zwischen den Begrenzungen einer Zelle
$\Theta_{\max}$	Grad (Winkel)	maximaler Winkel zwischen den Begrenzungen einer Zelle
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur in Grad Celsius

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Langform

---

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL-Zahl	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl auch Courant-Zahl
DEM	Diskrete Elemente Methode
Exp.	Experiment
Nr.	Nummer
v.l.n.r.	von links nach rechts

# Kapitel 1

## Einleitung und Aufgabenstellung

Die Einleitung soll einen Überblick über das Thema der Diplomarbeit geben. Dafür wird auf die Problemstellung hingewiesen und erläutert, warum diese Arbeit gemacht wurde. Es wird die Aufgabenstellung erläutert und auf die bereits vorhandene Literatur eingegangen, welche sich mit der CFD-Simulation von Pasteurisationsprozessen befasst.

### 1.1 Einleitung

Pasteurisationsprozesse sind in der Lebensmittelverarbeitung von großer Bedeutung für die Verlängerung der Haltbarkeit. Durch das kurzzeitige Erhitzen werden Keime und Bakterien abgetötet, wodurch sich das Verderben verzögert. In großen Industrieanlagen wird dabei das zu pasteurisierende Produkt in Rührkesseln über die Wand erhitzt. Damit die Temperaturverteilung gleichmäßig über den ganzen Querschnitt ist, muss sich das Rührwerk mit hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten bewegen. Das führt jedoch auch zu unerwünschten Effekten, wie der Zerkleinerung von Fruchtstücken durch die Turbulenzen im Fluid. Dies ist unerwünscht, da große Fruchtstücke in Fruchtjoghurts vom Kunden gewünscht werden. Aus diesem Grund soll das Verfahren verbessert werden, um möglichst viele große Fruchtstücke zu erhalten. Die numerische Strömungsmechanik (CFD) bietet sich an, um dieses Problem zu minimieren. Die Pasteurisationsanlage wird in Konstruktionsprogrammen nachgebildet, vernetzt und anschließend simuliert, ohne dass durch aufwendige Experimente Stillstandszeiten erzwungen werden. Diese Arbeit befasst sich mit einem Teilprozess dieser Simulation, nämlich mit der Überprüfung des implementierten Codes in dem CFD-Programm *OpenFoam* für die Berechnung der Schergeschwindigkeit und der Überprüfung der Simulation des Aufwärmvorganges.

Mit den verwendeten Open Source Programmen ist es zusätzlich möglich, selbst Codefragmente hinzuzufügen und somit die Berechnung auf einen spezifischen Fall zu optimieren. Dadurch kann in Zukunft bei der Planung der Geometrie ähnlicher Anlagen effizienter vorgegangen werden. Daher ist es möglich wesentliche Kosten im Projektbudget einzusparen, weil kostenintensive Versuche wegfallen. Mit Freeware Programmen spart man ebenso Kosten, da sie für jeden frei verfügbar sind.

Die Diplomarbeit wurde im Zuge eines internen Projektes mit der Firma *AGRANA Fruit Austria GmbH* erarbeitet, wobei das Ziel die Optimierung von Pasteurisationsanlagen im Werk Gleisdorf (Österreich) ist.

### 1.2 Aufgabenstellung

Die komplexe Simulation eines Pasteurisationsprozesses soll schrittweise gelöst werden. Ein Teilbereich dieser Lösung ist die Simulation der Scherspannung auf der Oberfläche von Fruchtstücken, welche in dieser Arbeit behandelt wird. Dafür soll ein vereinfachter Fall simuliert werden, in welchem zuerst ein und dann mehrere Fruchtstücke in einem Strömungskanal aufgewärmt werden (Abbildung 1.1). Das zu pasteurisierende Gut besteht dabei aus einer pseudoplastischen Flüssigkeit und einem in dieser Flüssigkeit befindlichen gefrorenen Feststoff. Für die Simulation soll vorerst der implementierte Code für die Berechnung der Schergeschwindigkeit auf seine Richtigkeit überprüft werden. Weiters muss die Simulation des Aufwärmvorgang und besonders des Auftauvorganges überprüft werden.

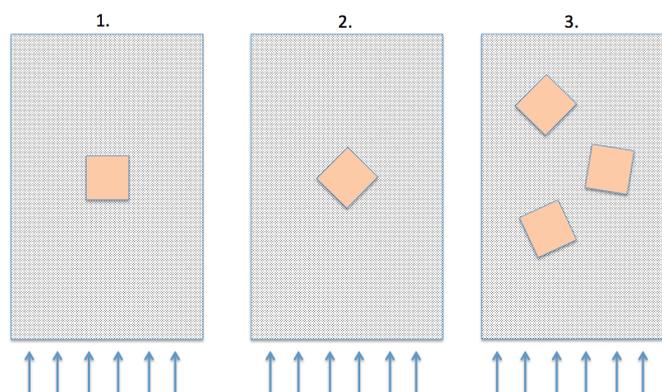


Abbildung 1.1: Ziel der Diplomarbeit: Die Simulation von einem gerade angeströmten Würfel (1), von einem schräg angeströmten Würfel (2) und von mehreren willkürlich angeströmten Würfel (3).

## 1.3 Literaturrecherche zu themenbezogenen CFD-Simulationen

Um zu eruieren welche wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich „CFD-Simulation von Pasteurisationsprozessen“ bereits durchgeführt wurden, wird zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt. Diese Literaturrecherche wurde vorerst in zwei Hauptbereiche unterteilt.

Diese Hauptbereiche sind:

- CFD-Simulation des Aufwärm-, Schmelz- und Abkühlvorgangs
- CFD-Simulationen von nichtnewtonschen Fluiden und Zweistoff-Gemischen

Für die Literaturrecherche wurden folgende Stichwörter verwendet: heat transfer, aseptic process, non Newtonian liquid, CFD Simulation.

### 1.3.1 Aufwärm-, Schmelz- und Abkühlvorgang

In Yanniotis (2007) wird ebenfalls ein Aufwärmprozess simuliert. Dieser unterscheidet sich jedoch wesentlich von dem in dieser Arbeit betrachteten Prozess, da sich bei diesem, das zu pasteurisierende Gut in einem Behälter mit Flüssigkeit befindet. Der Behälter wird von außen durch ein Medium beheizt, dieser gibt die Wärmeenergie an die Flüssigkeit ab und wärmt den Feststoff auf. Dafür wird ein Programm geschrieben, welches in der Aufheiz-, Halte- und Abkühlphase die Temperatur im Medium, in der Flüssigkeit, am Rand des Feststoffs und in dessen Mitte berechnet. Für diese Simulation wurden konstante Stoffwerte unter anderem für die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit verwendet.

Wie bei der meisten Literatur, welche zu diesem Themenbereich zu finden ist, wird auch hier stets die Biot-Zahl angegeben. Diese ist eine dimensionslose Kennzahl und wird wie in Gleichung (1.1) aus dem Wärmeübergangskoeffizienten an das Medium  $\alpha$ , der charakteristischen Länge  $L$  und der Wärmeleitfähigkeit des festen Körpers  $\lambda_s$  berechnet. Die Biot-Zahl variiert bei dieser Literaturstelle zwischen 1,048 und 40.

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_s} \quad (1.1)$$

In Dimou et al. (2011) wird ein Pasteurisationsprozess von Spargel, Oliven und Pfirsichen, welche sich wiederum wie bei Yanniotis2007 in einer Dose befinden, simuliert. In den Ergebnissen wird das Temperaturprofil bildlich in

verschiedenen Zeitschritten für die Aufwärm- und Abkühlphase dargestellt. In diesen Darstellungen ist die kälteste Zone gut ersichtlich.

Diese Literatur würde sich gut für die Validierung des Aufwärmvorgangs eignen, da alle verwendeten Stoffwerte angegeben sind. Da in dieser Arbeit jedoch auch die Schergeschwindigkeit und ein Auftauvorgang in einer Strömung simuliert werden sollen, eignet sich diese Literatur nicht als Validierungsfall.

In Kızıldağ et al. (2010) wurde ebenfalls ein Pasteurisationsprozess berechnet, es wurde jedoch das Programm *ANSYS V11* verwendet. Wie bei Yanniotis2007 und Dimou2011 wurde wiederum ein in einer Dose befindliches Lebensmittel pasteurisiert. Das Temperaturprofil und der zeitliche Verlauf der Temperatur, in der Mitte der Erbsen, wurde als Diagramm ausgegeben.

Die Literaturstelle Sun (2007) befasst sich ausschließlich mit der CFD-Simulation in der Lebensmittelherstellung. Dabei wird unter anderem auf die mathematischen Modelle eingegangen, welche für die Simulation verwendet werden. In Kapitel 11 wird ein kontinuierlichen Backprozesses mittels CFD simuliert. Dabei wird auf die CFD-Modellierung eingegangen. Diese befasst sich mitunter mit der Vereinfachung, dem Aufstellen der verwendeten physikalischen Gleichungen und der Modell-Validierung. In Kapitel 21 wird auf das sehr wichtige Thema Scale-Up eingegangen und wie CFD dafür verwendet werden kann.

### **Fazit:**

Es gibt einige Literaturquellen, welche sich mit der CFD-Simulation von Pasteurisationsprozessen beschäftigen. Literatur für einen Pasteurisationsprozess mit beinhaltenden Auftauvorgang in einer erzwungenen Strömung, ist nicht vorhanden. Vor allem wurde Literatur zur Pasteurisation von Lebensmitteln in Dosen mit einer Anfangstemperatur der Flüssigkeit und des Festoffs um 30 °C gefunden. Dabei wird die Dose von außen beheizt, wodurch die Flüssigkeit im Inneren der Dose, aufgrund des Dichteunterschiedes, zu strömen beginnt. Dadurch wird die aufgenommene Wärmeenergie rasch an das Lebensmittel übertragen, im Gegensatz zu der Erwärmung durch eine reine Wärmeleitung welche langsamer ist. Literatur von der Pasteurisierung von vorerst eingefrorenen Lebensmitteln, wobei das für die Wärmeübertragung zuständige Fluid gerührt wird, ist nicht vorhanden. Anhand dessen muss die Validierung des Solvers durch Experimente erfolgen, weil in diesem alle Bedingungen, die für die Validierung nötig sind, berücksichtigt werden.

### 1.3.2 Nichtnewtonsche Fluide und Zweistoffgemische

Theoretische Überlegungen zu der Strömungsmechanik einer fest-flüssig Lebensmittelströmung, wie sie auch in dieser Arbeit behandelt wird, werden in Lareo et al. (1997) behandelt. Dieses Paper gibt einen Überblick über kontinuierliche zweiphasige Lebensmittelströme. Ein großes Problem ist, dass viele Arbeiten zu diesem Thema nicht miteinander vergleichbar sind, da man stets die dimensionslose Kennzahl brauchen würde. Diese ist für den Vergleich von Ergebnissen von Versuchen mit z.B. verschiedenen Feststoffgrößen, in verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten, notwendig. Es macht zusätzlich einen Unterschied, ob sich ein einzelner Feststoff in der Strömung bewegt oder mehrere, da sich bei letzteren die Feststoffe gegenseitig beeinflussen und dadurch ein komplexeres Verhalten aufweisen. Die Literatur Lareo et al. (1997) ist für weitere Arbeiten zur Simulation eines Pasteurisationsprozesses mittels *Diskreter Elemente Methode* von großer Bedeutung. Bei dieser Simulation werden die Feststoffe durch die Strömung bewegt, somit müssen diese Effekte berücksichtigt werden.

# Kapitel 2

## Theorie

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Hintergründen des Pasteurisationsprozesses. Dazu gehört die geschichtliche Entwicklung des Prozesses als Einstieg in die Thematik, aber vor allem die theoretischen Hintergründe, welche für die Simulation wichtig sind. Dazu zählen Grundlagen der CFD-Simulation, der Berechnung der Schergeschwindigkeit und der Scherspannung, sowie die Theorie zur Wärmeleitfähigkeit von Stoffen.

### 2.1 Geschichtliches zum Pasteur Effekt

Die Pasteurisierung geht auf den französischen Chemiker Louis Pasteur (1822-1895) zurück, welcher erkannte, dass Lebensmittel die kurzfristig auf eine hohe Kerntemperatur (unter 100°C) erhitzt wurden, eine wesentlich höhere Lebensdauer haben, als die selben Produkte, welche keiner Temperaturbehandlung unterzogen wurden. Bei der Pasteurisierung werden die meisten hitzeempfindliche Mikroorganismen wie Hefe oder Schimmelpilze abgetötet, jedoch nicht alle, wodurch ein pasteurisiertes Produkt keimarm aber nicht keimfrei ist. Durch die schonendere Behandlung, im Vergleich mit der Sterilisation, ergeben sich jedoch wesentliche Vorteile wie jene, dass die Farbe, die Mineralstoffe, die Vitamine oder die Eiweiße nicht so stark beeinträchtigt werden. Die Pasteurisierung wird daher vor allem für kurzlebige Produkte, welche beim Verzehr noch relativ frisch sein sollen, verwendet. Zur Vorratslagerung ist und war dieser Prozess sehr wichtig, da Lebensmittel dadurch im Kühlschrank mehrere Tage gelagert werden können. Ohne diesen Schritt würden viele Produkte in wenigen Tagen durch zu hohe Keimbelastung nicht mehr als Nahrungsmittel geeignet sein. Bei Milch etwa, werden erst durch die Pasteurisierung die Milchsäurebakterien abgetötet. Frische Milch würde ansonsten sehr schnell sauer werden. Die Milch wird durch die kurzzeitige Erhitzung unter anderem auch leichter verträglich gemacht. Massholder (2018)

Der Pasteurisationsprozess läuft wie in den in Abbildung 2.1 gezeigten Phasen ab.

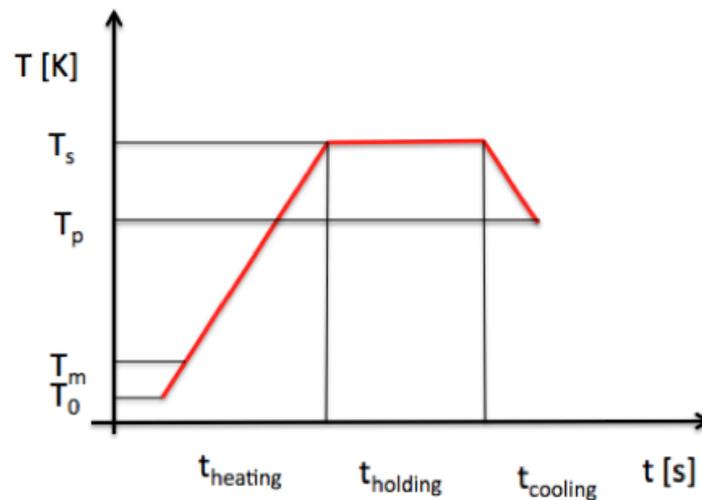


Abbildung 2.1: Schematischer Temperaturverlauf im zu pasteurisierenden Gut während des Pasteurisationsprozesses. Aufheizvorgang von der Anfangstemperatur  $T_0$  bis zur Haltetemperatur  $T_s$  in der Aufheizzeit  $t_{\text{heating}}$ . Halten der Temperatur bis die Pasteurisierung sichergestellt ist in der Haltezeit  $t_{\text{holding}}$ . Abkühlvorgang bis zur Abfülltemperatur  $T_p$  in der Abkühlzeit  $t_{\text{cooling}}$ .  $T_m$  stellt dabei die Schmelztemperatur des in der Flüssigkeit befindlichen Feststoffes dar.

Eine Literaturquelle, die sich umfangreich mit der sterilen Lebensmittelproduktion und Optimierung der Geometrie der Anlagen befasst, ist David (2013). Diese Literaturquelle ist sehr hilfreich, um tiefer in die Materie des Pasteurisierens einzutauchen. Sie verweist auf viele Literaturquellen, die sich ausgiebiger mit einzelnen Teilproblemen befassen.

Im auslaufenden 19. Jahrhundert wurde in der Medizin versucht Seuchen in den Griff zu bekommen, beziehungsweise zu verhindern. Dadurch entwickelte sich in der Medizin die Bakteriologie, welche sich insbesondere mit Mikroorganismen und deren Auswirkungen beschäftigt. Es stellte sich heraus, dass dieses Wissen auch für die Haltbarmachung von Lebensmittel nützlich ist. Rimbach et al. (2010).

Als zweites Verfahren gibt es in der Lebensmittelbranche die Sterilisation, welche Kerntemperaturen von über  $100\text{ °C}$  anstrebt. Meistens werden Lebensmittel sogar zwischen 15 und 20 Minuten auf Temperaturen von  $110\text{ °C}$  bis  $120\text{ °C}$  gebracht. Bei Konserven werden die Prozesszeiten bis zu einer Stunde erhöht, um das Produkt gänzlich keimfrei und somit jahrelang haltbar zu machen.

Massholder (2018)

## 2.2 CFD & Pasteurisierung

Um sicherzustellen, dass Produkte auch wirklich keimarm bzw. steril sind, bedient man sich auch der CFD Simulation von Pasteurisations- und Sterilisationsprozessen. Einerseits muss das Produkt gesundheitlich unbedenklich sein, um es verzehren zu können, weshalb es nur eine maximale Anzahl an Mikroorganismen aufweisen darf. Andererseits soll die Produktqualität nicht darunter leiden, damit das verarbeitete Produkt den Geschmack behält. Durch eine angepasste Simulation sollen daher verschiedene Punkte, wie etwa die Haltezeit beim Erreichen der Pasteurisationstemperatur, die Aufwärm- und Abkühlzeit, die Optimierung des Prozesses hinsichtlich der Wärmeübertragung, die Energieeffizienz, die Gestaltung der Geometrie und der Einbauten der Prozesseinheit, etc. optimiert werden. Bei der Simulation mittels CFD werden dabei die Gleichungen für die Massen-, Energie- und Impulsbilanz numerisch in finiten Volumen, welche durch das erstellte Gitter begrenzt werden, berechnet. Dadurch lässt sich der wärmste, als auch der kälteste Punkt im zu sterilisierenden bzw. zu pasteurisierenden Gut berechnen und durch Optimierung schneller erreichen. Dimou et al. (2011)

Bei dem hier betrachteten Prozess handelt es sich um einen Aufwärmprozess, bei dem in einem Rührkessel diverse Fruchtzubereitungen pasteurisiert werden. Das Ziel ist, die im Kochprozess hinzugefügten Fruchtstücke in ihrer Form so gut als möglich zu erhalten. Durch die Simulation der Scherspannung an der Oberfläche des Fruchtstückes soll die Geometrie des Rührwerkes, dahin optimiert werden, dass die mechanische Belastung des Fruchtstückes so gering wie möglich ist. Das Rührwerk benötigt hohe Umdrehungsgeschwindigkeiten, damit die Wärmeenergie der beheizten Wand des Rührkessels so schnell wie möglich für den Aufwärmvorgang, der sich im gesamten Rührkessel befindlichen Fruchtstücke, zur Verfügung steht. In einer Folgearbeit könnte nach einem Optimum dieser Umdrehungsgeschwindigkeit gesucht werden, um dieses Ziel zu erreichen.

## 2.3 Scherspannung und Schergeschwindigkeit

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist, die an einem Festkörper angreifende Scherspannung, welche von einer pseudoplastischen Flüssigkeit ausgeübt wird, computerunterstützt berechnen zu lassen. Daher wird im Folgenden näher auf die Scherspannung eingegangen. Es ist wichtig, die theoretischen Hintergründe und Definitionen dieser genauestens zu verstehen.

In Kümmel (2007) findet man folgende wichtige Definitionen zur Scherspannung:

Abbildung 2.2 stellt eine reibungsbehaftete, ebene Strömung parallel zur x-Achse dar, wobei die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand zur Abszisse zunimmt. Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Fluids auf der Ober- und Unterseite des Feststoffes und der Haftung der Flüssigkeit in der Grenzzone, wirkt auf diesen eine Scherspannung.

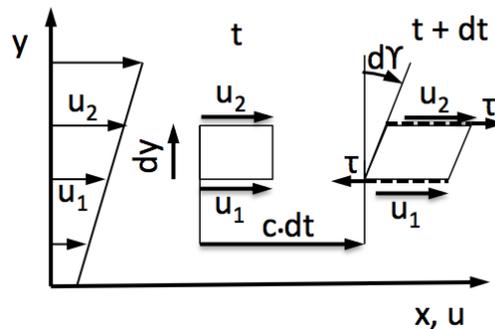


Abbildung 2.2: Verformung eines Fluidelementes bei ebener, laminarer Scherströmung (Skizze nach Kümmel (2007))

Weiters heißt es, dass die dynamische Viskosität  $\eta$  dem Widerstand des Fluidelements, gegenüber der Verformung durch die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ , entgegensetzt. Zu seiner Überwindung sind die äußeren Schubspannungen erforderlich. Bei der Mehrzahl der Fluide gilt das auf Newton zurückgehende Gesetz, welches in Gleichung (2.1) mathematisch formuliert ist.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Die Scherspannung ist somit bei newtonschen Fluiden das Produkt aus dynamischer Viskosität  $\eta$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ .

Die Schergeschwindigkeit ist wiederum die Ableitung von der Geschwindigkeit  $u$ , nach dem Weg  $y$  (Gleichung (2.2)).

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

Die dynamische Viskosität nimmt bei Flüssigkeiten häufig mit steigender Temperatur ab, da die gegenseitigen Bindungen der Moleküle gelockert werden.

Wie Anfangs erwähnt wird in dieser Arbeit jedoch eine pseudoplastische Flüssigkeit untersucht, welche zu einer zusätzlichen Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von der Schergeschwindigkeit führt. Somit ergibt sich hierfür Gleichung (2.3).

$$\tau = \eta(T, \dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Als Beispiel sieht man diese Abhängigkeit bei der in dieser Arbeit gemessenen dynamischen Viskosität von Erdbeermarmelade mit der Temperatur von 30 °C in Abbildung 2.3.

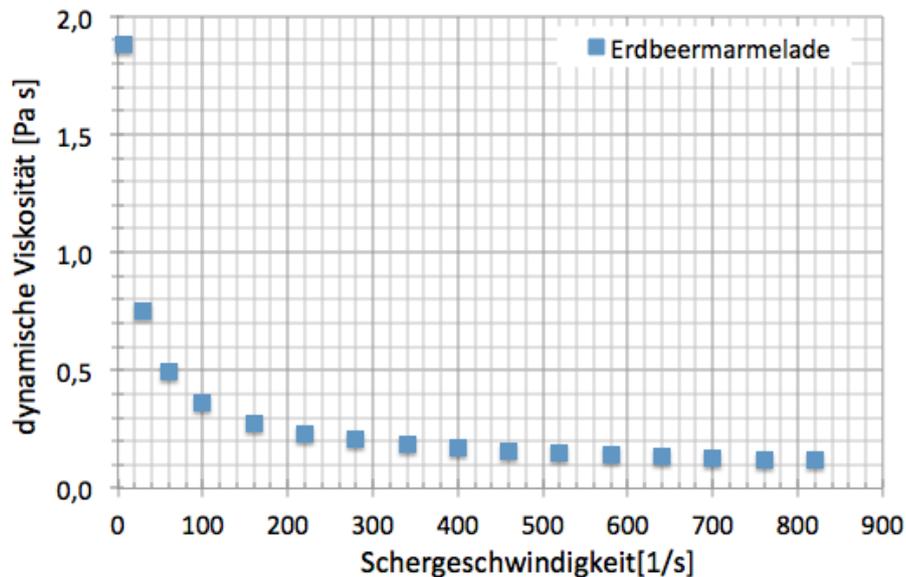


Abbildung 2.3: Zusätzliche Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von der Schergeschwindigkeit bei gleicher Temperatur. Daten siehe Anhang A, Bereich 30 °C.

## 2.4 Auftauvorgang in der CFD-Simulation

Die Stoffeigenschaften sind dabei einerseits vom gewählten Stoff abhängig, andererseits auch von der Temperatur, welche im betrachteten Berechnungsvolumen herrscht. Die Temperatur ist jedoch bis zum vollständigen Auftauvorgang von der Oberfläche bis zur Mitte des aufzutauenden Gutes sehr unterschiedlich. Daher ergibt sich das Problem, dass auch die Stoffeigenschaften sehr unterschiedlich sind. Weil davon auszugehen ist, dass die Festigkeit des Feststoffs mit steigender Temperatur sinkt, kann die Durchschnittstemperatur in einer definierten Randzone, als Anhaltswert für die Berechnung der Festigkeit des

Fruchstückes angenommen werden.

Für die Simulation des Auftauvorganges sind folgende Stoffwerte nötig:

- der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  in  $W/(m^2 \cdot K)$
- die spezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in  $W/(m \cdot K)$
- die spezifische Schmelzenthalpie  $h_f$  in  $J/kg$
- die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  in  $J/(kg \cdot K)$ .

Bis auf den Wärmeübergangskoeffizienten müssen alle Stoffwerte entweder in der Literatur gefunden werden, oder durch Experimente bestimmt werden. Der Wert des Wärmeübergangskoeffizienten wird durch *OpenFOAM* anhand der Wärmeleitung und der Konvektion berechnet und wird daher nicht benötigt.

Ein besonders kritischer Bereich bei der Simulation dieses Pasteurisationsprozesses, mit vorerst eingefrorenen Fruchstückchen, ist der Schmelzvorgang. Dieser ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt, weil die Schmelzfront wesentlich langsamer in den Körper wandert, als sich das am Körper vorbei bewegende Fluid bewegt. Da dieser Prozess nicht in dem verwendeten Solver *chtMultiRegionFoam* berechnet werden kann, wird die Schmelzenthalpie in eine virtuelle  $c_p$ -Funktion umgerechnet. Die Schmelzenthalpie wird auf einen Temperaturbereich rund um die Schmelztemperatur verteilt. Daraus ergibt sich der virtuelle  $c_p$ -Wert (Gleichung (2.4)) durch Division der spezifischen Schmelzenthalpie  $h_f$  durch die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ .  $\Delta T$  ist dabei der Betrag der Differenz jener Temperatur, bei welcher das Schmelzen eintritt, und jener, bei welcher der Schmelzvorgang abgeschlossen ist (Gleichung (2.5)).

$$c_{p \text{ virtuell}} = \frac{h_f}{\Delta T} \quad (2.4)$$

$$\Delta T = |T_{\text{BeginnSchmelzen}} - T_{\text{EndeSchmelzen}}| \quad (2.5)$$

Der  $c_p$ -Wert kann durch Anpassung in einen kontinuierlichen Verlauf überführt werden, welcher sich über mehrere Grenztemperaturen erstreckt (Abbildung 2.4). Die Fläche unter der Kurve muss dabei der spezifischen Schmelzenthalpie des jeweiligen Stoffes, addiert mit den Werten für die spezifischen Wärmekapazitäten vor dem Gefrieren, also vom Startpunkt der Glockenfunktion bis zum Schmelzpunkt, und nach dem Schmelzen, also vom Schmelzpunkt bis zum Ende der

Glockenfunktion, entsprechen (siehe Gleichung (2.6) mit der Abhängigkeit in Gleichung (2.7)).

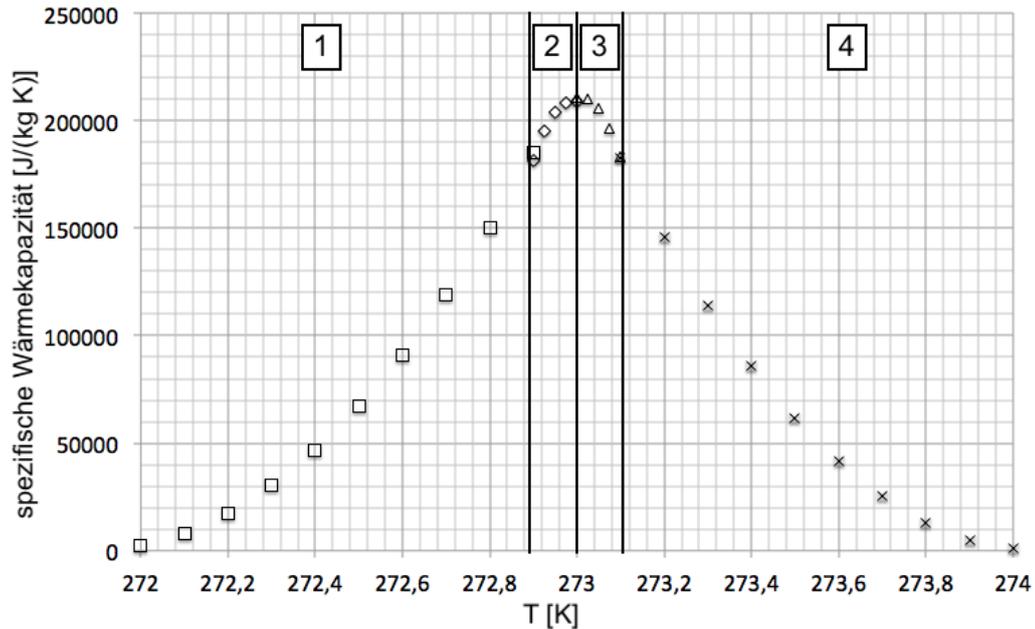


Abbildung 2.4: Kontinuierlicher Verlauf der  $c_p$ -Funktion beim Schmelzvorgang mit den Zonen (1), (2), (3) und (4) in welchen jeweils eine Funktion für den Verlauf der  $c_p$ - Funktion definiert werden muss, welche aus einem bis maximal acht Koeffizienten besteht.

$$h_{\text{spezifischSchmelzen}} = \sum_{n=1}^{N=4} \left[ \int_a^b f(c_p) dT. \right] + c_{p, < 0^\circ\text{C}} \cdot |T_{\text{Beginn}} - T_{0^\circ\text{C}}| + c_{p, > 0^\circ\text{C}} \cdot |T_{0^\circ\text{C}} - T_{\text{Ende}}| \quad (2.6)$$

$$c_p = f\{T\} \quad (2.7)$$

Diese Methode führte nicht zum Ziel (siehe Kapitel 4). Ab dem Erreichen der Schmelztemperatur verharrte der Körper in dieser. Der Solver hat Probleme mit dem Lösen der Funktion. Die erfolgreiche Berechnung wurde mit einer Stufenfunktion der Schmelzenthalpie erreicht (siehe Kapitel 5 und 6).

## 2.5 Wärmeleitfähigkeit

Der Wärmetransport kann auf drei verschiedene Arten vonstatten gehen, durch Konvektion, durch Wärmestrahlung und durch Wärmeleitung. Zur Berechnung

der Wärmeleitung benötigt man die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , welche eine Funktion des Wärmestroms  $\dot{Q}$ , der von dem Wärmestrom durchflossenen Fläche  $A$ , der Schichtdicke  $l$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist (siehe Gleichung (2.8)). Kurzweil et al. (2009)

$$\lambda = \frac{\dot{Q}l}{A\Delta T} \quad (2.8)$$

Typische Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind z.B. für Luft bei 0 °C 0,02418 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, für Wasser bei 0,01 °C 0,562 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> und Silber bei 20 °C 418,7 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Kurzweil et al. (2009)

Die Wärmeleitfähigkeit besitzt bei einer Phasenänderung eine Sprungstelle, wie in Abbildung 2.5 ersichtlich.

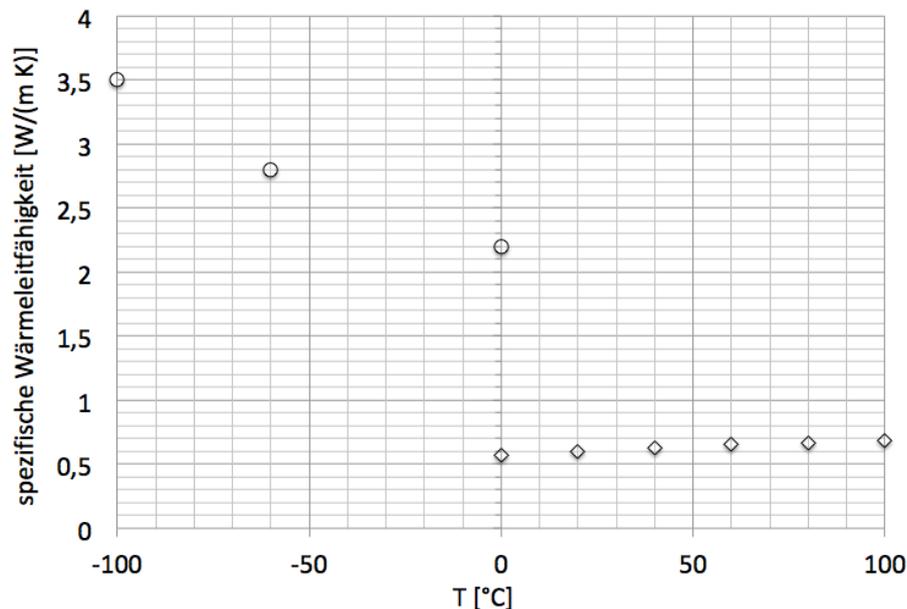


Abbildung 2.5: Spezifische Wärmeleitfähigkeit von Eis und Wasser im Arbeitsbereich.

## 2.6 Vorgehensweise für die CFD-Simulation

Eine CFD Simulation lässt sich grob in drei aufeinander aufbauende Bereiche einteilen. Für unterschiedliche Aufgaben weisen verschiedene Programme Vor- und Nachteile auf. Einen Überblick über die verwendeten Programme gibt Abbildung 2.6.

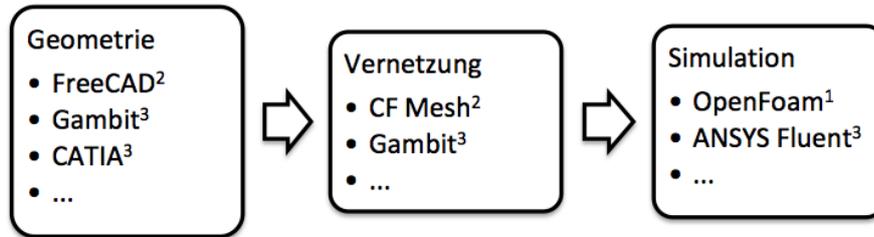


Abbildung 2.6: Schritte zur CFD Simulation und Beispiele von verwendeten Programmen; 1 Open Source & Freeware, 2 Freeware, 3 kommerzielle Software

Open Source Programme weisen den wesentlichen Vorteil auf, dass der Code verändert und somit auf verschiedene Aufgabenstellungen optimiert werden kann. Dies wurde in dieser Arbeit beim Simulationsprogramm *OpenFoam* durchgeführt.

### 2.6.1 Geometrie

Die Geometrie kann mit üblichen CAD-Programmen, wie etwa *CATIA*, *SolidWorks*, *FreeCAD*, *etc.* erstellt werden, muss aber dann nachträglich durch andere Programme vernetzt werden oder sie kann durch CAD-Programme, mit inkludierter Möglichkeit zur Vernetzung, wie etwa *Gambit* konstruiert werden.

### 2.6.2 Vernetzung

Bei der Vernetzung muss auf mehrere essentielle Dinge geachtet werden. Diese können anhand der Physik nötig sein, wie etwa bei der dimensionslosen Wanddistanz, oder sie können für die Berechnung nötig sein, wie etwa bei der Gitterqualität.

#### **y+, dimensionslose Wanddistanz**

An einer Wand herrscht durch die Haftbedingung die Geschwindigkeit  $u_{\text{Wand}} = 0$  m/s, danach beginnt bei turbulenten Strömungen eine Grenzschicht  $\delta^+$ , welche von der Geschwindigkeit 0 m/s an der Wand bis zu jenem Bereich geht, bei welchem die Geschwindigkeit des Freistrahls 99% von  $u_\infty$  erreicht hat. Die Grenzschicht  $\delta$  unterteilt sich wiederum in drei Bereiche, der laminaren unteren Schicht  $\delta_s$ , welche durch die Haftbedingung der Wand Gleichung (2.9) definiert ist, einer Pufferschicht in der weder eine laminare, noch ein turbulente Strömung herrscht und der gänzlich turbulenten Zone, in der die Geschwindigkeit jedoch noch nicht 99% der Freistrahlgeschwindigkeit erreicht hat. Moore et al. (2017)

$$\delta_s \propto \mu \frac{1}{U_\infty} \quad (2.9)$$

Um abschätzen zu können, wie fein das Gitter bei Randzonen  $y$  sein muss, bedient man sich in der CFD der Berechnung über  $y^+$  (siehe Gleichung (2.10) bis Gleichung (2.14)). Dabei sollte die Zahl der Zellen beim Vernetzen der Geometrie nicht unter 15 im Bereich von  $\delta_+$  liegen. Besser ist es wenn in der Tiefe ca. 20 Zellen liegen. Da es sich jedoch in dieser Arbeit um eine laminare Strömung handelt, mussten diese Zahlen nicht eingehalten werden. Moore et al. (2017)

$$Re = \frac{\rho U_{\text{Freistrahl}} L_{\text{Grenzschicht}}}{\mu} \quad (2.10)$$

$$C_f = [2 \log_{10} Re_x - 0,65]^{-2,3} \text{ mit } Re_x < 10^9 \quad (2.11)$$

$$\tau_W = C_f \frac{1}{2} \rho U_{\text{Freistrahl}}^2 \quad (2.12)$$

$$u_* = \sqrt[2]{\frac{\tau_W}{\rho}} \quad (2.13)$$

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u_*} \quad (2.14)$$

Für die dimensionslose Grenzschichtdicke  $\delta^+$  gilt im Umkehrschluss zu Willinger (2011),  $\delta^+ \approx 10 \cdot y^+$ .

### Gitterqualität

Bei der Erstellung der Geometrie und der nachfolgenden Vernetzung ist es wichtig, dass darauf geachtet wird, dass die Gitterqualität gut genug ist, um Fehler bei der Berechnung selbst zu minimieren. Einige Methoden, wie diese überprüft werden kann, werden in Bakker (2006) angesprochen. Als Beispiele werden die Dichte des Gitters, die Form des Volumens, das vernetzt werden soll, das Verhältnis der Zellenlänge zu jener angrenzender Zellen und die sogenannte Skewness genannt. Diese beschreibt die Verzerrung der Fläche, beziehungsweise des Volumenelements von der idealen Form des Quadrates bzw. des Würfels.

Wenn die Zellen ein hexaedrisches Volumen aufweisen, wird die Berechnung exakter ausgeführt als z.B. bei tetraedischen Volumina. Es ist auch sehr wichtig, dass die Zellen normal angeströmt werden, da es ansonsten ebenfalls zu

Berechnungsfehlern kommen kann oder zu einem langsamen Konvergieren. Die Skewness ist ein Maß für die Verzerrung einer Zelle. Diese sollte möglichst klein sein, um gute Ergebnisse zu erzielen. Die Skewness eines Quadrates kann wie in Gleichung (2.15) berechnet werden. Bakker (2006)

$$Skewness(Quadrat) = \max \left[ \frac{\Theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \Theta_{min}}{90} \right] \quad (2.15)$$

Hierbei geben  $\Theta_{max}$  bzw.  $\Theta_{min}$  den maximalen bzw. minimalen Winkel zwischen den Begrenzungen der Zelle an.

In *Paraview* kann man die Skewness mit der Funktion *Range Global Control/Examine Mesh* kontrollieren. Durch das Verwenden von *Lower* und *Upper* kann man sich schlechte Bereiche spezifisch anzeigen lassen und auch wie viele Zellen diesen Bereich betreffen. Die Skewness sollte so niedrig wie möglich sein. Bakker (2006) gibt dafür an dass hexaedrische und quadratische Zellen eine Skewness von 0,85 nicht erreichen soll, weiters gibt er einen ungefähren Richtwert für die Meshqualität in Tabelle 2.1 an. Sollte durch die automatische Erstellung des Meshes keine ausreichende Skewness erzielt werden, muss man eventuell durch internal Faces, also durch das Zerteilen der Geometrie in mehrere einzelne Geometrien die eine bessere Aufteilung versprechen, jene verbessern. In Kapitel 5 musste dieser Trick eingesetzt werden, um vom runden Einlassstutzen, auf den eckigen Querschnitt des Würfels zu kommen.

Tabelle 2.1: Zellenqualität anhand der Skewness

Skewness Wert	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-0,95	0,95-0,99	0,99-1
Zellenqualität	ausgezeichnet	gut	akzeptabel	schlecht	spanförmig	degeneriert

Um Zellen zu sparen und somit die Berechnung nicht unnötig zu verlangsamen, gibt Bakker (2006) auch eine Hilfestellung wie das maximale Längenverhältnis Gleichung (2.16) von aufeinanderfolgenden Zellen sein darf.

$$\frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \leq 1,2 \quad (2.16)$$

### 2.6.3 Simulation

Die Simulation wurde mit dem Freeware und Open Source Programm *OpenFOAM Version 4.1* durchgeführt. In weiterer Folge beziehen sich alle Erwähnungen von *OpenFOAM* auf diese Version. Bei dem verwendeten Solver handelt es sich um den *myChtMultiRegionFoam* Solver. Da *OpenFOAM* ein Open

Source Programm ist, kann man den Code selbstständig verändern und die beinhalteten Formeln für den jeweiligen Fall optimieren, beziehungsweise neue Formeln hinzufügen. Deshalb wurde der bereits bestehende `chtMultiRegionFoam` Solver mit der Berechnungsmethoden der Schergeschwindigkeit erweitert (siehe Abbildung 2.7). Dieser Code wurde durch Harsfalvi (2017) erstellt. Im Postprocessing Tool beim Dropdownmenü wird nun beim Anklicken von *shearRate* die Schergeschwindigkeit angezeigt. Der neue Solver wurde auf *myChtMultiRegionFoam* umbenannt. Nun wird auch die Scherrate berechnet, welche wiederum für die Berechnung der Scherspannung in *Paraview* benötigt wird. Dadurch kann die Scherspannung, welche auf das Fruchstück wirkt, ausgegeben werden.

```
Info<< "    Adding to shearRate\n" << endl;
shearRateFluid.set
(
    i,
    new volScalarField
    (
        IObject
        (
            "shearRate",
            runTime.timeName(),
            fluidRegions[i],
            IObject::MUST_READ,
            IObject::AUTO_WRITE
        ),
        Foam::sqrt(2.0)*Foam::mag(Foam::symm(Foam::fvc::grad(UFluid[i])))
    )
);
```

Abbildung 2.7: Hinzugefügter Code zur Berechnung der Schergeschwindigkeit. Dieser Code wurde von meinem Kollegen Zsolt Harsfalvi (siehe Harsfalvi (2017)) erstellt.

Die Besonderheiten des `chtMultiRegionFoam` Solvers sind, dass man mehrere verschiedene Gebiete miteinander koppeln kann und physikalische Größen, wie zum Beispiel die Wärmeenergie von einem Gebiet, in diesem Fall dem pseudoplastischen Fluid, auf das andere Gebiet, in diesem Fall das Fruchstück, übertragen kann.

Die Einheiten müssen in *OpenFOAM* stets in SI-Einheiten angegeben werden. Zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit gezeigten Codes, zeigt Tabelle 2.2 in welcher Reihenfolge diese aufgelistet sind.

Tabelle 2.2: Reihenfolge der Einheiten, wie sie in *OpenFOAM*-Files eingegeben werden müssen (Greenshields (2017)).

Basisgröße	Masse	Länge	Zeit	Temperatur	Stoffmenge	Stromstärke	Lichtstärke
Einheitenzeichen	kg	m	s	K	mol	A	cd

Als Beispiel zur leichteren Verständlichkeit, wird die Darstellung der Kraft  $F$ , in Newton in Tabelle 2.3 dargestellt, welche sich aus den SI-Einheiten

$$1N = 1 \frac{kg}{ms^2} \quad (2.17)$$

zusammensetzt:

Tabelle 2.3: Beschreiben der Einheit der Kraft in *OpenFOAM*.

$$[1 \ -1 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

### Grundsätzlicher Aufbau eines Cases in *OpenFOAM*

In *OpenFOAM* ist der Aufbau eines Cases stets ähnlich. In der ersten Case- Ebene (Abbildung 2.8) befinden sich der 0 Ordner, welcher für jeden Zeitschritt alle berechneten Werte beinhaltet, der constant Ordner, auf den die in 0 berechneten Größen basieren und der System Ordner, welcher grundsätzliche Einstellungen, wie die Definition des *writeInterval*, also wie oft Zeitschritte geschrieben werden sollen, oder auch die CFL Zahl beinhaltet, auf die in Abschnitt 2.7 eingegangen wird. In dieser Ebene können auch Files platziert werden, in welchen die Befehle aufgelistet werden, welche abgearbeitet werden sollen. Als Beispiel können die Befehle, welche normalerweise im Linux Editor eingegeben werden, wie etwa das Starten von *OpenFOAM*, die Skalierung einer Geometrie oder etwa das Starten untereinander aufgelistet werden.

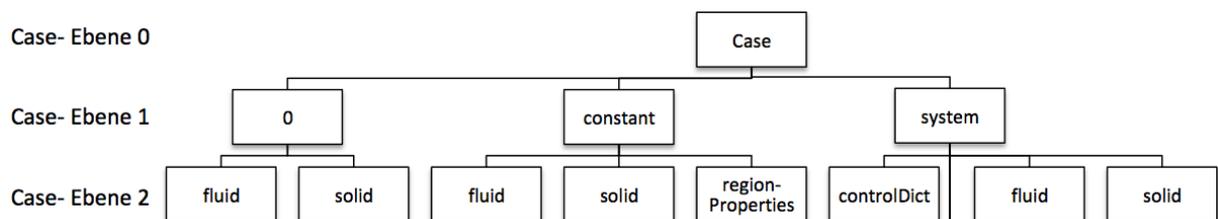


Abbildung 2.8: Grundsätzlicher Aufbau eines *OpenFOAM* Cases.

## 2.7 Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl)

Die CFL- Zahl wird in *OpenFOAM* als *maxCo* in *./System/controlDict* benötigt.

**In der Literatur Laurien and Oertel (jr.) & Balduzzi et al. (2016) heißt es dazu jeweils sinngemäß:**

Die Gleichung (2.18) stellt eine Stabilitätsbedingung dar und nennt man CFL-Bedingung. Mit einem gegebenen  $\Delta x$ , welches der Zellenweite entspricht, stellt diese Gleichung daher eine Bedingung für die Zeitschrittweite dar. Die CFL-Zahl beschreibt das maximal zulässige Verhältnis von der Ausbreitung von Störungen in der Strömung  $|u| + a_s$ , zur numerischen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $\Delta x / \Delta t$ . Die Störungen breiten sich relativ zum Fluid mit Schallgeschwindigkeit aus. Laurien and Oertel (jr.)

$$\Delta t < CFL \frac{\Delta x}{|u| + a_s} \quad (2.18)$$

Die numerische Lösung wird mit steigender CFL- Zahl instabiler. Sie drückt das Verhältnis zwischen dem temporären Zeitschritt  $\Delta t$  und der benötigten Zeit, welche ein Fluidpartikel mit der Geschwindigkeit  $u$  benötigt, um die Zelle mit der Dimension  $\Delta x$  zu durchqueren, aus (Gleichung (2.19)). Balduzzi et al. (2016)

$$Co = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.19)$$

## 2.8 Literaturrecherche der Stoffdaten

Es muss eine Literaturrecherche von Stoffdaten durchgeführt werden, von Stoffen, welche für den Pasteurisationsprozess in Frage kommen. Dabei ist die Vollständigkeit der Literaturdaten essentiell, weil sonst für die Simulation Daten fehlen. Diese müssen dann durch Stoffe, die sich ähnlich verhalten, angenähert werden, was jedoch Abweichungen vom eigentlichen Stoff bei der Simulation ergibt.

### 2.8.1 Maximale Scherspannung von Obst

In der gefundenen Literatur Kraft (2012) wurde die maximale Scherspannung von verschiedenen Obstsorten wie Äpfeln, Brombeeren und Pfirsichen untersucht. Dazu wurden Würfel mit verschiedenen Agar- Konzentrationen gefertigt und

mit verschiedenen Früchten bezüglich ihrer Stoffeigenschaften verglichen. Agar wurde verwendet, weil die Stoffeigenschaften gleich bleiben und sich nicht wie bei Früchten, durch das Verderben, ändern. Diese in Kraft (2012) gefundenen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Agar-Konzentrationen zeigen auf, wie auch in dem betrachteten Pasteurisationsprozess experimentell nachgewiesen werden kann, ob Fruchtstücke beschädigt werden oder nicht. Zu bezweifeln ist jedoch, dass die hierbei ermittelten Agar-Konzentrationen für eine bestimmte Obstsorte, auch für höhere Temperaturen passend sind.

Durch diese Literaturquelle konnten maximale Normalspannungen von Äpfeln ( $0,05 \text{ N/mm}^2 \cong 5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ), Brombeeren ( $0,02 \text{ N/mm}^2 \cong 2 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ) und Pfirsichen ( $0,04 \text{ N/mm}^2 \cong 4 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ) ausgemacht werden. Da es jedoch nicht den Einheitsapfel, die Einheitsbrombeere und den Einheitspfirsich gibt, sind diese Werte nicht als absolute Werte zu verstehen, sondern als Richtwerte anzunehmen. In der Auswertung der Simulation muss darauf geachtet werden, dass die simulierten Scherspannungen wesentlich höher sind, als die in der Literatur gefundenen. Dies ist bedingt durch die starre Lage des Würfels in der Simulation. In der Realität würde sich dieser mit der Strömung mitbewegen und drehen. Dadurch würde sich die auf den Körper wirkende Scherspannung minimieren und nur einen Bruchteil von der simulierten Scherspannung betragen. Deshalb ist die in den Simulationen eingestellte Fluidgeschwindigkeit als Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Feststoff zu verstehen.

### **2.8.2 Stoffdaten von Kaltlagergütern**

In Kühn (2018) sind verschiedene Kaltlagergüter und deren Stoffwerte aufgelistet, wie etwa die Lagertemperatur, die latente Wärmekapazität, die Feuchtigkeitsausscheidung, dem Wassergehalt, den spezifischen Wärmekapazitäten vor und nach dem Gefrieren etc.. Bei den spezifischen Wärmekapazitäten vor und nach dem Gefrieren ist zu beachten, dass sich die Stoffwerte dieses Datenblattes auf jene zum Zeitpunkt des Einfrierens beziehen und nicht auf jene nach dem Auftauen. Daher ist eine Abweichung zu den Stoffwerten des Auftauprozesses möglich.

# Kapitel 3

## Überprüfung der Simulation der Schergeschwindigkeit

Die Schergeschwindigkeit wird in dem verwendeten `multiregion` Solver `chtMultiRegionFoam` nicht berechnet. Dieser Solver wird jedoch als Grundgerüst verwendet, da sich dieser wegen seiner Ähnlichkeit zum betrachteten Fall, der berechnet werden soll, anbietet (siehe Abschnitt 2.6.3). Aufgrund der Implementierung des Codes der Schergeschwindigkeit muss die Simulation überprüft werden. Der Code für die Simulation der Schergeschwindigkeit, wurde von Dipl.-Ing. Zsolt Harsfalvi (Harsfalvi (2017)) hinzugefügt. Für die Überprüfung wird der Zusammenhang zwischen der Schergeschwindigkeit, der Temperatur und der Scherspannung von Erdbeermarmelade experimentell gemessen und durch eine Funktion dargestellt. Anschließend wird das Experiment in einer Simulation berechnet, in welcher die Funktion der Schergeschwindigkeit in einem File implementiert wurde.

### 3.1 Experimente zur Bestimmung der Schergeschwindigkeit

Dieses Unterkapitel ist in drei Teile gegliedert. Die Vorbereitung, in der grundsätzlich auf die Messmethode zur Bestimmung der dynamischen Viskosität und der Scherspannung eingegangen wird, die Durchführung des Experimentes mit den Ergebnissen und die Nachbereitung des Experimentes, in welcher die Ergebnisse für die Verwendung in `OpenFOAM` aufbereitet werden.

### 3.1.1 Vorbereitung

Vor der Durchführung des Experimentes müssen jene Parameter entschieden werden, welche das Experiment erfüllen muss, um verwertbare Ergebnisse zu liefern.

Bei der das Fruchtstück umgebenden Flüssigkeit handelt es sich um eine Pektin-Stärke Mischung, welche ein pseudoplastisches Fluid darstellt. Hier muss ein Fluid mit ähnlichen Eigenschaften verwendet werden, damit vom späteren Anwender des Solvers, bei der Einspeisung mit den jeweiligen Stoffdaten, korrekt simuliert wird. Um ähnliche Eigenschaften zu erzielen und somit die Funktion anzupassen, muss daher ebenfalls ein pseudoplastisches Fluid verwendet werden.

Weiters müssen folgende Parameter gemessen werden:

- Es muss der Zusammenhang zwischen Scherspannung, Schergeschwindigkeit und Temperatur des Fluids gemessen werden, damit dieser durch eine Funktion beschrieben werden kann, welche im berechneten Case implementiert wird.
- Die Temperatur muss im Messbereich zwischen Raumtemperatur und rund 80 °C variiert werden können. Besser wäre, wenn die Temperatur bis zur Temperatur des eingefrorenen Feststoffes abgesenkt werden kann, da damit zu rechnen ist, dass die Flüssigkeit in der Grenzschicht zum Feststoff eine niedrigere Temperatur erreichen wird. Da dies jedoch mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten nicht erreicht werden kann, wird der Fehler, der sich durch die Extrapolation der ermittelten Funktion, in einem nicht gemessenen Bereich ergibt, in Kauf genommen. Beim eingefrorenen Fruchtwürfel wird jedoch angenommen, dass die sich ergebende Scherspannung, durch die weitaus höhere Festigkeit im eingefrorenen Zustand, irrelevant ist.
- Das Messgerät muss in der Lage sein die Schergeschwindigkeit bei höherer Temperatur aufzunehmen. Da erwartet wird, dass die Schergeschwindigkeit bei Erwärmung stark sinkt und sich daher der gesamte Messbereich über einen großen Bereich erstreckt, ist dieser Punkt der Fragestellung nicht trivial.

### 3.1.2 Messungen der Schergeschwindigkeiten

Für die Messung der Viskosität wurde das *Rheomat R 180* von *proRheo* verwendet. Als pseudoplastische Flüssigkeit wurde *Bio-Erdbeer-Konfitüre fein passiert* von *Spar Natur pur* verwendet. Bei der Messung wird mit sehr starken Viskositätsänderungen gerechnet, deshalb ist ein großer Messbereich von Vorteil. Dafür eignet sich das DIN Messsystem Nr. 33 (Tabelle 3.1) von den vorhandenen Messsystemen am

### KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT

---

besten, weil es den größten zur Verfügung stehenden Messbereich abdeckt.

*Hinweis: Der Messbereich ist für den betrachteten Pasteurisationsprozess nicht ausreichend, da in diesem weit höhere Scherspannungen und Schergeschwindigkeiten auftreten. Mit einem Messsystem, welches in der Lage ist, größere Scherspannungen bzw. höhere Schergeschwindigkeiten zu messen (das verwendete Messsystem ist hier begrenzt wie in Abbildung 3.2 ersichtlich,  $\tau_{max} \sim 100 \text{ N/mm}^2$  und  $\gamma_{max} = 1200 \text{ s}^{-1}$ ), können die Prozessparametern nachgestellt werden, die erweiterten Kurven ermittelt werden und analog zu den hier beschriebenen Verfahren ausgewertet werden.*

Tabelle 3.1: Verfügbare Messsysteme für das Rotationsviskosimeter Rheomat R 180 von proRheo (proRheo (2009)). Folgende koaxiale, zylindrische Messsysteme entsprechen DIN- Norm 53018/ 53019.

Messsystem Nr.	Messrohr		Messkörper		Schergeschwindigkeitsbereich [s <sup>-1</sup> ]	Viskositätsbereich [Pa·s]	Einfüllvolumen [ml]
	Ø mm	Nr.	Ø mm	Nr.			
11	32,54	1	30	1	6,5 – 1291	0,005 – 19	Ca. 24
22	26,03	2	24	2	6,5 – 1291	0,010 – 38	Ca. 16
33	15,18	3	14	3	6,5 - 1291	0,050 – 191	Ca. 9
19	32,54		31,5	9	16,1 – 3230	0,002 – 7	Ca. 18

Die Temperatur variiert in einem Bereich von 23 °C (Temperatur im Labor) bis 80 °C. Ein Umlaufthermostat eignet sich dabei für die Temperaturregelung. Durch den im Rotationsviskosimeter eingebauten Temperatursensor, kann die Temperatur überprüft werden.

Nachfolgend sieht man in Abbildung 3.1 den für die Messung verwendeten Aufbau.



Abbildung 3.1: Das Rotationsviskosimeter mit dem DIN Messsystem 33 wurde dabei in das Vorratsbecken eines Umlaufthermostats gestellt. (1) Rotationsviskosimeter *Rheomat R 180* von *proRheo*, (2) Umlaufthermostat, (3) Messzylinder, in welchem sich der rotierende Kegel und die zu überprüfende Substanz befindet, (4) Schlauchverbindung zwischen Umlaufthermostat-Auslass und Umlaufthermostat-Einlass, wodurch Turbulenzen durch die Strömung erzeugt werden und so ein homogenes Temperaturfeld im Wasserbad herrscht.

Die Differenz der gemessenen Temperatur und der im Spalt des Rotationsviskosimeters tatsächlichen Temperatur wurde auf  $\pm 0,8^\circ\text{C}$  geschätzt. Diese Schätzung wurde anhand eines längeren Betriebs, bei derselben eingestellten Temperatur, anhand der Differenz der eingestellten Temperatur am Umlaufthermostat und der gemessenen Temperatur im Rotationsviskosimeter gemacht. Da diese Messungen jedoch bei jedem Produkt geschehen müssen und *AGRANA Fruit Austria GmbH* dafür sehr genaue Messgeräte zur Verfügung hat, ist die Genauigkeit ausreichend. Es geht hauptsächlich um die Erstellung der Funktion und somit um die Berechnung der Koeffizienten, welche sich je nach Produkt und Zusatzstoffen für jedes Produkt individuell unterscheiden.

Aus den aufbereiteten Messergebnissen für den Zusammenhang zwischen der Schubspannung mit steigender Schergeschwindigkeit (Abbildung 3.2) ergibt sich, dass das verwendete Produkt eindeutig ein pseudoplastisches Fluid ist und die rheologischen Eigenschaften stark von einer Temperaturänderung abhängig

### KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT

sind. Dies führt dazu, dass das Fluid im betrachteten Messbereich seine pseudoplastischen Eigenschaften mit steigender Temperatur zu verlieren scheint. Ab 69 °C verhält es sich, im betrachteten Bereich, bereits wie ein newtonsches Fluid.

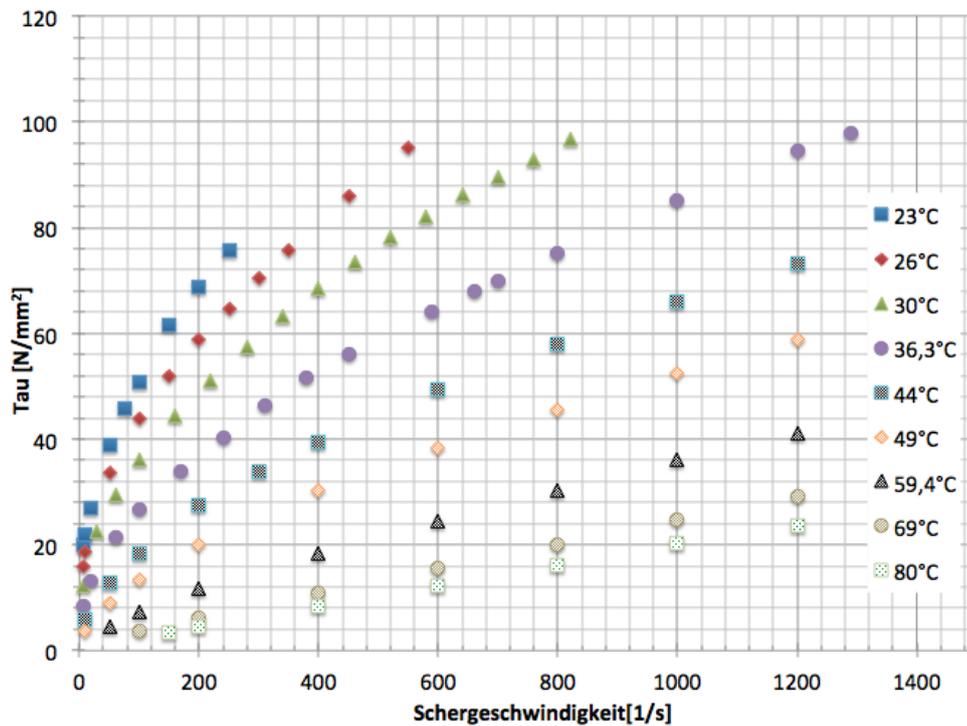


Abbildung 3.2: Zusammenhang der Scherspannung mit steigender Schergeschwindigkeit bei Erdbeermarmelade.

Erste grundsätzliche Aussagen können bereits hier getroffen werden:

- In hohen Temperaturbereichen treten sehr geringe Scherspannungen durch das Fluid auf. Wegen der hohen Temperatur wird jedoch der Feststoff, durch die abnehmende Festigkeit, leichter zerkleinert. Deshalb sollte bei höheren Temperaturen eine geringere maximal erreichte Scherspannung gewählt werden.
- In niedrigen Temperaturbereichen treten hohe Schubspannungen durch das Fluid auf. Vor allem nach dem das Fruchtstück aufgetaut ist, können diese zu einer Zerkleinerung führen, weil Früchte generell nur einer geringen Scherspannung standhalten, bevor sie zerkleinert werden (Unterabschnitt 2.8.1). Davor wird die mechanische Belastbarkeit vergleichbar mit jener von Eis sein.

In welchem Temperaturbereich eine besonders gefährliche Situation für die Zerkleinerung besteht, soll durch die Simulation untersucht werden, nachdem durch die Experimente für die Ermittlung der Schergeschwindigkeit und des Aufwärmvorgangs, alle notwendigen Daten ermittelt wurden.

### 3.1.3 Anpassung der Modellparameter

Der Solver, welcher in der Simulation verwendet wurde, wurde so aufgebaut, dass die Viskosität als Funktion der Temperatur und der Schergeschwindigkeit nach Gleichung (3.1) berechnet wird:

$$\mu = [k_0 + k_1(273,15 + \vartheta_i) + k_2(273,15 + \vartheta_i)^2 + k_3(273,15 + \vartheta_i)^3] \gamma^{(n-1)} \quad (3.1)$$

Daher müssen die erhobenen Messdaten als Funktion der Viskosität von der Schergeschwindigkeit dargestellt werden (siehe Abbildung 3.3).

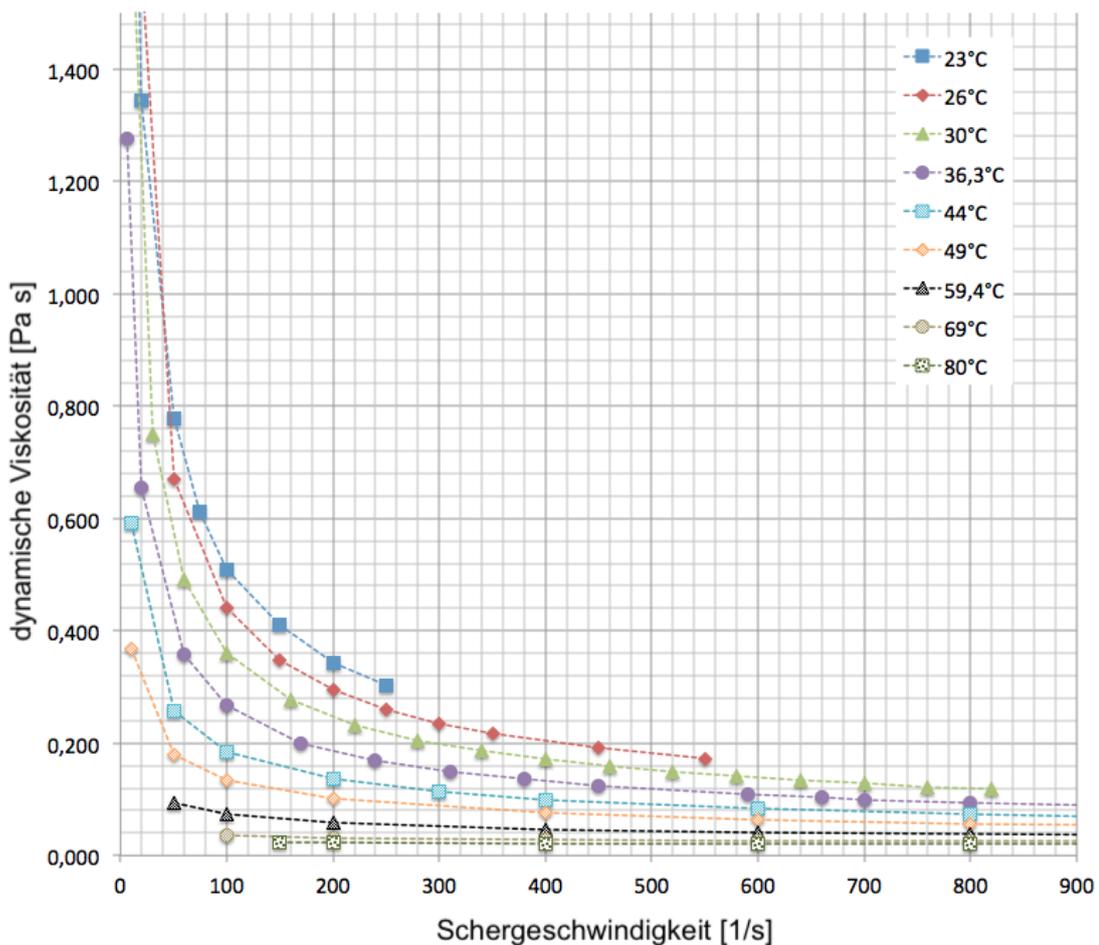


Abbildung 3.3: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit bei Erdbeermarmelade.

Die Viskosität wird als Funktion der Schergeschwindigkeit für verschiedene Temperaturen aufgetragen. Um daraus eine passende Funktionen zu entwickeln, müssen einige Parameter festgelegt werden. Die Schergeschwindigkeit, wie in Gleichung (3.1) ersichtlich, wird nur durch einen konstanten Koeffizienten  $n$  beeinflusst. Dieser ist, mathematisch gesehen, für die Steigung der Funktion verantwortlich. Diese ändert sich jedoch stark, je nach betrachteter Temperatur, wie

in Abbildung 3.3 ersichtlich. Da die Konstante jedoch nicht von der Temperatur abhängig ist, ergibt sich eine Abweichung von der realen Funktion. Somit muss ein Arbeitsbereich um einen Arbeitspunkt festgelegt werden, für welchen die Funktion nur in einem akzeptierten Höchstwert von der realen Funktion abweicht. Ansonsten erzeugt die mathematische Unabhängigkeit des Koeffizienten von der Temperatur einen zu großen Fehler im Vergleich zum realen Wert, welcher von der Temperatur abhängt.

### Berechnung der Funktion der dynamischen Viskosität im Arbeitsbereich

#### Berechnung von n:

Für die Berechnung der Konstante n wurden die Werte der signifikanten Kurven (siehe Tabelle 3.2) verwendet. Dabei wurde der Exponent der jeweiligen „Trendlinie“ (Trend-/Regressionstyp: Potenziell), welche mit Excel erstellt wurde, gemittelt und dann mit 1 addiert, damit die Form der Funktion wie in Gleichung (3.1) erhalten wird. Die n wurden in der Folge wie in Gleichung (3.2) gemittelt, um ein mittleres n zu erhalten, welches einen Kompromiss zwischen jenem n des unteren Temperaturbereiches und jenem des oberen darstellt. Das n kann je nach bevorzugtem Temperaturbereich vergrößert oder verkleinert werden, um diesen Temperaturbereich in der Simulation besser abzubilden.

Tabelle 3.2: Funktionen der Trendlinien der Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit von Erdbeermarmelade bei verschiedenen Temperaturen.

T [°C]	26	30	36,3	43,3	49
Koeffizient	7,3029	5,1198	3,1790	1,6674	0,9466
(n-1)	-0,602	-0,566	-0,528	-0,470	-0,421

$$n_{\text{mittel}} = \frac{\sum_{m=0}^M (n_m + 1)}{M} \quad (3.2)$$

Der Koeffizient n in der Berechnung ist nicht von der Temperatur abhängig, in der Realität ist dieser jedoch stark von dieser abhängig. Wie in Tabelle 3.2 und Abbildung 3.3 ersichtlich, ergeben sich bereits hier Unterschiede zu den im Experiment ermittelten Werten. Diese Temperaturabhängigkeit kann jedoch nachträglich im Solver implementiert werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen.

Für einen Arbeitspunkt der Schergeschwindigkeit von  $100 \text{ s}^{-1}$  ergibt sich für den Koeffizienten durch die Berechnung mittels Gleichung (3.2)  $n = 0,485250$ .

### KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT

Daraus ergeben sich bei einer Schergeschwindigkeit von wiederum  $100 \text{ s}^{-1}$  (gewählter Arbeitspunkt) bei den verschiedenen Temperaturen folgende, in Tabelle 3.3 berechnete Abweichungen.

Tabelle 3.3: Vergleich der gemessenen Viskosität und der berechneten Viskosität nach der Vereinheitlichung des Exponenten n

T [°C]	$\eta_{\text{Exp. bei}} \dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ [Pa s]	$\eta_{\text{berechnet bei}} \dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ [Pa s]	Abweichung $\eta_{\text{Exp.}} - \eta_{\text{berechnet}}$ [Pa s]	Fehler in % $ \eta_{\text{Exp.}} - \eta_{\text{berechnet}}  / (\eta_{\text{Exp.}})$ [-]
26	0,440	0,682	-0,242	55
30	0,361	0,478	-0,117	32
36,3	0,268	0,297	-0,029	11
44	0,184	0,156	0,028	15
49	0,135	0,088	0,047	34

#### Berechnung der Koeffizienten $k_0$ bis $k_3$ :

Die Berechnung der Koeffizienten  $k_0$  bis  $k_3$  gestaltet sich etwas komplexer. Aus der Gleichung (3.3) wird nun, durch das Einsetzen der Werte am Arbeitspunkt, die Matrix in Tabelle 3.4 extrahiert und berechnet. Als Arbeitspunkt wurde dabei eine Schergeschwindigkeit von  $100 \text{ s}^{-1}$  definiert. Die Werte für  $\mu_i$  und n bei den verschiedenen Temperaturen, wurden aus dem Messprotokoll des Experimentes ausgelesen (Anhang A). Die Schergeschwindigkeit  $100 \text{ s}^{-1}$  ist nur ein Beispiel, konkrete Werte können definiert werden, wenn die Schergeschwindigkeit bekannt ist. Diese kann auch bei höheren Temperatur niedriger sein, um schonender zu kochen.

$$\frac{\mu_i}{\dot{\gamma}_i^{(n-1)}} = [k_0 + k_1(273,15 + \vartheta_i) + k_2(273,15 + \vartheta_i)^2 + k_3(273,15 + \vartheta_i)^3] \quad (3.3)$$

Tabelle 3.4: Aufgestellte Matrix zur Berechnung der Koeffizienten  $k_0$  bis  $k_3$  für die Funktion zur Berechnung der dynamischen Viskosität anhand der Schergeschwindigkeit und der Temperatur.

T [°C]	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$\frac{\mu_i}{\dot{\gamma}_i^{n-1}}$
26	1	$(273,15+26)$	$(273,15+26)^2$	$(273,15+26)^3$	$\frac{0,440}{100^{-0,602}}$
36,3	1	$(273,15+36,3)$	$(273,15+36,3)^2$	$(273,15+36,3)^3$	$\frac{0,268}{100^{-0,528}}$
43,3	1	$(273,15+43,3)$	$(273,15+43,3)^2$	$(273,15+43,3)^3$	$\frac{0,184}{100^{-0,47}}$
49	1	$(273,15+49)$	$(273,15+49)^2$	$(273,15+49)^3$	$\frac{0,135}{100^{-0,421}}$

### KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT

---

Die Berechnung der Matrix wurde mit dem Taschenrechner *TEXAS INSTRUMENTS voyage 200* durchgeführt.

Für die Koeffizienten  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  und für den Exponenten  $n$ , ergeben sich somit die in Tabelle 3.5 erhaltenen Werte. Die Anzahl der signifikanten Stellen sind bei den Koeffizienten gleich, die Größenordnung ist jedoch von  $10^2$  bis  $10^{-6}$  in einem großen Bereich angesiedelt, welcher sich aus den zu multiplizierten Werten ( $\vartheta + 273,15$ ) in einem Größenbereich von  $10^2$ , bei  $k_0$ , bis  $10^7$  bewegt. Stets zu bedenken ist, dass zu wenig signifikante Stellen, vor allem bei  $k_3$ , zu enormen Abweichungen führen.

Tabelle 3.5: Durch das Lösen der Matrix berechnete Koeffizienten.

$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$n$
136,861	-0,372297	-0,00131230	0,00000360881	0,485250

Dadurch ergibt sich die finale Gleichung zu Gleichung (3.4).

$$\begin{aligned} \mu = [136,861 - 0,372297 \cdot (273,15 + \vartheta_i) - 0,00131230 \cdot (273,15 + \vartheta_i)^2 \\ + 0,00000360881 \cdot (273,15 + \vartheta_i)^3] \cdot \gamma^{(0,51475)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Bestimmung der Dichte der verwendeten Erdbeermarmelade:

Zuerst wurde Höhe der eingefüllten Erdbeermarmelade am Glas gekennzeichnet. Die Erdbeermarmelade wurde anschließend umgefüllt und das Glas wurde leer abgewogen ( $m_{\text{tara}}$ ). Danach wurde das Glas bis zur gekennzeichneten Füllhöhe mit Wasser befüllt und erneut abgewogen ( $m_{\text{brutto}}$ ). Die Masse wurde durch die Dichte von Wasser bei  $25,2^\circ\text{C}$  (Labortemperatur) dividiert. Die Dichte bei dieser Temperatur wurde Wärmeatlas (1997) entnommen. Nun wird die Masse der Erdbeermarmelade durch das erhaltene Volumen dividiert, woraus sich die Dichte der Erdbeermarmelade ergibt.

$$\rho_{\text{Erdbeermarmelade}} = \frac{m_{\text{Erdbeermarmelade}}}{V_{\text{Erdbeermarmelade}}} = \frac{m_{\text{Erdbeermarmelade}}}{\frac{m_{\text{brutto}} - m_{\text{tara}}}{\rho_{\text{Wasser } 25,2^\circ\text{C}}}} \quad (3.5)$$

Durch den Wert der Dichte aus Wärmeatlas (1997) (Tabelle 3.6) und den abgewogenen Massen, ergibt sich für eine Temperatur von  $\vartheta_{\text{Labor}} = 25,2^\circ\text{C}$  eine Dichte für die Erdbeermarmelade von  $\rho_{\text{Erdbeermarmelade}} = 1251 \text{ kg/m}^3$ .

Tabelle 3.6: Angegebenes Nettogewicht, abgewogenes Brutto- und Tara- Gewicht und im Datenblatt angegebene Dichte für Wasser (Wärmeatlas (2013)).

$m_{\text{Erdbeermarmelade}}$	$m_{\text{brutto}}$	$m_{\text{tara}}$	$\rho_{\text{Wasser } 25,2\text{ °C}}$
0,225	0,3085	0,1292	997

## 3.2 Simulation der Schergeschwindigkeit mittels OpenFoam

Durch die Experimente wurde bei Erdbeermarmelade der Zusammenhang zwischen der dynamischen Viskosität, der Temperatur und der Schergeschwindigkeit experimentell ermittelt. Nun muss ein *OpenFoam*-Case erstellt werden der, dieses Experiment nachbildet. Die Geometrie des Experimentes wird konstruiert und vernetzt. Anschließend wird sie in den erstellten Case implementiert und simuliert. Dabei wird die entwickelte Formel unter *./constant/liquidF/thermophysicalProperties* im Case eingebettet. Nach der Simulation erfolgt ein Vergleich mit dem Experiment.

### 3.2.1 *OpenFOAM* Case Setup

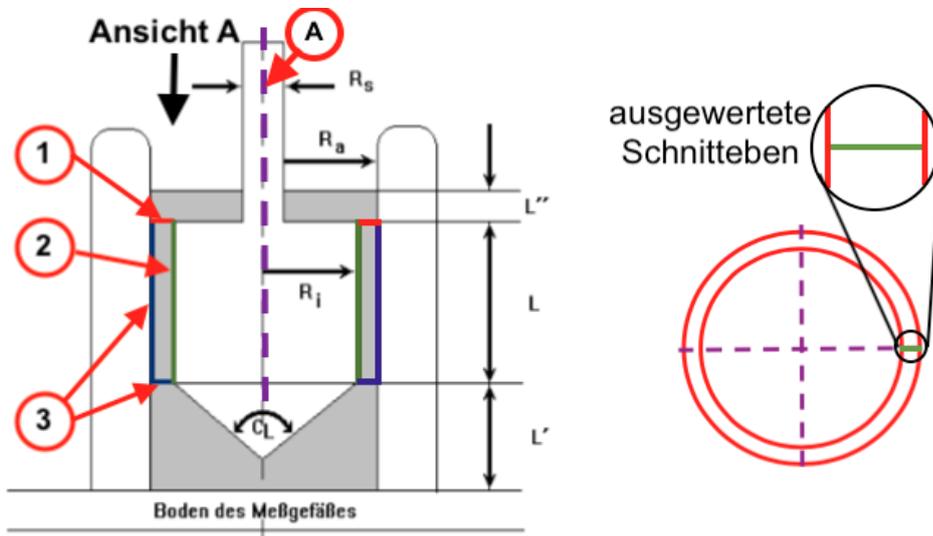
Die Geometrie wird, anders als beim Versuch, nur durch einen Zylinder dargestellt. Dies erleichtert die Berechnung erheblich und birgt keine Informationsverluste, da wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, der Bereich oberhalb des Messkörpers so ausgelegt ist, dass er den aufgezeichneten Widerstand so wenig als möglich beeinflusst. Trotzdem ist es notwendig, dass das Fluid bis zu einem bestimmten Füllstand eingefüllt wird. Ansonsten wird durch die Wellenbildung nicht mehr der gesamte Bereich mit Fluid gefüllt und es kann somit zu Fehlern kommen. Das Messsystem ist, laut der Betriebsanleitung von proRheo (2009), mit der DIN-Norm 53018/53019 genormt.

In *OpenFoam* wurden folgende Boundary Conditions für die einzelnen Grenzflächen (in der Abbildung 3.4 ersichtlich) verwendet:

- top (1)
  - type: patch
- movingWall (2)
  - type: wall

- wall (3)
  - type: wall

Dabei wurde nur der Zylinder simuliert, welcher durch die Fläche, bestehend aus den in Abbildung 3.4 eingezeichneten Begrenzungslinien (1), (2) und (3), rotiert um die Rotationsachse, entsteht.



(a) Rotationsviskosimeter mit den Randbedingungen des simulierten Bereiches.

(b) Ansicht A der simulierten Geometrie, mit der eingezeichneten Schnittebene welche in der Auswertung dargestellt wird.

Abbildung 3.4: Einzelne Bereiche des simulierten Rotationsviskosimeters (Bild kopiert aus proRheo (2009) und anschließend bearbeitet). Mit (1) top, (2) movingWall und (3) wall.

Für die Fläche *movingWall* muss im u-File in *OpenFOAM* eine Winkelgeschwindigkeit in rad/s angegeben werden. Damit man diese erhält, muss man die beim Rotationsviskosimeter eingestellte Schergeschwindigkeit  $D$  zuerst mit der Gleichung (3.6) in eine Drehzahl  $n$  mit der Einheit U/min umrechnen. Dafür benötigt man den Wert von  $KD$ , welcher sich durch Gleichung (3.7) und Gleichung (3.8) berechnen lässt. Die Drehzahl muss man anschließend mit der Gleichung (3.9) auf die Einheit rad/s umrechnen, da *OpenFOAM* ausschließlich mit SI-Einheiten rechnet.

Der Zusammenhang zwischen Drehzahl  $n$  und Schergeschwindigkeit  $D$  wird aus der Betriebsanleitung von proRheo (2009) entnommen.

$$n = \frac{D}{KD} \quad (3.6)$$

$$KD = \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (3.7)$$

$$\delta = \frac{R_a}{R_i} \quad (3.8)$$

Für einen definierten Arbeitsbereich mit der Schergeschwindigkeit  $100 \text{ s}^{-1}$ , ergibt sich für das Messsystem 11 beispielsweise die in Tabelle 3.7 ersichtliche Drehzahl:

Tabelle 3.7: Drehzahl bei einem Arbeitspunkt von einer Schergeschwindigkeit von  $100 \text{ s}^{-1}$ .

$R_i$ [mm]	$R_a$ [mm]	$\delta$ [-]	KD [-]	D [ $\text{s}^{-1}$ ]	n [U/min]
15	16,27	1,0846	1,2913	100	77,4416

$$1 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 1 \left[ \frac{\text{U}}{\text{min}} \right] \cdot \frac{2\pi \left[ \frac{\text{rad}}{\text{U}} \right]}{60 \left[ \frac{\text{s}}{\text{min}} \right]} = 1 \left[ \frac{\text{U}}{\text{min}} \right] \cdot 0,1047 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{U}} \right] \left[ \frac{\text{min}}{\text{s}} \right] \quad (3.9)$$

Nach der Berechnung der Winkelgeschwindigkeit, wird diese in das u-File (*./0/Medium/u*) im *OpenFOAM*-Case eingefügt (Abbildung 3.5). Das gesamte File *u*, ist in Anhang A in der Abbildung A.1 dargestellt.

```

movingWall
{
    type            rotatingWallVelocity;
    origin          (0 0 0);
    axis            (0 0 1);
    omega           4.05483; //Vorsicht! Einheit = [rad/s]
}

```

Abbildung 3.5: Definition der Geschwindigkeit des inneren Kegels des Rotationsviskosimeters im u-File.

In der Simulation wird die Gleichung (3.1) mit den gefundenen Koeffizienten (Tabelle 3.5) in *./constant/liquidF/thermophysicalProperties* definiert, wie in Abbildung 3.6 definiert. Das gesamte File *thermophysicalProperties* ist in Anhang A in der Abbildung A.2 dargestellt.

```
transport
{
  muPowerLawExp      0.48525;                //n_mittel
  muMin              0.0001;
  muMax              1000;
  muTempCoeffs<8>   (136.861 -0.372297 -0.0013123 0.00000360881 0 0 0 0); //k0 bis k7
  kappaCoeffs<8>    (0.5984 0 0 0 0 0 0 0); //lambda f{T}
}
```

Abbildung 3.6: Definition der temperaturabhängigen Schergeschwindigkeit in `thermophysicalProperties`.

### 3.2.2 Ergebnisse

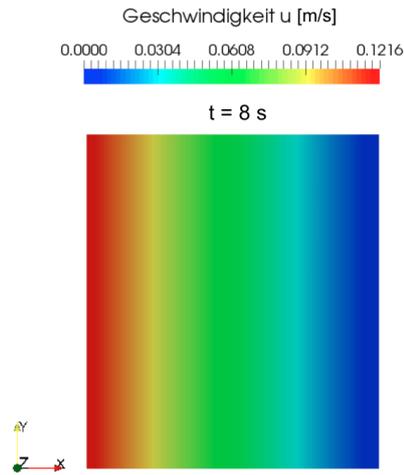
Für die Kontrolle des berechneten Geschwindigkeitsprofils, muss die eingestellte Umdrehungsgeschwindigkeit der `movingWall` in eine Tangentialgeschwindigkeit umgerechnet werden.

$$u_{\text{radial}} \left[ \frac{m}{s} \right] = r[m] \cdot n \left[ \frac{rad}{s} \right] \cdot 2\pi \quad (3.10)$$

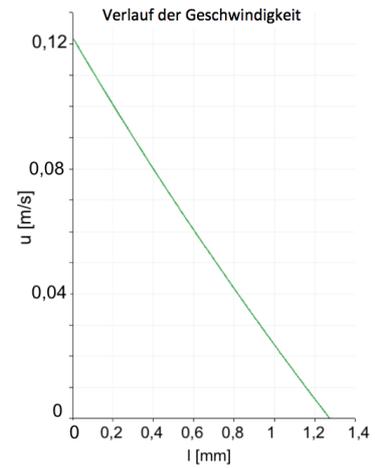
Als Postprocessing Tool wird *Paraview* verwendet. Mit diesem wird das Geschwindigkeits- und Schergeschwindigkeitsprofil auf seine Richtigkeit überprüft. Diese werden in der in Abbildung 3.4 (b) eingezeichneten Schnittebene ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.7 ersichtlich. Durch die farbliche Ausgabe wird das Aufspüren von Fehlern wesentlich vereinfacht, da man die Möglichkeit hat, in einem Schnitt den kontinuierlichen Verlauf der physikalischen Größen an einem bestimmten Zeitpunkt, aber auch zeitaufgelöst zu kontrollieren.

Das Ergebnis der Schergeschwindigkeit ist analog zu dem Beispiel der bewegten Platte auf einem Flüssigkeitsfilm. Die Kraft, welche sich durch die Scherspannung ergibt, muss durch die Rotation des inneren Kegels aufgebracht werden.

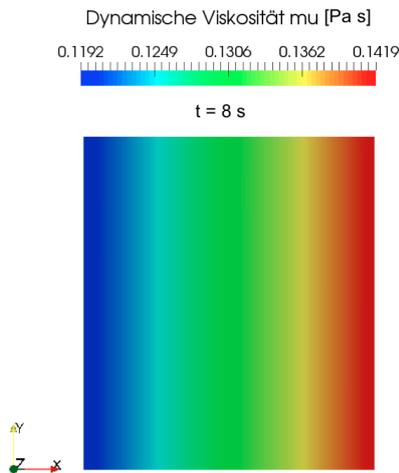
# KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT



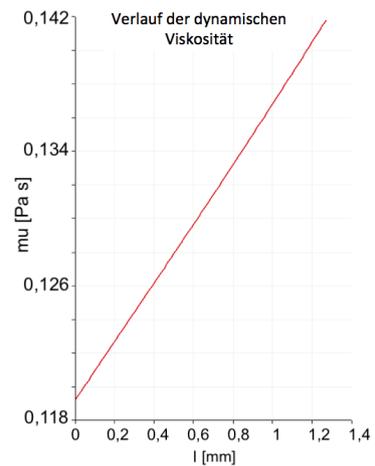
(a) Geschwindigkeitsprofil im Spalt des Rotationsviskosimeters



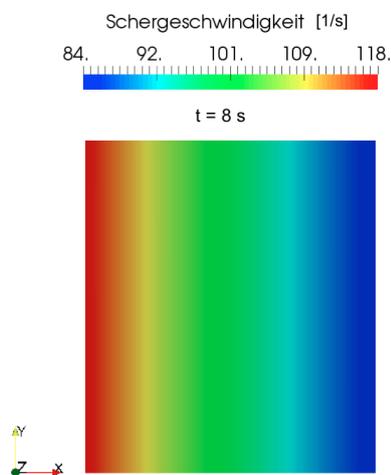
(b) Werte der Geschwindigkeit im Spalt



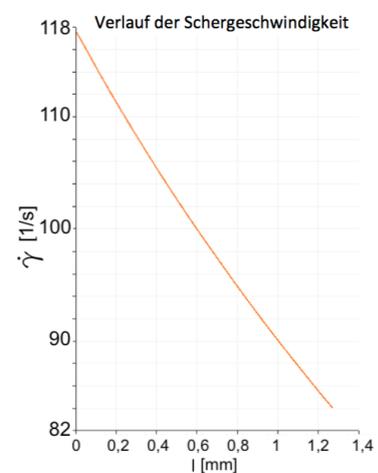
(c) Auswertung Paraview Profil der dynamischen Viskosität im Spalt des Rotationsviskosimeters



(d) Werte der dynamischen Viskosität im Spalt



(e) Auswertung Paraview Profil der Schergeschwindigkeit im Spalt des Rotationsviskosimeters



(f) Werte der Schergeschwindigkeit im Spalt

Abbildung 3.7: Ergebnisse der Simulation des Rotationsviskosimeters, ausgewertet an der in Abbildung 3.4 ersichtlichen Schnitteben. Ausgabe mit dem Postprocessing Tool *ParaView*.

### KAPITEL 3. ÜBERPRÜFUNG DER SIMULATION DER SCHERGESCHWINDIGKEIT

Die im Experiment erhaltenen Scherspannungen bei den eingestellten Temperaturen zwischen 23 °C und 80 °C und Schergeschwindigkeiten zwischen  $50 \text{ s}^{-1}$  und  $500 \text{ s}^{-1}$  wurden in *OpenFOAM* simuliert und anschließend verglichen (Tabelle 3.8). Wenn ein zulässiger prozentualer Fehler definiert wird, kann der erlaubte Arbeitsbereich, in welchem die Simulation ausreichend gute Ergebnisse liefert, abgegrenzt werden.

Tabelle 3.8: Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit jenen des Experimentes zur Validierung.

$\dot{\gamma}$ eingestellt [ $1/s$ ]	T [°C]	U eingestellt [m/s]	Kontrolle $u_{\text{radial}}$ [m/s]	T eingestellt [K]	$\dot{\gamma}$ gemittelt OF [ $1/s$ ]	$\mu$ erwartet [mPa * s]	$\mu$ gemittelt OF [mPa s]	$\tau$ erwartet [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ OF [N/mm <sup>2</sup> ]	Fehler [%]
100	26	8,1	0,019	299,2	101	440	437	44	44,1	0,3
500	49	40,5	0,097	322,2	505	70	56,7	35	28,6	-18,2
200	80	16,2	0,039	353,2	201	22,1	43,8	4,42	8,8	99,2
100	49	8,1	0,019	322,2	101	135	131	13,5	13,2	-2,0
50,0	23	5,2	0,010	296,2	50,85	778	710	38,9	36,1	-7,2

Der Vergleich der Simulation mit dem Experiment zeigt deutlich, dass die Abweichung größer wird, je weiter vom Arbeitspunkt abgewichen wird. Die Schergeschwindigkeiten mit  $200 \text{ s}^{-1}$  und  $500 \text{ s}^{-1}$  sind bereits außerhalb eines 10%igen Fehlers, jene mit  $50 \text{ s}^{-1}$  ist außerhalb eines 5%igen Fehlers. In Tabelle 3.8 wurde  $\tau$  berechnet, indem in *ParaView*, mittels dem integrierten Tool *calculator*, die dynamische Viskosität  $\mu$  mit der Schergeschwindigkeit *shearRate* multipliziert wurde. Anschließend wurde unter *Filters/Data Analysis/Plot over line* die Scherspannung über den Querschnitt des berechneten Zylinders ausgegeben.

# Kapitel 4

## Überprüfung der Simulation des Auftauvorganges

Um sicherzustellen, dass die *OpenFoam* Berechnungen des Aufwärmvorganges und insbesondere des Auftauvorganges realitätsnahe Ergebnisse liefern, muss die Simulation überprüft werden. Zuerst wird ein *OpenFoam*-Case erstellt, bei dem eine Kugel aus Eis in einem Strömungskanal geschmolzen wird. Die Simulation soll anschließend durch die Kontrolle der Enthalpiebilanz überprüft werden. Bevor die Simulationen des Aufwärmprozesses durchgeführt wurden, wurden die dafür benötigten Kenntnisse aus Tutorials (Harasek et al. (2018)) gewonnen.

### 4.1 Simulation des Schmelzvorganges einer Eiskugel

Bei der Simulation des Schmelzvorganges, wird Wärmeenergie von der wärmeren Flüssigphase auf die kältere Feststoffphase übertragen, wodurch die Flüssigphase abgekühlt wird. Wegen der physikalischen Interaktion beider Phasen, muss ein *multiRegion*-Solver verwendet werden. Bei der Simulation des Schmelzvorganges wurde das *chtMultiRegionFoam*-Tutorial *Tutorial Thirteen snappyHexMesh – Multi-Region* aus Harasek et al. (2018) adaptiert. Die Benennung der Regionen erfolgt in dieser Arbeit stets gleich, die flüssige Region wird *liquidF* und die feste Region wird *solidF* genannt. Die Geometrie wurde mit *FreeCAD* erstellt und anschließend mit *cfMesh* vernetzt.

Die Abmessungen des Strömungskanals und der darin befindlichen Kugel sind folgende:

- Inlet und Outlet des Strömungskanals = 30 mm x 30 mm
- Länge des Strömungskanals = 100 mm
- Kugeldurchmesser = 6 mm

In Abbildung 4.1 wird der simulierte Auftauvorgang der Kugel in der Sekunde 0, der Sekunde 1,4, der Sekunde 3 und der Sekunde 20 dargestellt. Zu Beginn hat die Kugel bereits eine Temperatur von 275 K, was nur 1 °C unter der Temperatur der flüssigen Region von 276 K entspricht. Bei Abbildung 4.1(c) wurde eine Skalierung im Bereich von 275,9 K bis 276 K verwendet. Aufgrund dieses gering eingestellten Temperaturbereiches der Skala, ist in *ParaView* die Zone, welche durch den Schmelzvorgang der Kugel abgekühlt wird, ersichtlich. Bei Abbildung 4.1(d) ist der Schmelzvorgang bereits abgeschlossen.

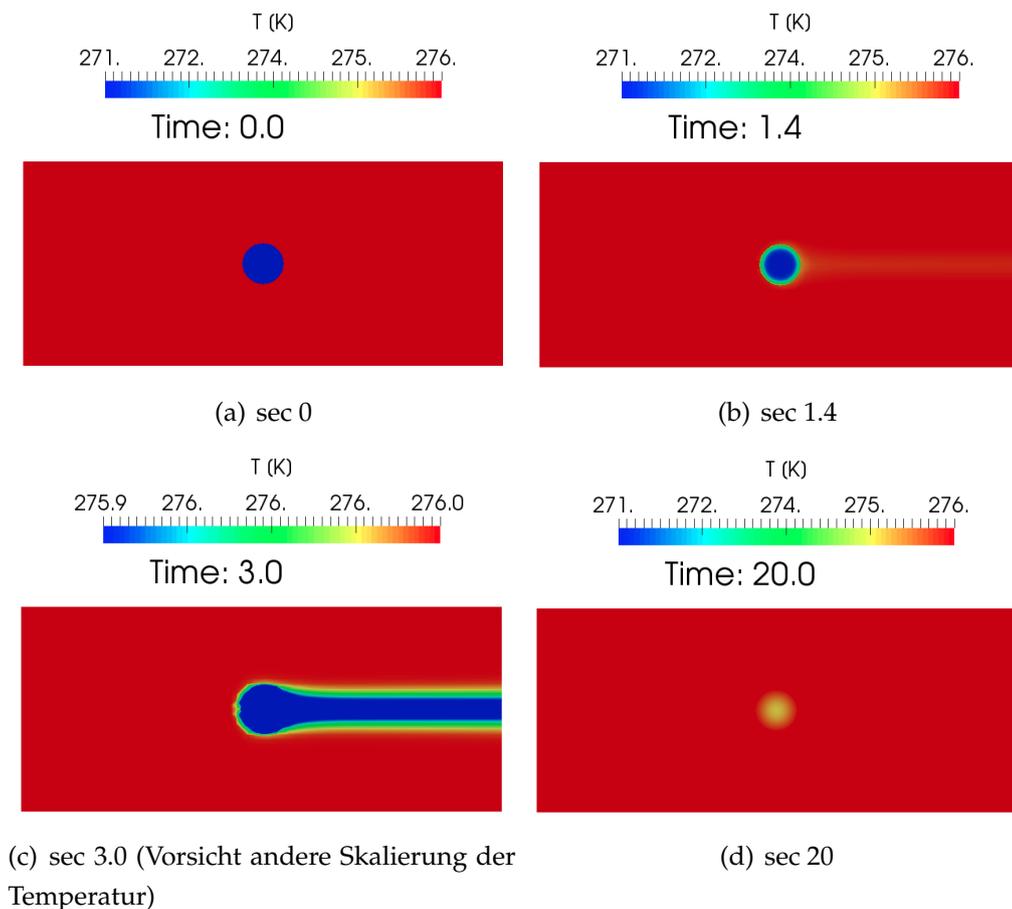


Abbildung 4.1: Auftauvorgang einer Kugel aus Eis in einem Flüssigkeitsstrom.

#### 4.1.1 Verwendete *OpenFOAM* Files

In der Simulation wird die  $c_p$ -Funktion (Abbildung 2.4), wie in Abbildung 4.3 im Case in `./constant/solid/thermophysicalProperties`, definiert. Der Aufbau dieses Cases ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Das gesamte File, `thermophysicalProperties`, ist im Anhang D dargestellt.

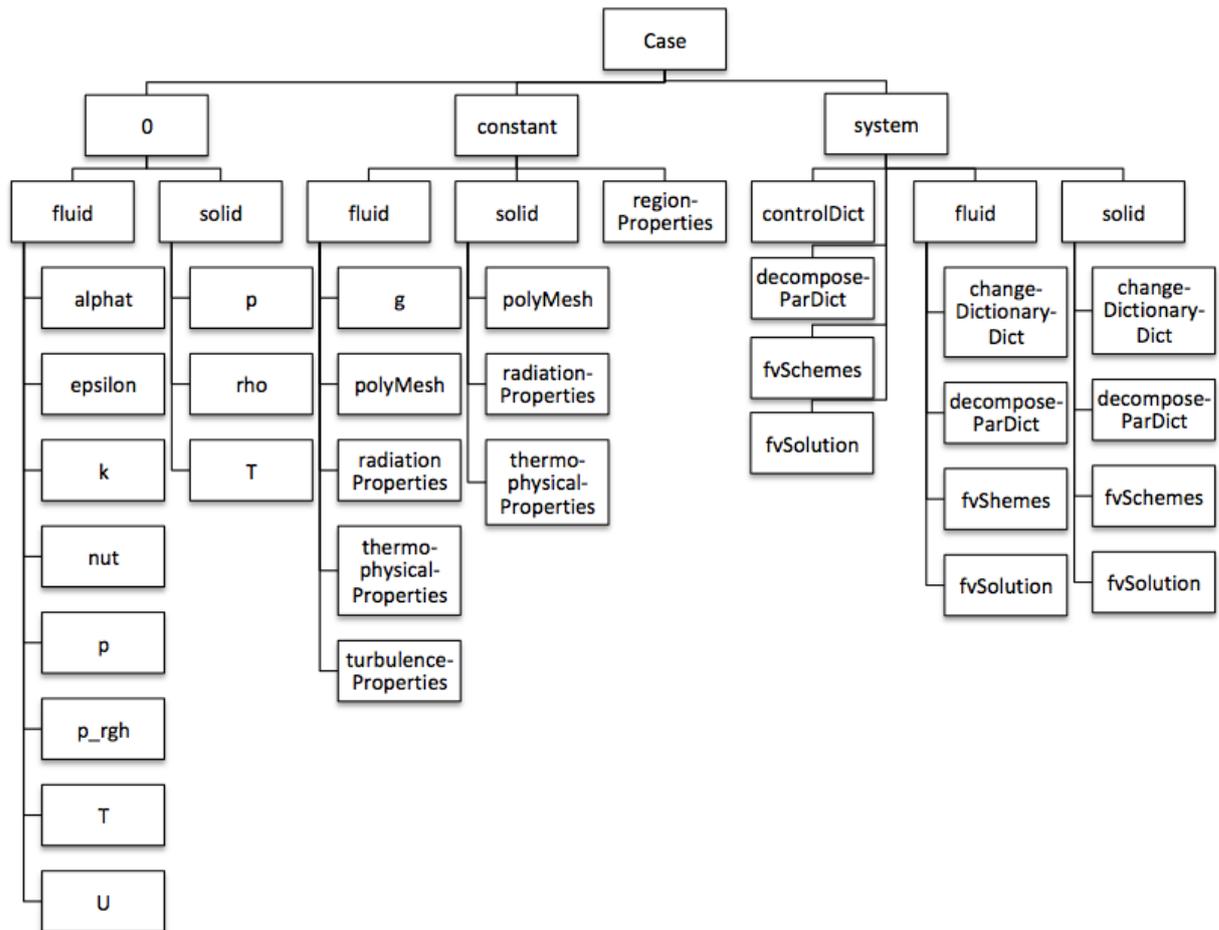


Abbildung 4.2: Verzeichnisbaum des verwendeten *OpenFOAM* Cases für die Simulation des Schmelzvorganges einer Eiskugel.

Zu Testzwecken wurde die  $c_p$ -Funktion vorerst über den gesamten Bereich konstant gehalten, damit die Enthalpiebilanz einfach nachgerechnet werden kann. Dies soll als Überprüfung der Simulation des Schmelzvorganges dienen. Die jeweilige  $breakTemp_N$  markiert hierbei, wo die Funktion für  $CpCoeffs_N$  aufhört und jene für  $CpCoeffs_{N+1}$  beginnt.

```

thermodynamics
{
  Hf      0;
  Sf      0;

  breakTempOne      270;      // DO NOT LOWER breakTempOne BECAUSE IT WILL CRASH
  breakTempTwo      271;
  breakTempThree    272;
  breakTempFour     275;
  breakTempFive     276;

  CpCoeffsOne<8>    (4000 0 0 0 0 0 0 0);      //below breakTempOne
  CpCoeffsTwo<8>    (4000 0 0 0 0 0 0 0);      // //equal or above breakTempOne and below breakTempTwo
  CpCoeffsThree<8>  (4000 0 0 0 0 0 0 0);      //equal or above breakTempTwo and below breakTempThree
  CpCoeffsFour<8>   (4000 0 0 0 0 0 0 0);      //equal or above breakTempThree and below breakTempFour
  CpCoeffsFive<8>   (4000 0 0 0 0 0 0 0);      //equal or above breakTempFour and below breakTempFive
  CpCoeffsSix<8>    (4000 0 0 0 0 0 0 0);      //equal or above breakTempFive
}

```

Abbildung 4.3: Einstellungen für die  $c_p$ -Funktion im File *thermophysicalProperties* zur Kontrolle des Schmelzvorgangs mittels Enthalpiebilanz.

## 4.2 Überprüfung der Enthalpie

Die Simulation wurde für die Überprüfung bis zu jenem Zeitpunkt berechnet, bei dem die gesamte Kugel geschmolzen ist.

Die durch den Aufwärmvorgang abgekühlte Flüssigkeit nimmt nur eine kleine Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche am *Outlet* ein. Aus diesem Grund muss die Temperatur auf sieben Nachkommastellen genau aus *ParaView* ausgelesen werden, da sich die Enthalpiedifferenz wie in Gleichung (4.1) berechnet und das Schreibintervall  $\Delta t$  0,1s ist. Bei einer Gesamtzeit von ca. 20s, kann sich durch die Aufsummierung der einzelner Enthalpiedifferenzen (Gleichung (4.2)), ein unzulässiger Fehler ergeben.

$$\Delta H = (T_{in} \cdot u_{in} - T_{out} \cdot u_{out}) \cdot A \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

$$\Delta H = \sum^k \Delta H_k \quad (4.2)$$

Um zu überprüfen ob die Simulation den Schmelzvorgang richtig berechnet, wird die Schließbedingung (Gleichung (4.3)) kontrolliert.

$$H_{in} - (H_{aus} + H_{Schmelz}) = 0 \quad (4.3)$$

Für die Auswertungen wurde ein *Python*-Skript geschrieben (Anhang B). Dieses ermöglicht die in *Paraview* erstellten Files für jeden Zeitschritt der Simulation,

welche alle Werte (T, u, etc.) am Inlet und Outlet erhalten, zu einem File über den gesamten Zeitraum zusammenzufügen. Dieses File über alle Schreibintervalle wurde in Excel eingefügt und es konnte der Verlauf der Enthalpie berechnet werden.

Wie in Abbildung 4.4 erkennbar, verharrt die Enthalpiedifferenz, nachdem sie zu Beginn auf etwas weniger als  $-2\text{J}/\text{Zeitschritt}$  gefallen ist, bei etwas mehr als  $-2\text{J}/\text{Zeitschritt}$ . Von Sekunde 10 bis zu Sekunde 40 ändert sie sich kaum und es ist sehr unwahrscheinlich dass sie auf  $0\text{J}/\text{Zeitschritt}$  steigt. Die Eiskugel hat nur einen Durchmesser von 6 mm. Die Flüssigkeit, in dieser Simulation Wasser, hat eine Temperatur von  $15^\circ\text{C}$ . Bis Sekunde 40 summiert sich, nach Gleichung (4.4), somit eine Enthalpiedifferenz von  $-1527,96\text{J}$  (Abbildung 4.4). Die Solldifferenz beträgt 11 J. Diese ergibt sich aus der Schmelzenthalpie addiert mit der Enthalpie für das Aufheizen auf  $15^\circ\text{C}$ . Da die durch die Simulation berechnete Enthalpie mit der Solldifferenz nicht überein stimmt, ist ein Simulationsfehler wahrscheinlich.

$$H = \sum_0^t dH \cdot dt \quad (4.4)$$

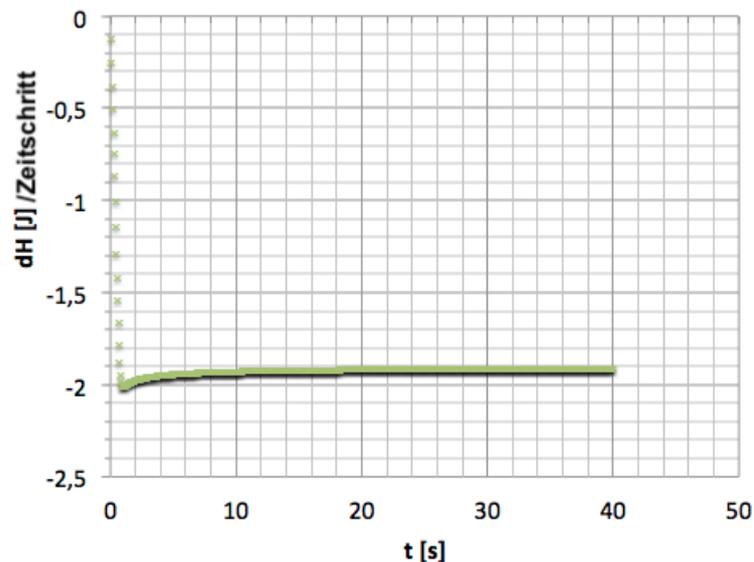


Abbildung 4.4: Abweichung der Enthalpiedifferenz  $dH$  zwischen der Enthalpie am Ausgang und der Enthalpie am Eingang beim Schmelzen einer Eiskugel.

Der Berechnungsfehler soll mit Hilfe eines Experimentes gefunden und beseitigt werden. Dabei soll ein mit einer Flüssigkeit umströmter Feststoff aufgewärmt werden und die gemessenen Temperaturkurven sollen mit jenen der Simulation verglichen werden.

Als Experiment soll ein Versuchsstand aufgebaut werden, welcher aus einem

Strömungskanal besteht, in dem ein gefrorener Feststoff aufgetaut werden soll. Damit der Strömungskanal zur Gänze simuliert werden kann, wird zusätzlich ein *Multiphase*-Case zur Kontrolle der konstruierten Geometrie und zur Ermittlung der Pegelhöhe erstellt.

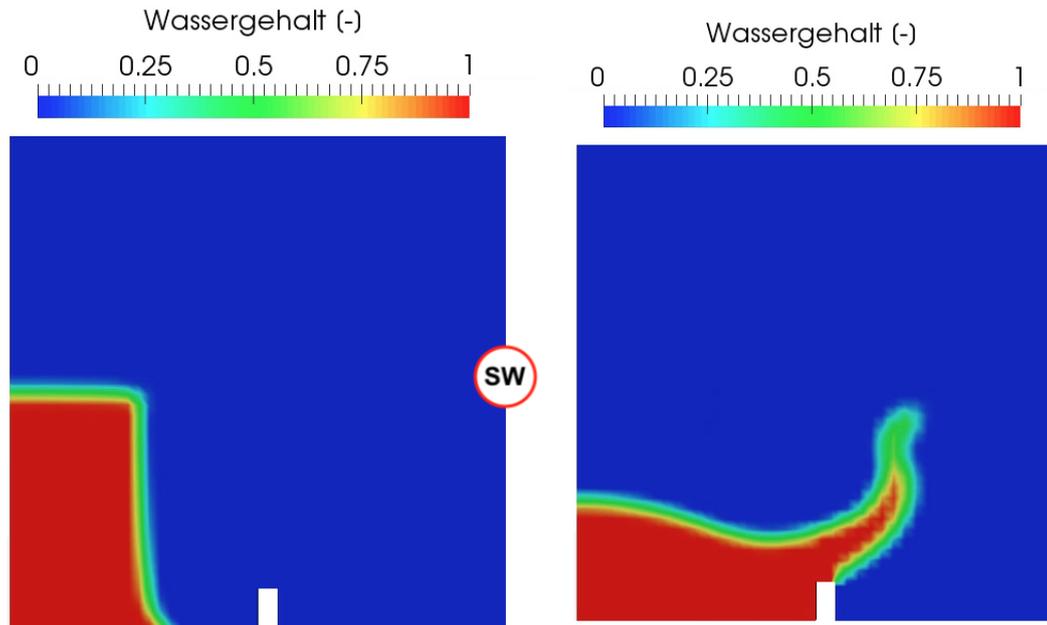
### 4.3 Aufbau eines multiPhase Cases

Der Aufbau des Cases zur Simulation der Pegelhöhe wurde dem Tutorial Case *damBreaking* von Harasek et al. (2018) entnommen. Bei diesem Tutorial wird der Solver *compressibleMultiphaseInterFoam* zur Berechnung verwendet.

Die Vorgangsweise zum Aufbau einer neuen Simulation ist zu Beginn stets ähnlich und läuft in folgenden Schritten ab:

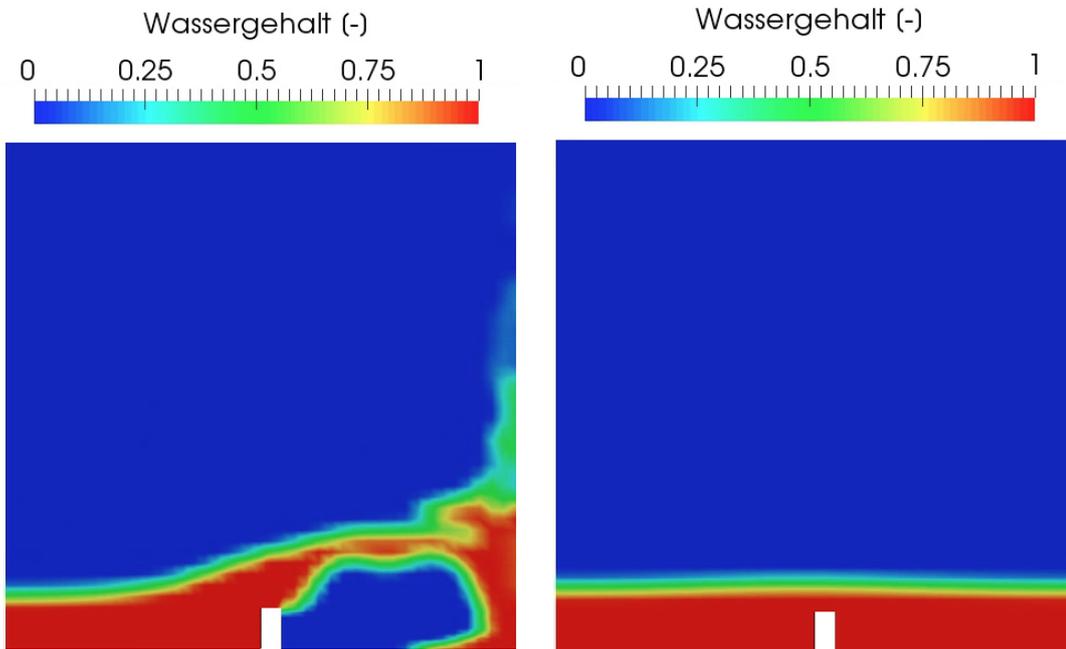
- Suche nach einem Case, welcher einen ähnlichen Fall behandelt, z.B. in einem Tutorial oder einem bereits simulierten Case.
- Simulation des Tutorial-Cases. Es kann sein, dass das Tutorial für eine andere *OpenFOAM*-Version konzipiert wurde. In diesem Fall muss entweder die Version aktualisiert werden, eine andere frühere Version verwendet werden oder der Case muss an die eigene Version angepasst werden.
- Nach erfolgreicher Berechnung wird der Case an den neuen Fall angepasst. Dafür wird die geänderte Geometrie vernetzt und die Randbedingungen werden definiert. Im Case müssen die Stoffwerte angepasst werden.
- Da *OpenFOAM* ein Open-Source Programm ist, können die Solver durch zusätzliche Codes erweitert werden (in dieser Arbeit wurde der Code für die Berechnung der Schergeschwindigkeit hinzugefügt).

Ein ähnlicher Fall zur Simulation der Pegelhöhe ist das Tutorial *damBreaking*. Dieses wurde simuliert und es wurden die, in Abbildung 4.5 ersichtlichen Ergebnisse, erzielt. Damit das Tutorial für die Simulation des Strömungskanals verwendet werden kann, muss die Seitenwand SW als durchlässig definiert werden



(a) Durch `setFields` wird eine Wassersäule bei Sekunde 0 definiert.

(b) Durch den hydrostatischen Druck beginnt die Wassersäule zusammen zu brechen.

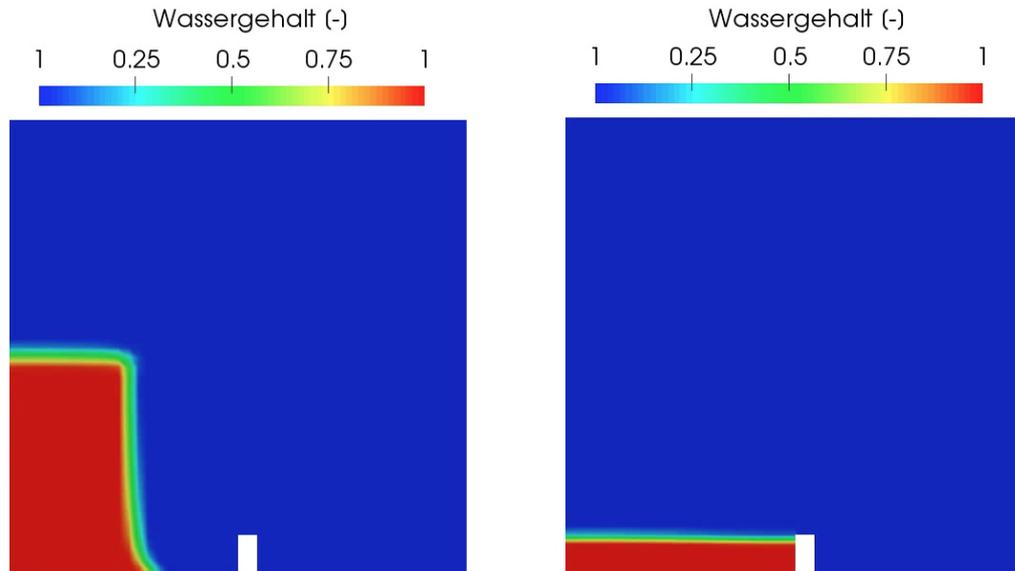


(c) Da die gegenüberliegende Fläche als `wall` definiert ist, prallt das Wasser ab.

(d) Das Wasser hat den Energieabbau fast vollständig vollzogen.

Abbildung 4.5: Simulationsergebnisse des Tutorials *damBreaking* visualisiert in *ParaView*.

Die Wand SW wird als durchlässig definiert, indem die Randbedingung unter `./constant/polyMesh/boundary` bei `type` als `patch` gesetzt wird. Damit ergibt sich aus Abbildung 4.5 und dessen Anfangszustand der in Abbildung 4.6 gezeigte Endzustand.



(a) Durch `setFields` wird eine Wassersäule bei Sekunde 0 definiert.

(b) Das Wasser hat den Energieabbau fast vollständig vollzogen.

Abbildung 4.6: Verändertes Tutorial *damBreaking* aus Harasek et al. (2018), die rechte Wand wurde als durchlässig definiert.

## 4.4 Zusammenfassung

Nachdem die Überprüfung der Simulation mit dem hinzugefügten Code für die Berechnung der Schergeschwindigkeit erfolgreich war, musste die Simulation des Auftauvorgangs überprüft werden. Dafür wurde ein Tutorial-Case dahingehend adaptiert, dass eine Eiskugel in einem Strömungskanal, von Wasser umströmt und dabei geschmolzen wird. Bei der Überprüfung der Enthalpiebilanz, stellte sich heraus, dass die Schließbedingung nicht erfüllt wird. Es ist daher nötig, den Solver durch den Vergleich mit einem Experiment und der zugehörigen Simulation, zu überprüfen. Dafür soll ein Feststoff in einem oben offenen Strömungskanal aufgetaut werden. Zur Vorbereitung für die Auslegung der Geometrie, wurde ein *Multiphase*-Tutorial so adaptiert, dass die Pegelhöhe und die Größe des Abflussstromes des Strömungskanals simuliert werden können.

# Kapitel 5

## Experimente und Simulation des Auftauvorganges

Wie sich in Kapitel 4 zeigte, ist die Simulation des Auftauvorganges fehlerhaft. Aus diesem Grund soll ein Experiment durchgeführt werden in welchem ein eingefrorener Feststoff aufgetaut wird. Dafür wird in diesem Kapitel zuerst ein Strömungskanal ausgelegt, gebaut und anschließend mit allen notwendigen Geräten zu einem Prüfstand ergänzt. Dann werden Auftauexperimente durchgeführt. Die Geometrie des Strömungskanals wird anschließend in *Gambit* konstruiert und vernetzt, in den *OpenFoam*-Case eingebettet und schließlich in *OpenFoam* simuliert. Die gemessene Auftaukurve wird anschließend mit der simulierten Auftaukurve verglichen.

### 5.1 Experimente zum Auftauvorgang

Für die Validierung sollte das Experiment einige Bedingungen erfüllen, dazu zählen folgende:

- Die Geometrie soll einen einfachen Aufbau haben, um diese gut vernetzen zu können, damit in weiterer Folge keine Probleme bei der Simulation entstehen.
- Es müssen definierte und nachvollziehbare Bedingungen an den Grenzflächen herrschen, welche als Boundary Conditions in *OpenFOAM* eingefügt werden können.

Dabei muss der Feststoff mehrere Voraussetzungen erfüllen:

- Der Feststoff soll eine homogene Struktur aufweisen, damit die Stoffeigenschaften bei gleicher Temperatur über den Querschnitt konstant sind. Wäre das nicht so, müsste man eigene Zonen definieren, in welchen die Stoffeigenschaften jeweils ident sind. Dies wäre jedoch nur sinnvoll, wenn

diese Zonen bei jedem Testobjekt gleich verteilt sind. Bei Naturprodukten ist das kaum möglich.

- Der Feststoff soll auch nach dem Auftauvorgang eine hohe Festigkeit besitzen, um nicht aufgrund eines geringeren Anpressdruckes von den Sensoren zu rutschen oder sich durch das Strömungsfeld zu deformieren. Andererseits würde eine Vorrichtung zur Positionierung erforderlich sein, welche zusätzliche Schwierigkeiten für die Simulation bereiten könnte. Vor allem, da um die Vorrichtung ein sehr feines Gitter erstellt werden müsste. Zusätzlich sollte es eine hohe Festigkeit aufweisen, damit keine größeren organischen Stoffe in den Kreislauf des Flüssigkeitsstromes kommen und sensible Teile, wie das Umlaufthermostat oder das Rotameter, verschmutzen. Es soll damit auch eine Ablagerung von Stoffen im Strömungskanal vermieden werden. Das Wasser wird nach jedem Experiment getauscht, um die vorhandene, oftmals unvermeidbare Verschmutzung so gering wie möglich zu halten.
- Der Feststoff soll möglichst groß sein, damit der relative Positionsfehler (Gleichung (5.1)) so klein wie möglich wird. Um dies zu überprüfen werden die Würfel nach dem Experiment aufgeschnitten und die Positionen der Sensoren werden überprüft.
- Über den verwendeten Feststoff sollten in der Literatur Stoffdaten vorhanden sein, um sich zusätzliche Messungen zu ersparen. Zu den Stoffdaten zählen die spezifische Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die spezifische Schmelzenthalpie.

$$\text{RelativerFehler} = \frac{\text{absoluterFehler}}{\text{wahrerWert}} = \frac{\Delta x}{x_w} \quad (5.1)$$

In Gleichung (5.1) wird die Seitenlänge des Würfels als wahrer Wert und die Abweichung von der Sollposition als absoluter Fehler eingesetzt.

### 5.1.1 Wählen eines geeigneten Fruchtstücks

Zur Auswahl eines geeigneten Fruchtstücks wurden mehrere Stoffe getestet, Würfel daraus geschnitten und qualitativ miteinander verglichen. In Abbildung 5.1 sieht man verschiedene Produkte, welche für diesen Zweck getestet wurden. V.l.n.r. sind das eine Kiwi, eine Kartoffel, ein Apfel und eine Banane. Für diese wurden die Vor- und Nachteile abgewogen, um den Favoriten festzulegen.

### **Kiwi:**

- Vorteil:
  - Ist eine Frucht, welche tatsächlich im Pasteurisationsprozess von *AGRANA Fruit Austria GmbH* verwendet werden könnte und liefert daher Werte, welche auch in Folgearbeiten gebraucht werden könnten.
  - Es sind relativ große Würfel möglich.
- Nachteil:
  - Das Fruchtfleisch ist nicht homogen aufgebaut.
  - Sie ist sehr weich und könnte deshalb nach dem Auftauen verrutschen.
  - Die Produktqualität und daher die Stoffeigenschaften sind je nach Reifezustand sehr unterschiedlich (Annahme).

### **Kartoffel:**

- Vorteil:
  - Sehr homogener Aufbau des Fruchtfleisches.
  - Sie ist in großer Stückzahl in ähnlicher Qualität erhältlich.
  - Sie kann mehrere Tage gelagert werden, ohne dass sich die Stoffeigenschaften stark verändern (Annahme).
  - Sie ist günstig zu erwerben.
  - Durch die große Bedeutung als Grundnahrungsmittel ist sehr viel Literatur vorhanden.
- Nachteil:
  - Sie ist keine Frucht und enthält Stärke statt Zucker.
  - Durch das Einfrieren können sich die Stoffeigenschaften verändern. Das kommt bei allen betrachteten Produkten vor, jedoch besteht die Kartoffel hauptsächlich aus Stärke, wodurch sich das Verhalten signifikant von jenem der Früchte unterscheiden kann.

### **Apfel:**

- Vorteil:
  - Ist eine Frucht, welche tatsächlich im Pasteurisationsprozess von *AGRANA Fruit Austria GmbH* verwendet werden könnte und liefert daher Werte, welche auch in Folgearbeiten gebraucht werden könnten.
  - Das Fruchtfleisch ist sehr homogen aufgebaut.

– Es ist eine große Anzahl an Äpfeln ähnlicher Qualität erhältlich.

- **Nachteil:**

– Es sind nur sehr kleine Würfel möglich, da der Apfel rund ist und das Kerngehäuse viel Platz einnimmt.

### **Banane:**

- **Vorteil:**

– Ist eine Frucht, welche tatsächlich im Pasteurisationsprozess von *AGRANA Fruit Austria GmbH* verwendet werden könnte und liefert daher Werte, welche auch in Folgearbeiten gebraucht werden könnten.

- **Nachteil:**

– Hat eine kurze Haltbarkeit.

– Es sind nur sehr kleine Würfel möglich.

– Nachdem die Schale entfernt wird, verdirbt sie sehr schnell. Die Verarbeitung ist aufgrund der Konsistenz schwierig.

– Sie ist sehr weich und könnte nach dem Auftauen verrutschen.

– Es sind kaum Stoffdaten vorhanden.

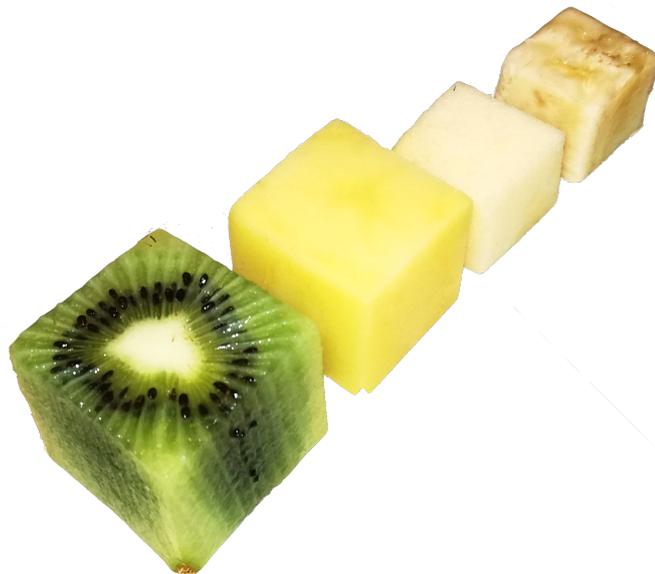


Abbildung 5.1: Erstellen von "Fruchtwürfeln", v.l.n.r. Kiwi, Kartoffel, Apfel und Banane.

Die Kartoffel kann vor allem durch den homogenen Aufbau und die Größe überzeugen. Diese ist nicht nur notwendig, um den relativen Positionsfehler klein zu halten, sondern wird auch benötigt, da die Sensoren, bedingt durch ihren Griff,

einen Mindestabstand von 16 mm erfordern. Außerdem ist es ein Produkt, das bedingt durch die Wichtigkeit in der Lebensmittelbranche, sehr gut erforscht ist. Es sind Literaturdaten vorhanden, beispielsweise zur spezifischen Wärmekapazität vor und nach dem Gefrierprozess, sowie zur Schmelzenthalpie. Die höhere Festigkeit ermöglicht auch eine gute Formgenauigkeit bei dem Zuschneiden der Würfel. Früchte sind oftmals sehr inhomogen aufgebaut und haben sehr unterschiedliche Festigkeiten und Stoffeigenschaften, je nach Erntezeitpunkt. Da der Auftau- und Aufwärmprozess so gut wie möglich abgebildet werden sollen, ist es sinnvoller Kartoffeln für dieses Experiment zu verwenden, welche sich nur geringfügig unterscheiden. Früchte variieren stark in Festigkeit, Größe und Aufbau. Früchte können auch nur kurz gelagert werden. Da nur drei Sensoren zur Messung des Auftauvorganges vorhanden sind, kann nur jeweils ein Fruchtwürfel mit diesen drei Sensoren über Nacht eingefroren werden. Dadurch wird sehr viel Zeit für die Experimente benötigt.

### 5.1.2 Auslegung des Strömungskanals

Vor der Konstruktion des Strömungskanals müssen folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Dimensionen soll der Strömungskanal annehmen?
- Höhe des Überlaufwehrs?
- Welche Messungen sollen vorgenommen werden?

#### **Welche Dimensionen soll der Strömungskanal annehmen?**

Die Breite ist maßgeblich von der Größe des Fruchtstückes abhängig. Weitere Einflussfaktoren sind die Wärmekapazität des Fluides, welche sehr groß sein soll, damit eine beinahe konstante Temperatur an der Oberfläche des Fruchtstückes bereitgestellt werden kann. Die Strömung soll laminar bleiben und es soll durch das Hindernis im Strömungskanal zu keinem erkennbaren Anheben der Wasserfläche, verursacht durch den Staudruck (Gleichung (5.2)), kommen.

Berechnung des Staudrucks  $p_{\text{Stau}}$  mit der Dichte des Fluids  $\rho$  der Anströmgeschwindigkeit  $u_{\infty}$  und dem statischen Druck  $p_{\infty}$  nach Kuhlmann (2007).

$$p_{\text{Stau}} = \frac{\rho \cdot u_{\infty}^2}{2} + p_{\infty} \quad (5.2)$$

**Höhe des Überlaufwehrs?**

Die theoretische Überfallhöhe durch das Überlaufwehr kann nach der Formel von *Poleni* wie in Gleichung (5.3) berechnet werden.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt[3]{2g} \cdot h^{3/2} \quad (5.3)$$

Mit dem Abfluss  $Q$  in  $\text{m}^3/\text{s}$ , dem dimensionslosen Überfallbeiwert  $\mu$ , der Breite des Überfallwehrs  $b$  in  $\text{m}$ , der Schwerebeschleunigung auf der Erde  $g$  in  $\text{m}/\text{s}^2$  und der Differenz der Höhe der Wasseroberfläche vor dem Wehr zur Wehrhöhe  $h$  in  $\text{m}$ .

Der dimensionslose Überfallbeiwert ist wiederum das Produkt aus sieben Faktoren Aigner (2011), wobei sich bei dem schmalkronigen Überfall bis auf  $\mu_0$  dem Basiswert des Überfallquerschnittes,  $\mu_1$ , dem Einfluss der Zulaufgeschwindigkeit und  $\mu_3$ , dem Einfluss der Strahlform durch z.B. den Saugdruck, alle zu 1 ergeben und deshalb vernachlässigt werden können.

Nach Aigner (2011) ergeben sich für die verbleibenden Faktoren folgende Werte:

$\mu_0 = 0,577 \dots$  da es sich um einen rechteckigen Überlauf handelt.

$\mu_0 = (h_E/h) \dots$  da die Pegelhöhe der Wasseroberfläche vor dem Wehr nicht bekannt ist, muss dieser Wert iterativ berechnet werden (siehe Aigner (2011)).

$\mu_3 = 1 \div 1,8 \dots$  da es sich um ein Standardwehr handelt.

Für den späteren Bau des Strömungskanals wurde dieser mittels dem Open Source Konstruktionsprogramm *FreeCAD* konstruiert und aus dem 3D-Modell wurden die Konstruktionszeichnung des gesamten Strömungskanals abgeleitet (Abbildung 5.2). Anschließend wurden die Einzelteile des Strömungskanals abgeleitet und in der hauseigenen Werkstatt gefertigt.

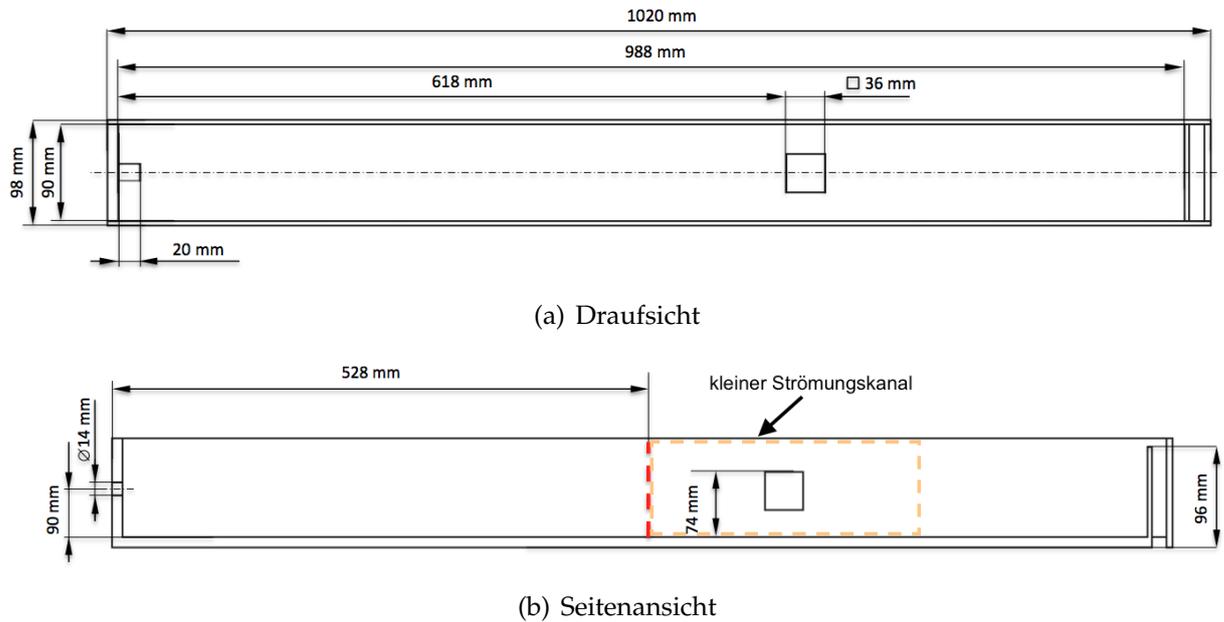


Abbildung 5.2: Konstruktionszeichnungen des Strömungskanals

Für eine spätere Simulation eines Ausschnittes des Strömungskanals, muss überprüft werden, ob das Geschwindigkeitsprofil auf der Fläche des *Inlets* dieses Ausschnittes konstant ist. Dafür wird eine CFD-Simulation für den gesamten Kanal durchgeführt. Danach wird das Geschwindigkeitsprofil in der Schnittebene an der in Abbildung 5.2 rot markierten Stelle ausgewertet (Abbildung 5.3). Dieser Ausschnitt wird als kleiner Strömungskanal bezeichnet und ist schematisch in Abbildung 5.2 orange-strichliert eingezeichnet.

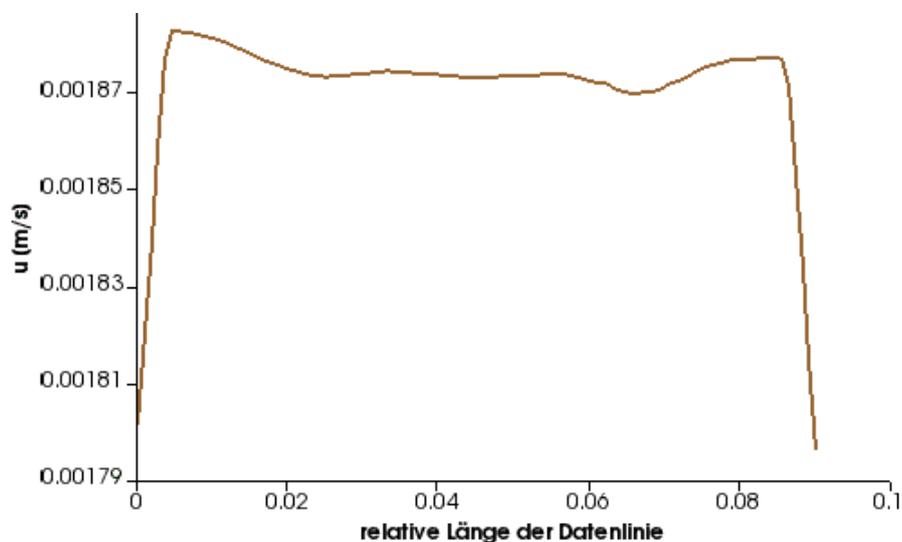


Abbildung 5.3: Horizontales Geschwindigkeitsprofil vor dem Fruchstück bei der mit rot eingezeichneten Schnittfläche in Abbildung 5.2(b). Das horizontale Geschwindigkeitsprofil wird in einer Höhe von 46 mm, vom Boden des Strömungskanals aus, ausgewertet.

Da das Strömungsfeld beinahe gleichmäßig über den ganzen Querschnitt des Strömungskanals ist, wurde auf die Strömungsgleichrichter verzichtet. Die Messstelle wurde etwas weiter nach vor versetzt, um die Einflüsse der Stauzone auf den Auftauvorgang bei der Wehr, so gering wie möglich zu halten.

### **Welche Messungen sollen vorgenommen werden?**

- Um die Aufwärmkurve der Simulation zu überprüfen, muss die Temperatur im Mittelpunkt des Würfels gemessen werden, damit die Aufwärmkurve erstellt werden kann.
- Damit die Asymmetrie des Aufwärmvorganges aufgrund der Anströmung auf einer Seite kontrolliert werden kann, wodurch sich eine Verschiebung des kältesten Punktes ergibt, wird die Temperatur nicht nur im Mittelpunkt gemessen, sondern muss auch an zwei weiteren Punkten gemessen werden. Diese Punkte müssen gleich weit von der Mitte entfernt sein und auf jener Mittelachse des Würfels liegen, welche sich parallel zur Strömungsrichtung befindet.
- Um die Temperaturen am *Inlet* und am *Outlet* in der späteren Simulation als Randbedingung einsetzen zu können, müssen diese gemessen werden.
- Damit der zu simulierende Strömungskanal weniger Zellen hat und somit schneller berechnet wird, müssen die Temperaturen am *Inlet* und *Outlet* des kleinen Strömungskanals ebenfalls gemessen werden.

Zusätzlich muss der Volumenstrom durch ein Rotameter gemessen werden, um diesen richtig einstellen zu können.

### **5.1.3 Auslitern der Pumpe**

Die Einstellung des Volumenstroms erfolgt über die Pumpenleistung des Umlaufthermostats. Daher muss die Pumpe zur Bestimmung des Bereiches der Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal ausgelitert werden.

Die Pumpe muss folgende Druckverluste überwinden:

- Den durch die hydrostatische Höhe wirkenden Druckverlust. Die Höhendifferenz ergibt sich aus dem Auslass des Umlaufthermostats und dem Einlass in den Strömungskanal.
- Den Druckverlusten der Einbauten Rotameter und Absperr-/Justierventil.
- Den durch den Schlauch verursachten Druckverlust.

Das Absperrventil wird im Betrieb zur genauen Justierung des Volumenstromes verwendet.

Unterschiedliche Querschnitte des Schlauches verursachen stark unterschiedliche Druckwiderstände, da der Durchmesser mit der 5. Potenz in die Berechnung einfließt (Gleichung (5.4) nach Kuhlmann (2007)).

Die Pumpe fördert erst ab einer eingestellten Pumpenleistung von 7 %, davor kann die nötige Druckdifferenz nicht aufgebracht werden. Ab ca. 28 % der Pumpenleistung ist keine Erhöhung des Volumenstromes mehr festzustellen. Deshalb wird der Bereich zwischen 7 % und 28 % als Arbeitsbereich definiert (Abbildung 5.4 genaue Werte siehe Anhang C).

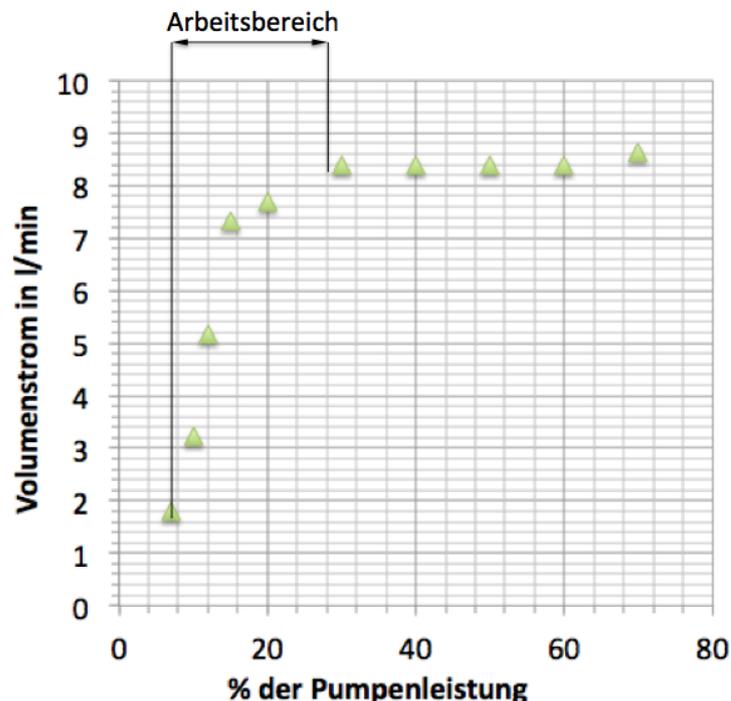


Abbildung 5.4: Für das Auslitern der Pumpe des Umlaufthermostates ermittelte Volumenströme bei verschiedenen Pumpenleistungen.

Die Reynoldszahl (Gleichung (5.8)) liegt bei einem verwendeten Schlauchdurchmesser (charakteristische Länge  $l$ )  $d_{\text{Schlauch}}$  von 14 mm, bei einem maximalen Volumenstrom von 91/min (entspricht 0,9744 m/s) und einer dynamischen Viskosität von maximal  $560 \cdot 10^{-6}$  Pa s bei 47 °C, bei 24,4. Dieser Wert liegt eindeutig im laminaren Bereich.

Die Formel des Druckverlustes  $\Delta p$  im Rohr bei einer turbulenten Strömung nach Kuhlmann (2007) mit dem dimensionslosen Rohreibrungsbeiwert  $\lambda_R$ , der Länge

der Rohrleitung  $l_R$ , der Dichte des Fluids  $\rho$ , dem Rohrdurchmesser  $d_i$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$ , berechnet sich wie in Gleichung (5.4). Diese Formel gilt formal auch für laminare Strömungen (Kuhlmann (2007)).

$$\Delta p = \frac{\lambda_{turb} \cdot l_R \cdot \rho \cdot 8}{d_i^5 \cdot \pi^2} \cdot \dot{V}^2 \quad (5.4)$$

Nachdem der mögliche Volumenstrom gemessen wurde, kann die im Strömungskanal maximal und minimal vorhandene Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Dazu wird der Volumenstrom nach Gleichung (5.5) bis Gleichung (5.7) berechnet.

$$1 \cdot \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 1 \cdot \left[ \frac{l}{min} \right] \cdot \left[ \frac{0,001 \frac{m^3}{l}}{1/60 \frac{min}{s}} \right] \quad (5.5)$$

$$u_{Inlet} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d_{inlet}^2 \cdot \pi} \quad (5.6)$$

$$u_{Kanal} = \frac{\dot{V}}{b_K \cdot h_K} \quad (5.7)$$

In Tabelle 5.1 wurden die Geschwindigkeiten im Strömungskanal bei verschiedenen Größen des Querschnittes berechnet. Diese wurde mit der Berechnung der maximal erlaubten Geschwindigkeit, welche sich aufgrund der Reynoldszahl (Gleichung (5.8)) bei laminaren Bedingungen ( $Re=2300$ ) ergibt, verglichen.

Tabelle 5.1: Berechnungen der Geschwindigkeiten im Strömungskanal.

Daten: Auslitern der Pumpe des Umlaufthermostates		Strömungskanal			
% der maximalen Pumpenleistung des Umlaufthermostates [-]	geförderter Volumen pro Minute mit der eingestellten Pumpenleistung [l/min]	Höhe [m]	0,09	0,06	0,08
		Breite [m]	0,09	0,06	0,08
		u [m/s]			
7	1,8		0,0037	0,0083	0,0047
10	3,24		0,0067	0,0150	0,0084
12	5,16		0,0106	0,0239	0,0134
15	7,32		0,0151	0,0339	0,0191
20	7,68		0,0158	0,0356	0,0200
30	8,4		0,0173	0,0389	0,0219
40	8,4		0,0173	0,0389	0,0219
50	8,4		0,0173	0,0389	0,0219
60	8,4		0,0173	0,0389	0,0219
70	8,64		0,0178	0,0400	0,0225
Re_max	2300	u_max laminar	10,7333	16,1000	12,0750
nu	0,00056	dh	0,12	0,08	0,106667

Berechnung der dimensionslosen Reynoldszahl  $Re$  mit der Strömungsgeschwindigkeit  $u$ , der charakteristischen Länge  $l$ , in diesem Fall dem hydraulischen Durchmesser  $d_h$  (Gleichung (5.9)) des Strömungskanals und der dynamischen Viskosität des Fluids.

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \tag{5.8}$$

Der hydraulische Durchmesser  $d_h$  berechnet sich nach Gieck and Gieck (2005) in einem oben offenen Kanal, aus der mit Flüssigkeit gefüllten Querschnittsfläche  $A$  und dem mit Flüssigkeit benetzten Umfang wie folgt:

$$d_h = 4 \frac{A}{u} \tag{5.9}$$

### 5.1.4 Versuchsaufbau

Nachdem die Teile für den Strömungskanal in der hausinternen Werkstatt zugeschnitten wurden, wurden die Einzelteile zusammengeklebt. Nach der Aushärtung des Klebers wurde der Strömungskanal einer Dichtheitsüberprüfung unterzogen, um eventuell vorhandene Leckagen aufzuspüren.

Der Versuchsaufbau, wie in Abbildung 5.5 ersichtlich, besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- Dem Strömungskanal (1), welcher wiederum aus folgenden Komponenten besteht:
  - Dem Kanal mit Einlass zu Beginn und Überlaufwehr am Ende.
  - Der Aufhängung und Positionierung der Vorrichtung für die Temperatursensoren (Abbildung 5.6).
  - Den Vorrichtungen zur Anbringung der Pt100 Sensoren für die Messungen der Temperatur am Einlass, am Auslass, 100 mm vor dem Würfel und 100 mm nach dem Würfel.
  - Nach dem Überlaufwehr wurde eine Sammelstelle mit angebrachtem Schlauch installiert, um die Eintragung von Luftblasen in das Wasser zu vermindern. Diese würde durch die große Dichtedifferenz zwischen beiden Medien, bei der Einströmstelle in den Strömungskanal, das Strömungsfeld verzerren.
- Dem Umlaufthermostat (2), um die nötige Druckdifferenz durch die eingebaute Pumpe aufzubringen und um das Wasser auf die nötige Temperatur aufzuheizen und diese zu regeln.
- Dem Absperrventil (3), damit beim Ausschalten der Pumpe durch die Höhendifferenz zwischen Strömungskanal und Umlaufthermostat, nicht das Flüssigkeitsbecken des Umlaufthermostates überflutet wird und damit der Volumenstrom durch das teilweise Schließen besser einstellbar wird.
- Dem Rotameter (4) für die Kontrolle des indirekt, über die Pumpenleistung und dem Absperrventil, eingestellten Volumenstroms.
- Dem Septum für die Einspritzung von Lebensmittelfarbe (5), um das Strömungsfeld des Experimentes grob mit jenem der Simulation zu vergleichen.
- Der mobilen Vorrichtung (6) zur genauen Positionierung der Pt1000-Temperatursensoren. Durch die Temperatursensoren wird das Kartoffelstück ebenfalls positioniert.
- Den Thermometern (7) für die analog- digital Umwandlung der Messsignale der Pt100-Elemente mit den vier Positionen (7.1)
- Dem Schaltkasten (8) zum Anschließen der Pt1000-Elemente und für die analog-digital Umwandlung der Messsignale.

- Mehreren Schläuchen (9) zur Verbindung der Einbauten Umlaufthermostat-Absperrventil, Absperrventil-Rotameter und Rotameter-Strömungskanal.

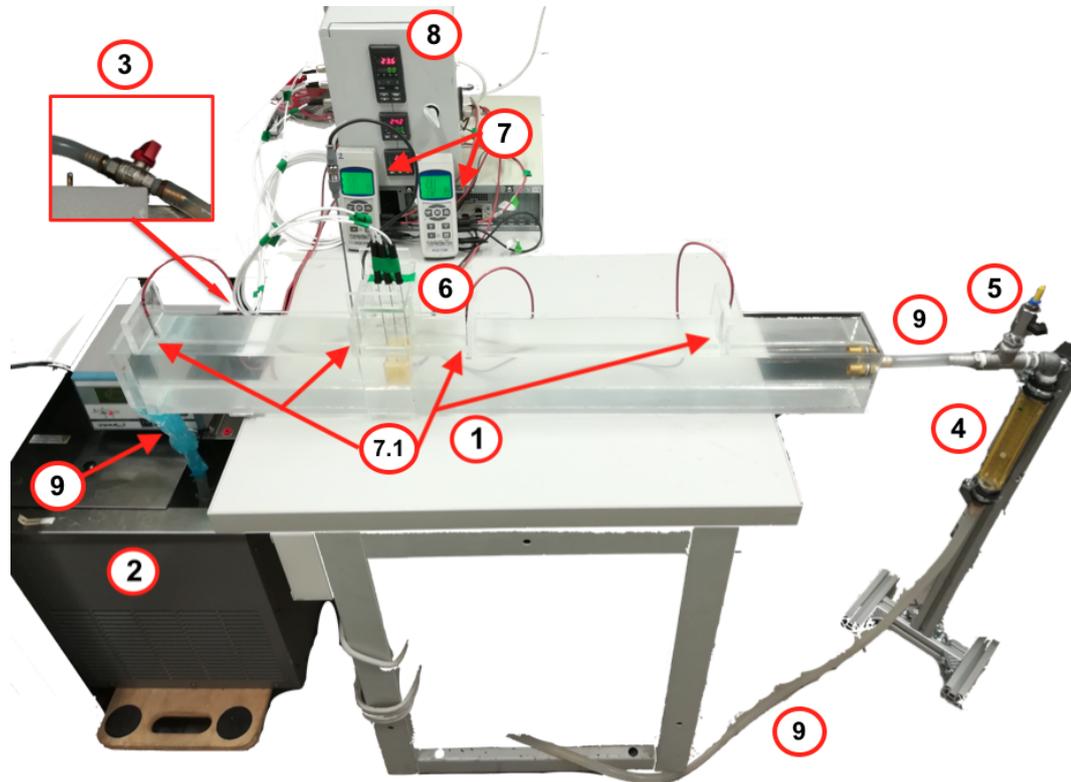
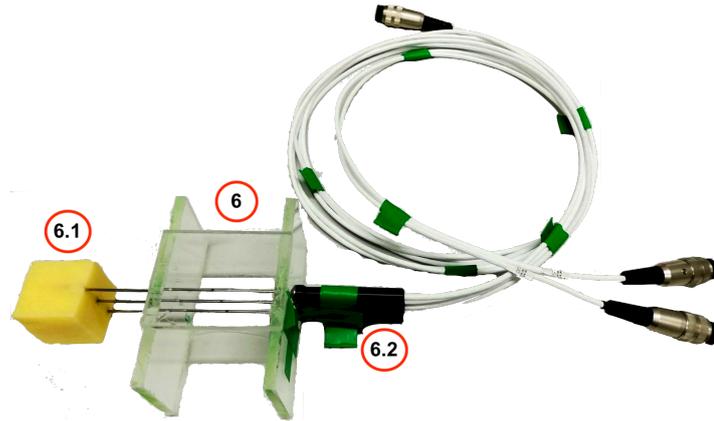
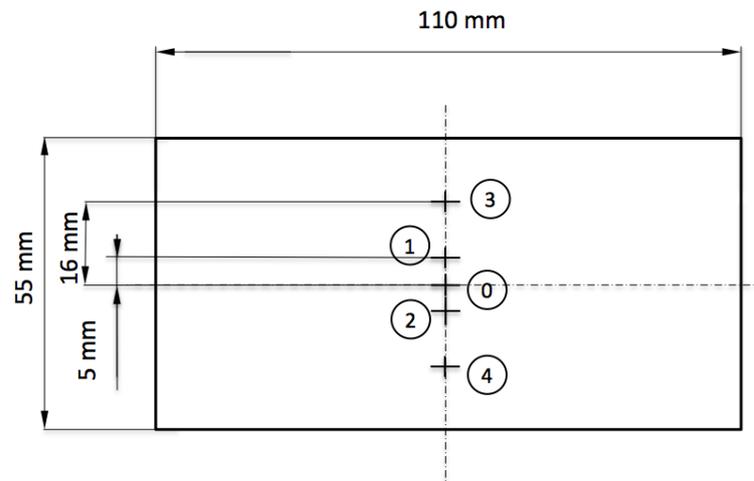


Abbildung 5.5: Aufbau des Experimentes zur Validierung des Schmelz- und Aufheizvorganges. Mit dem Strömungskanal (1), dem Umlaufthermostat (2), dem Absperrventil (3), dem Rotameter (4), dem Septum für die Einspritzung von Lebensmittelfarbe (5), der mobilen Vorrichtung (6), den Thermometern (7) und den Messpositionen der Pt100 Elemente (7.1), dem Schaltkasten (8) und dem Schlauch (9) zur Verbindung der Komponenten (1)-(2), (2)-(3), (3)-(4), (4)-(1) und (1)-(2).

Die Vorrichtung zur genauen Positionierung der Temperatursensoren (6) (siehe Abbildung 5.6) hat die Aufgabe, den Kartoffelwürfel (6.1) an seiner Position zu halten, die Sensoren (6.2) richtig zu positionieren und alle mechanischen Kräfte aufzunehmen, welche durch die Kabel auf die Sensoren wirken. Zur Minimierung des Biegemoments wurde der Abstand vom Kabel zur ersten Lochplatte so kurz wie möglich gehalten, damit der im Durchmesser nur 1,6 mm betragende Sensorstab so gering wie möglich belastet wird.



(a) Vorrichtung (6) zur Positionierung der Temperatursensoren (6.2) und des Kartoffelstückes (6.1).



(b) Exakte Positionen der Sensoren in beiden Lochplatten der Vorrichtung (6). Mit den Positionen für die Löcher der Temperatursensoren (0), für den Sensor für die Mitte des Würfels, (1) & (2), für die Sensoren, die jeweils 5 mm vom Mittelpunkt versetzt sind, (3) & (4), für die Sensoren, die jeweils 16 mm von der Mitte versetzt sind.

Abbildung 5.6: Zusammengebauete Vorrichtung zur Fixierung des Kartoffelstückes und Konstruktion der Lochplatte zur Positionierung der Sensoren.

Der Würfel wird auf der Vorrichtung (6) positioniert, indem die Mittelachse und der Mittelpunkt einer Fläche des Würfels angezeichnet werden. Die Sensoren (6.2) werden jeweils bis zu einer Tiefe von 18 mm in das Kartoffelstück gedrückt und bis zum Ende der Sensorstäbe durch die Löcher geführt. Wenn alle drei Sensoren (6.2) auf der oberen Lochplatte aufliegen, werden diese durch ein Klebeband in ihrer Position fixiert. Danach muss der gesamte Aufbau (6) eingefroren werden.

Insgesamt wurde an sieben Stellen eine Temperaturmessung durchgeführt. Drei Sensoren wurden im Würfel positioniert, ein Sensor wurde in der Nähe vom Einlass, einer beim Überlaufwehr, einer 100 mm vor dem Würfel und einer 100 mm nach dem Würfel positioniert. In Tabelle 5.2 werden die Positionen, gemessen vom Beginn des Strömungskanals, aufgelistet. Die Einlasstemperatur ist für die Randbedingung für das *Inlet* in der Simulation nötig. Die Auslasstemperatur dient zur Überprüfung der in der Simulation berechneten Temperatur am *Outlet*. Die jeweils vom Würfel 100 mm entfernten Sensoren, sind analog dazu für den verkürzten Strömungskanal nötig.

Tabelle 5.2: Verwendete Sensortypen und Messstellen.

Bezeichnung des Sensors	Messstelle [mm]	Bemerkung
Pt_1000 vorne	631	im Würfel
Pt_1000 mitte	646	im Würfel
Pt_1000 hinten	661	im Würfel
Pt_100 2_T1	120	im Strömungskanal
Pt_100 2_T2	992	im Strömungskanal
Pt_100 3_T1	528	im Strömungskanal
Pt_100 3_T2	764	im Strömungskanal

### 5.1.5 Versuchsdurchführung

Um die Abhängigkeit des Aufwärmvorganges von der Fluidtemperatur und von der Fluidgeschwindigkeit zu bestimmen, werden verschiedene Fluidtemperaturen und Volumenströme definiert, welche untereinander variiert werden (Tabelle 5.3). Dabei soll herausgefunden werden, wie signifikant der Einfluss der jeweiligen Parameter ist. Ein höherer Volumenstrom als 1,6l/min führt zu einer Wellenbewegung an der Wasseroberfläche, weshalb der maximale Volumenstrom mit diesem Wert begrenzt wird.

Tabelle 5.3: Versuchskombinationen für die Validierung des Aufwärmvorganges.

Versuchsnummer	u [l/min]	T [°C]
1	1,6	37
2	0,8	37
3	1,6	47
4	0,8	47
5	1,6	23
6	0,8	23

Die Versuche wurden mittels Videos aufgezeichnet, um die exakten Startzeitpunkte der jeweiligen Messungen festzuhalten. Weitere Vorteile dieser Methode sind, dass in einem interessanten Bereich der Funktion, z.B. Unstetigkeitsstelle, Wendepunkte, etc., Messpunkte hinzugefügt werden können. Dadurch kann die Aufwärmkurve schrittweise genauer aufgelöst werden. Zusätzlich kann durch die Videos ausgewertet werden, wie lange die Totzeit zwischen Tiefkühlschrank und Laboraufbau ist und wie viel Zeit das Anschließen der Sensoren und die richtige Positionierung des Kartoffelwürfels in Anspruch nimmt. Die Ablesegenauigkeit liegt bei dieser Auswertungsmethode ca. bei +/- 0,5 s. Dies ergibt eine enorme Verbesserung im Vergleich zur manuellen Aufzeichnung.

### 5.1.6 Ergebnisse der Experimente

Bevor die gemessenen Temperaturen ausgewertet werden können, müssen diese um das Offset der Temperatursensoren korrigiert werden.

#### Korrektur des Offsets der verwendeten Sensoren

Für die Korrektur des Offsets der Temperatursensoren wurde im Bereich von 10 °C bis 50 °C mit dem Umlaufthermostat in 10 °C-Schritten die Temperatur eingestellt. Anschließend wurde die angezeigte Temperatur, der für das Experiment verwendeten Sensoren, verglichen (Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8, Messwerte siehe Anhang C). Da die Außentemperatur höher beziehungsweise niedriger als die Fluidtemperatur im Schlauch ist, kommt es durch den Temperaturgradienten zu einem positiven bzw. negativen Wärmetransport in das Fluid. Je höher die Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Fluidtemperatur ist, desto stärker wird sich das Fluid aufwärmen bzw. abkühlen. Die Messung ist erforderlich um die Messdifferenz zwischen den Sensoren zu beseitigen. Sie ist jedoch keine Kalibrierung dieser.

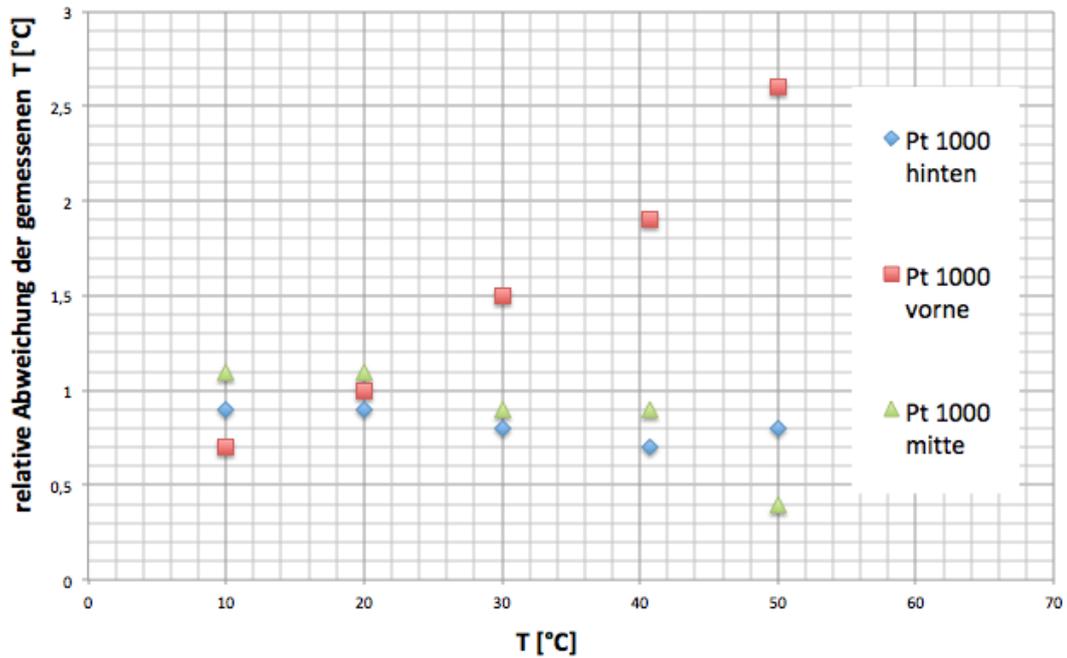


Abbildung 5.7: Relative Temperaturabweichung der Pt1000-Elemente, welche für die Temperaturmessung in der Kartoffel verwendet wurden, von der am Umlaufthermostat eingestellten Temperatur. Die Legende vorne, mitte, hinten, zeigt die Position der Sensoren von der angeströmten Seite aus an.

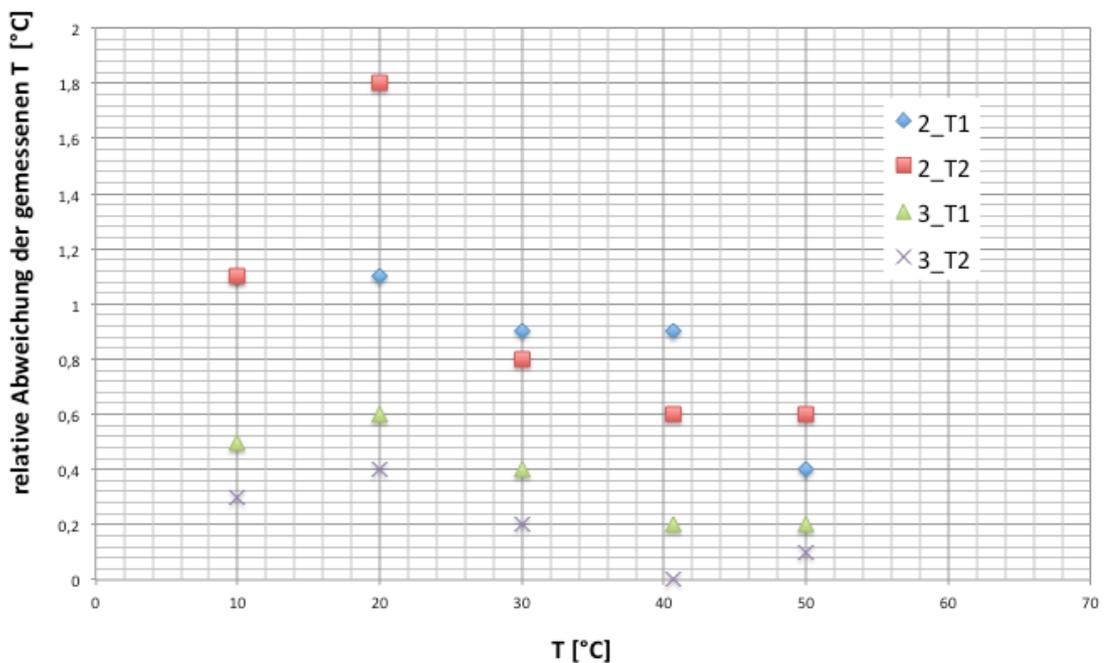


Abbildung 5.8: Relative Temperaturabweichung der Pt100-Elemente, welche für die Temperaturmessung in der Kartoffel verwendet wurden, von der am Umlaufthermostat eingestellten Temperatur. Es wurden die Messgeräte mit der Nummer 2 und 3 verwendet, T1 bzw. T2 geben den jeweiligen Eingang des Messsignals an.

Nach der Durchführung der Messungen werden die Funktionen der Abweichungen ermittelt und durch die entsprechenden Funktionen beschrieben. Bis auf den Pt1000-Temperatursensor vorne und dem Pt100-Temperatursensor am Messgerät 2 an der Messposition T2, ist keine eindeutige Tendenz festzustellen. Daher wurde für alle anderen Sensoren der Mittelwert der Abweichung als Korrekturwert festgelegt. Eine lineare Funktion dient als Korrektur. Für die Sensoren ergeben sich daher, die in Tabelle 5.4 berechneten Werte als Korrekturwerte.

Tabelle 5.4: Berechnete Funktionen für die Korrektur des Offsets der Temperatursensoren.

Bezeichnung des Sensors	Korrekturfunktion
Pt_1000 vorne	$T_{\text{richtig}} = 0,047 \cdot (T_{\text{gemessen}} - 273,15 \text{ °C}) + 0,13 \text{ °C}$
Pt_1000 mitte	$T_{\text{richtig}} = T_{\text{gemessen}} + 1,24 \text{ °C}$
Pt_1000 hinten	$T_{\text{richtig}} = T_{\text{gemessen}} + 0,82 \text{ °C}$
Pt_100 2_T1	$T_{\text{richtig}} = T_{\text{gemessen}} + 0,88 \text{ °C}$
Pt_100 2_T2	$T_{\text{richtig}} = -0,022 \cdot (T_{\text{gemessen}} - 273,15 \text{ °C}) + 1,64 \text{ °C}$
Pt_100 3_T1	$T_{\text{richtig}} = T_{\text{gemessen}} + 0,38 \text{ °C}$
Pt_100 3_T2	$T_{\text{richtig}} = T_{\text{gemessen}} + 0,2 \text{ °C}$

Für die Validierung wurden, wie in Abbildung 5.6 ersichtlich, die Temperaturen im Fruchtstück auf der angeströmten Seite, auf der gegenüberliegenden Seite und im Mittelpunkt durch die Pt1000-Elemente aufgezeichnet, die Temperatur am Einlass und beim Überlauf durch die Pt100-Elemente.

Da die Temperatursensoren korrigiert wurden, können die Messergebnisse der Experimente mit den Versuchsnummern 1 bis 6 (Tabelle 5.3) korrekt ausgewertet werden. Die Abbildung 5.9 bis Abbildung 5.14 zeigen die Aufwärmkurven an den drei gemessenen Temperaturen im Würfel, sowie die gemessene Temperatur am Einlass und am Auslass. Die genauen Werte sind in Anhang D nachzulesen.

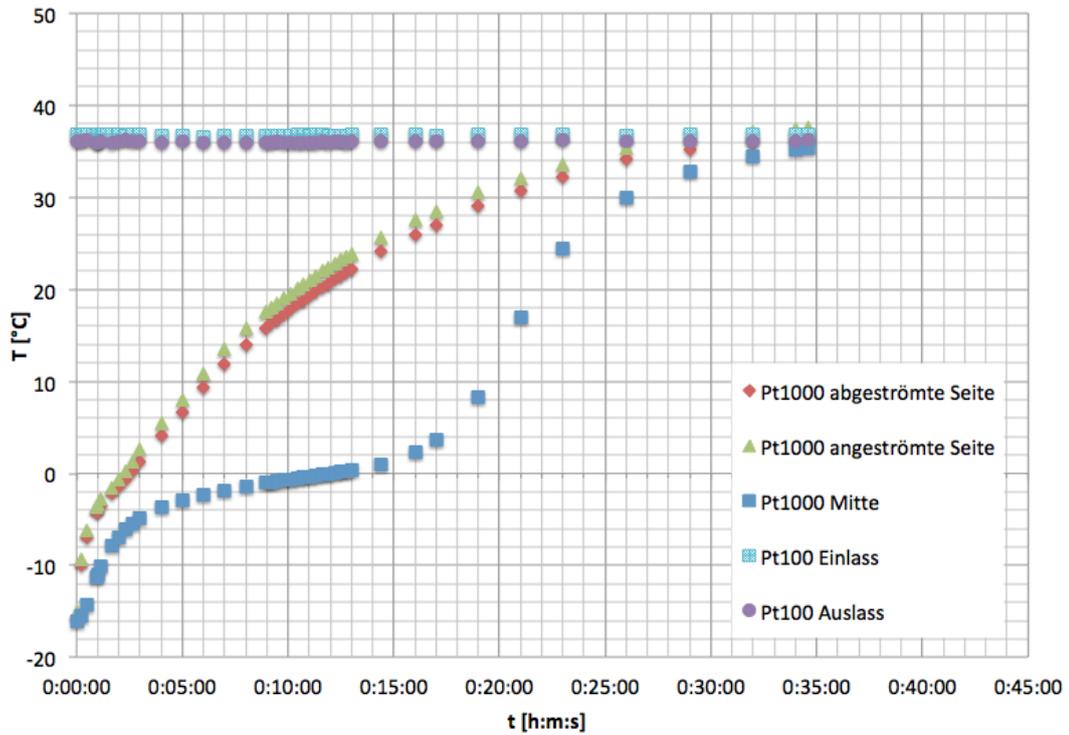


Abbildung 5.9: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 1 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 37 °C am Einlass, Volumenstroms = 1,6 l/min am Einlass).

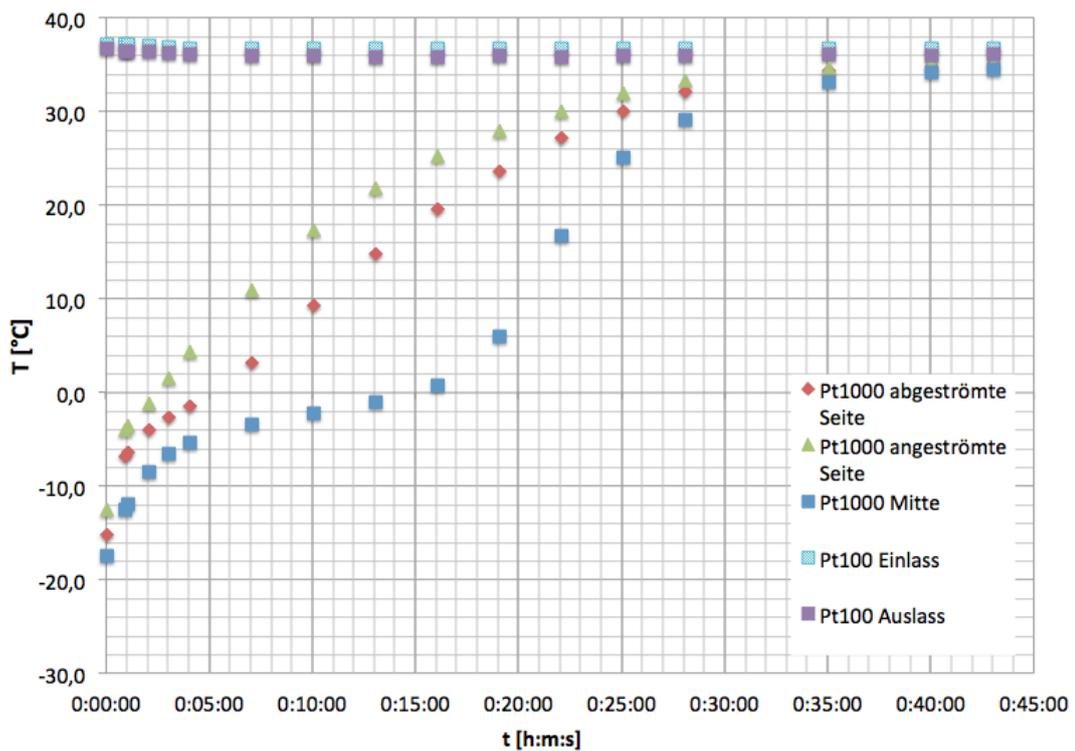


Abbildung 5.10: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 2 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 37 °C am Einlass, Volumenstroms = 0,8 l/min am Einlass).

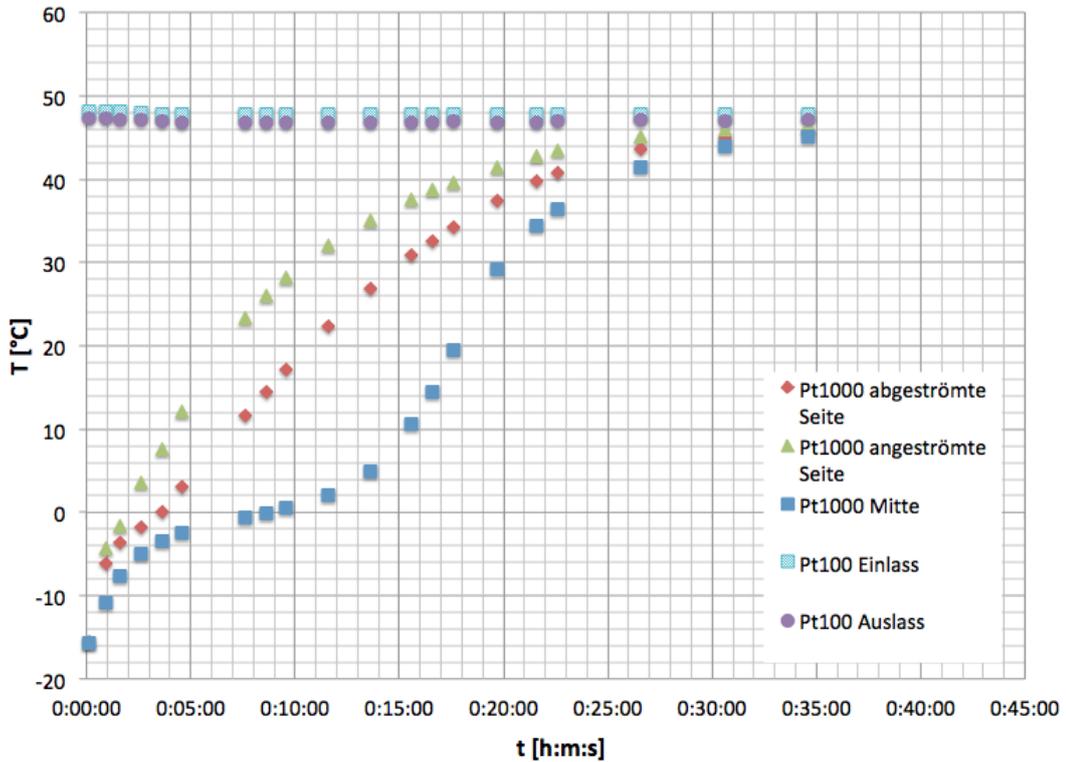


Abbildung 5.11: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 3 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 47 °C am Einlass, Volumenstroms = 1,6 l/min am Einlass).

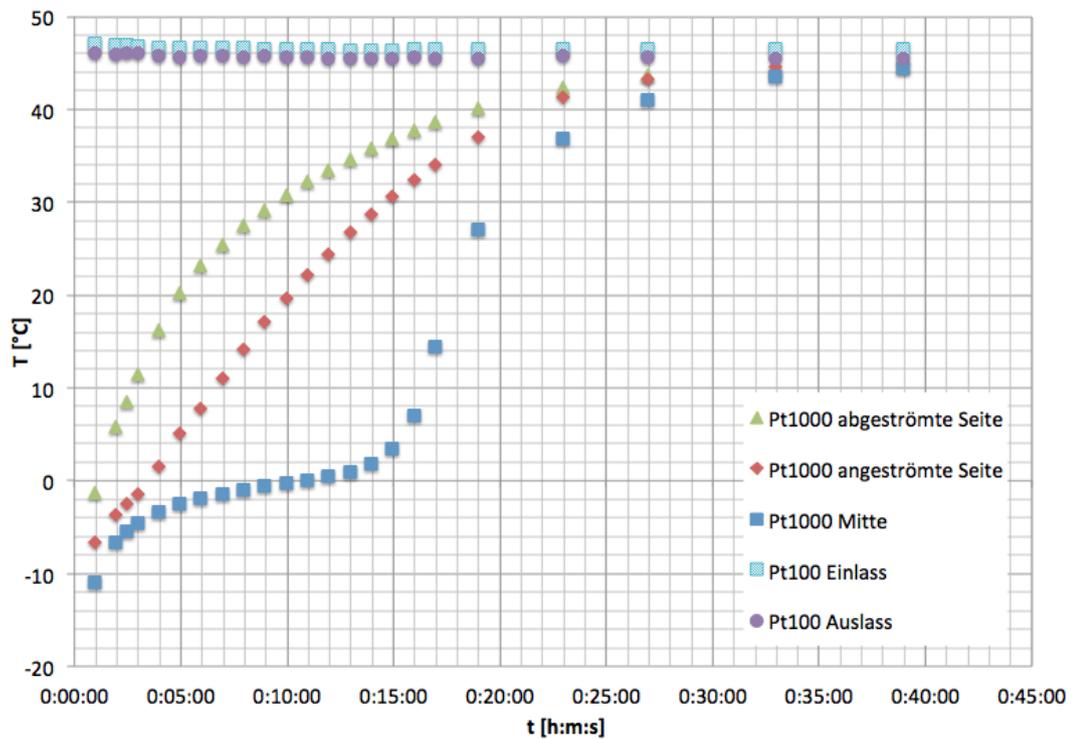


Abbildung 5.12: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 4 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 47 °C am Einlass, Volumenstroms = 0,8 l/min am Einlass).

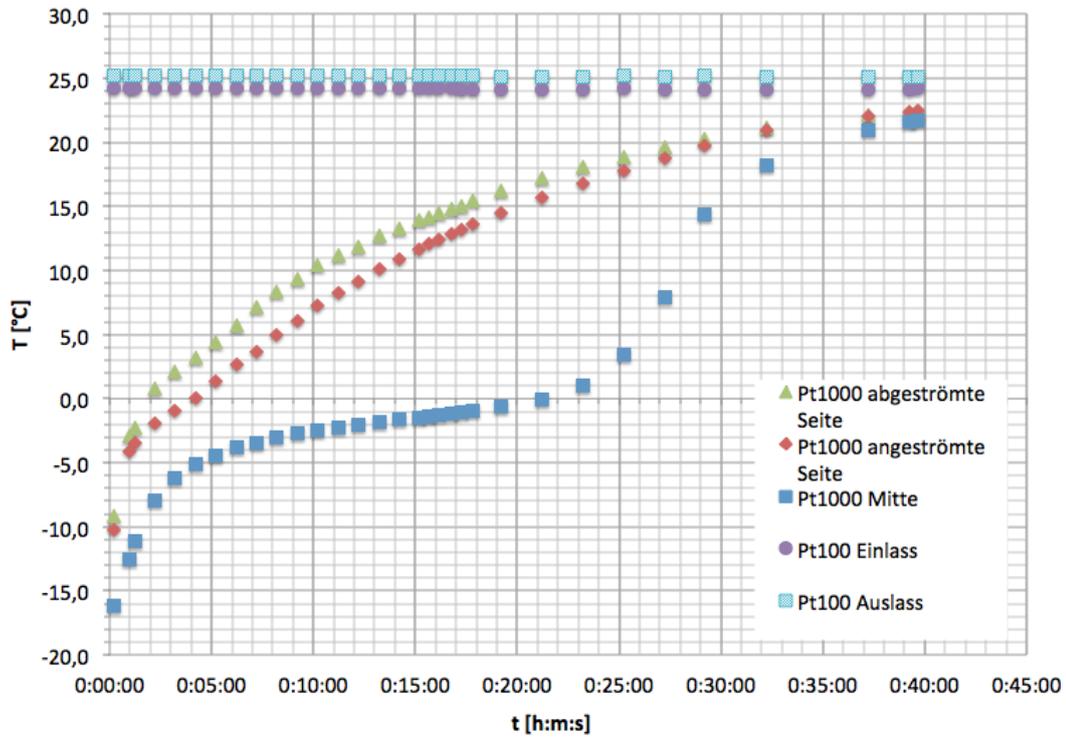


Abbildung 5.13: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 5 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 23 °C am Einlass, Volumenstroms = 1,6 l/min am Einlass).

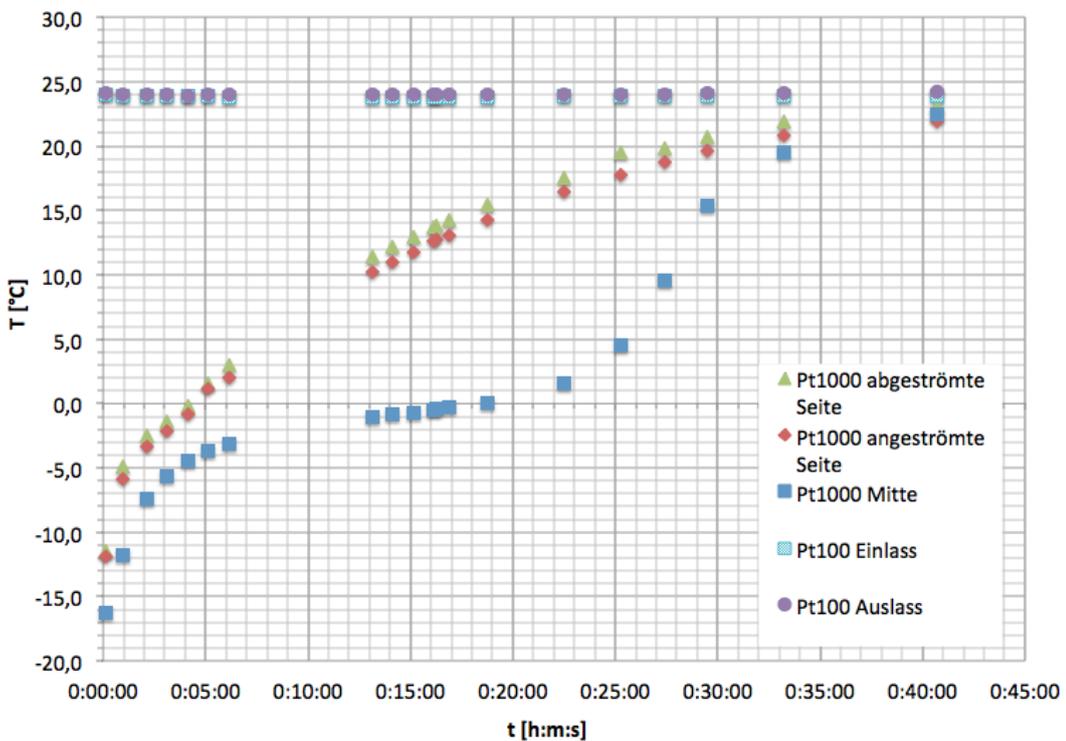


Abbildung 5.14: Aufwärmvorgang eines Kartoffelwürfels, entspricht Experiment Nr. 6 in Tabelle 5.3 (Fluidtemperatur = 23 °C am Einlass, Volumenstroms = 0,8 l/min am Einlass).

Bei den Messergebnissen lässt sich eine Ähnlichkeit im Verlauf der jeweiligen Kurven erkennen. Der Bereich des Auftauens ist bei der Aufwärmkurve in der Mitte des Würfels am besten erkennbar. Da zuerst der simulierte Auftauprozess validiert werden soll, wird die Aufwärmkurve in der Mitte für die Validierung herangezogen. Die Temperaturkurven von den Sensoren *angeströmte Seite* und *abgeströmte Seite* sind für die Aussage über den Einfluss der Anströmgeschwindigkeit und der Fluidtemperatur auf die Verschiebung des kältesten Punktes nötig. Die Temperaturfunktionen der Sensoren Pt100-Einlass und Pt100-Auslass werden für das Setzen der richtigen Boundary Conditions benötigt.

Für die Erhaltung der Fehlerbalken, also jenem Bereich in dem die Messungen bei selben Randbedingungen im Strömungskanal schwanken, wurden vier unterschiedlich lange eingefrorenen Kartoffelwürfel, mit der Seitenlänge von je 36 mm, bei einer Temperatur von 47°C und einem Volumenstrom von 1,6l/min aufgewärmt (Tabelle 5.5). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 dargestellt.

Tabelle 5.5: Versuchskombinationen für die Bestimmung der Fehlerbalken für das Experiment 3 in Tabelle 5.3.

Versuchsnummer	u [l/min]	T [°C]	Lagerdauer im Tiefkühlschrank [h]
V1	1,6	47	500
V2	1,6	47	48
V3	1,6	47	24
V4	1,6	47	24

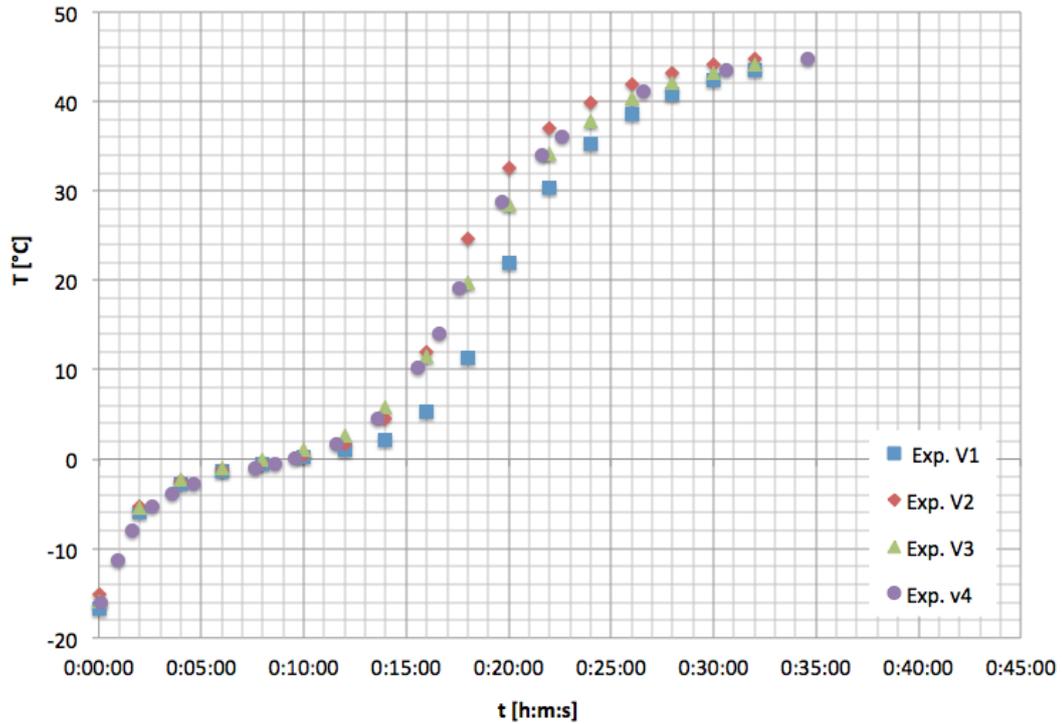


Abbildung 5.15: Aufwärmkurven unter gleichen Bedingungen, Fluidtemperatur von 47 °C und einem Volumenstrom von 1,6 l/min am Einlass, von mehreren unterschiedlich lange eingefrorenen Kartoffelstücken. Experiment V1 war 3 Wochen eingefroren, Experiment V2 48 h und Experiment V3 und Experiment V4 waren 24 h eingefroren.

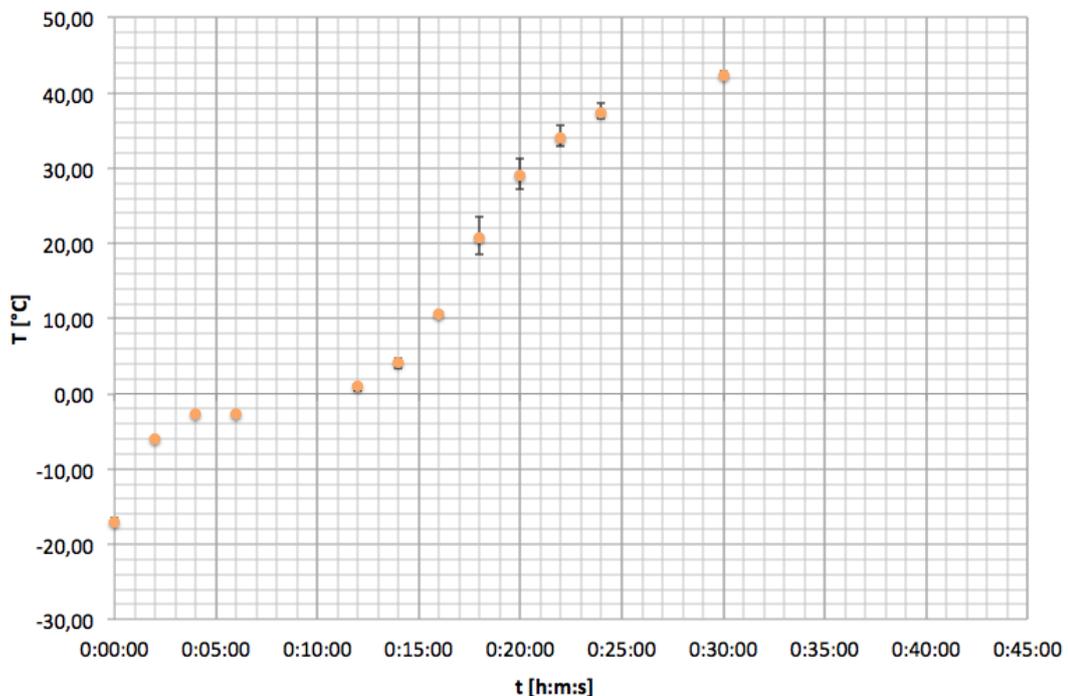


Abbildung 5.16: Mittelwert der Experimente V1, V2, V3 und V4 mit den Fehlerbalken für die jeweilige Messung.

Die Aufwärmkurve von Experiment V1 zeigt eine deutliche Abweichung von den anderen, weshalb diese bei der Ermittlung der Fehlerbalken vernachlässigt wurde. Auffallend ist, dass alle Kurven bis kurz nach dem Schmelzen in einem kleinen Toleranzbereich von 1 °C liegen und alle bis auf Experiment 1 bis ca. 15 °C in einem Toleranzbereich von 4 °C liegen. Experiment 3 und 4 liegen sogar darüber wiederum in einem Toleranzbereich von 1 °C. Dies zeugt von ausreichend zuverlässigen und reproduzierbaren Messungen. Die Dauer der Lagerung im Tiefkühlschrank dürfte jedoch einen großen Einfluss haben. Es wurde jedoch nicht ermittelt, wie oft der Tiefkühlschrank bei den jeweiligen Experimenten in der Verweilzeit geöffnet wurde. Dies sollte jedoch nur einen geringen Einfluss haben, da die Temperatur nur kurzfristig abfällt.

In Abbildung 5.17 wurden die Aufwärmkurven der Mittelpunkte bei den verschiedenen Experimenten verglichen, um den Einfluss der Fluidtemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Die Fluidtemperatur hat bei allen Experimenten einen signifikanten Einfluss, die Fluidgeschwindigkeit hat bei 23 °C keinen signifikanten Einfluss, bei 37 °C ist ein signifikanter Einfluss über den gesamten Bereich der Aufwärmkurve festzustellen und bei 47 °C hat sie diesen zwischen 0 °C und 20 °C, später jedoch nicht mehr.

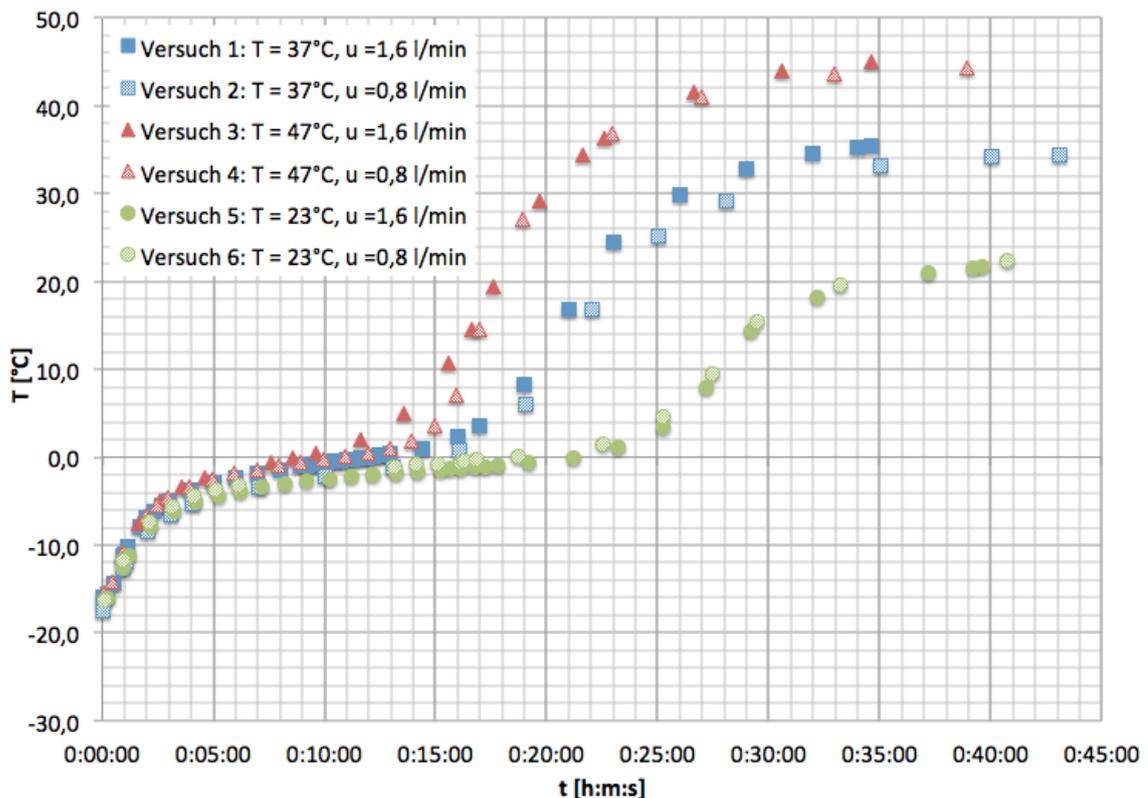


Abbildung 5.17: Vergleich der Temperaturen im Mittelpunkt der Kartoffelstücke bei verschiedenen Fluidtemperaturen von 23 °C, 37 °C und 47 °C zur Erstellung der Fehlerbalken für das Experiment 3 in Tabelle 5.5.

## 5.2 Simulation des Auftauvorganges

Nachdem die Experimente durchgeführt wurden, muss nun das Experiment simuliert werden. Dafür benötigt man einige Stoffwerte, welche aus der Literatur entnommen werden müssen. Für die Simulation wurde für die Flüssigkeit Wasser verwendet und für den Feststoff kubisch geschnittene Kartoffeln.

### 5.2.1 Verwendete Stoffwerte

In der Literatur wurden für die *Kartoffel spät*, die in Tabelle 5.6 ersichtlichen Werte gefunden.

Tabelle 5.6: Stoffwerte für Kartoffel spät

Stoffwert	Wert	Einheit
$c_{p, <0^{\circ}\text{C}}$	1800	J/(kg · K) *
$c_{p, >0^{\circ}\text{C}}$	3430	J/(kg · K) *
$h_{\text{schmelz, Kartoffel}}$	255 000	J/kg *
$c_{p, \text{melting}}$	85 000	J/(kg · K)
$\rho_{\text{Kartoffel}}$	1092,3	kg/m <sup>3</sup>

\* Entnommen aus ASHRAE (2006)

Damit in *OpenFOAM* eine  $c_p$ -Funktion dargestellt werden kann (siehe Kapitel 2), wird die Schmelzenthalpie  $h_{\text{schmelz, Kartoffel}}$  durch den definierten Schmelzbereich von 3 °C dividiert.

Der Wert der spezifischen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für die *Kartoffel spät* wurde in der Literatur nicht gefunden. Aus diesem Grund musste er aus der Temperaturleitfähigkeit berechnet werden. Diese hat die Gleichung (5.10).

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (5.10)$$

$$a_{\text{Kartoffel}} = 5,6 \text{ m}^2/\text{h} \cdot 10^{-4}$$

Aus der gegebenen Temperaturleitfähigkeit, der Dichte und den spezifischen Wärmekapazitäten vor und nach dem Auftauen, ergeben sich nach der Umformung der Gleichung (5.10) folgende spezifische Wärmeleitfähigkeiten.

$$\lambda_{<0^{\circ}\text{C}} = 0,5828 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\lambda_{>0^{\circ}\text{C}} = 0,3058 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

### Wasser

Für die Stoffwerte von Wasser sind sehr gute Daten in Wärmeatlas (1997) zu finden. Somit können für die Flüssigkeit über den Arbeitsbereich der Temperatur Funktionen gebildet werden. Dazu müssen im gesamten Temperaturbereich, in dem die Simulation stattfinden soll, die Stoffwerte ermittelt werden. Danach wird eine Funktion mittels Excel aufgestellt und die Trendlinie muss möglichst genau angepasst werden (siehe Abbildung 5.18). Es ist zu beachten, dass bei den Koeffizienten mit höheren Potenzen eine genaue Ermittlung notwendig ist. Die Funktion der Stoffwerte ist von der Temperatur abhängig, da diese wegen *OpenFoam* in Kelvin erstellt werden muss. Bei zu wenig signifikanten Stellen kann es zu großen Abweichungen kommen.

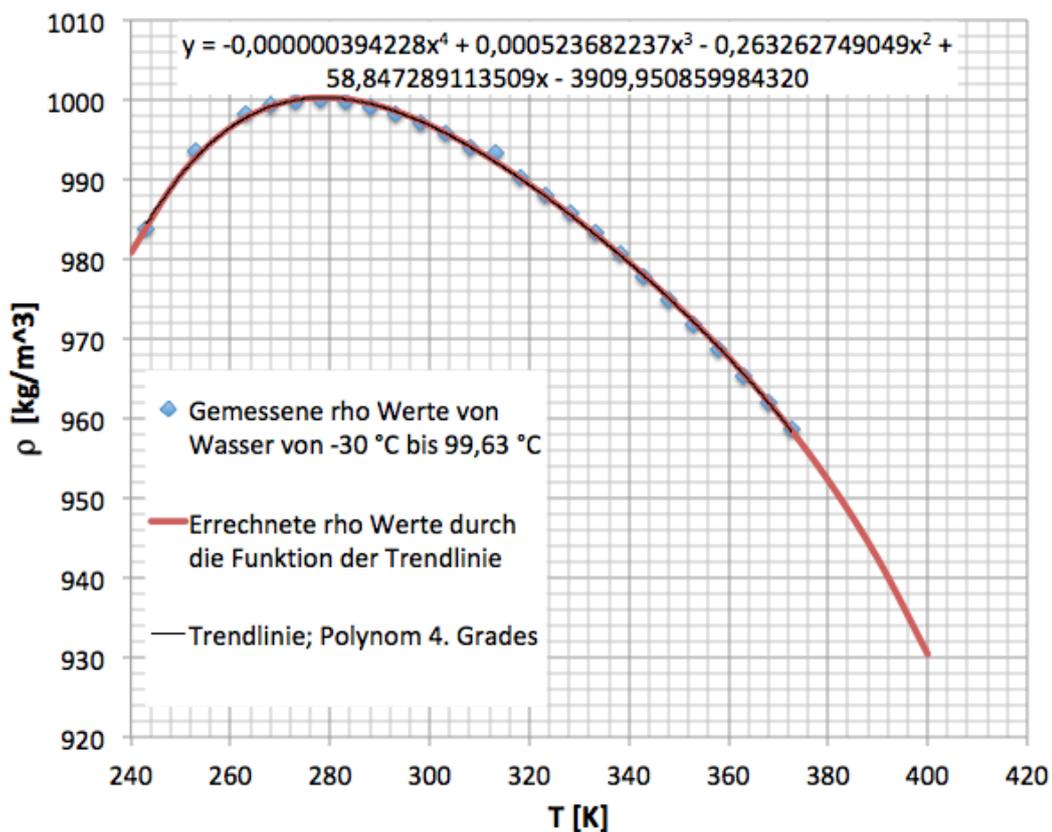


Abbildung 5.18: Verlauf der  $\rho$ -Funktion von Eis und Wasser zwischen  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $99,63^{\circ}\text{C}$ . Aus dem VDI- Wärmeatlas entnommene und berechnete Funktion der Dichteänderung von Wasser als Funktion der Temperatur bei 1 bar Druck.

Da nicht der gesamte Temperaturbereich der im VDI-Wärmeatlas dargestellten Werte von Relevanz für die Simulation ist, wird der Temperaturbereich

eingeschränkt und ein Arbeitsbereich definiert. Dieser umfasst den Bereich von  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (258 K) bis  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (353 K) und ist nötig, um die Funktion bei diesem Bereich auf die gegebenen Werte zu optimieren. Außerhalb des Arbeitsbereiches kann die Funktion erheblich von den realen Werten abweichen. Für einen anderen Temperaturbereich muss die Funktion wiederum angepasst werden. Für die Dichte, die dynamische Viskosität und die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Wasser, ergeben sich die in Tabelle 5.7 aufgelisteten Koeffizienten für die jeweilige Funktion.

Tabelle 5.7: Koeffizienten für die auf den Arbeitsbereich optimierten Funktionen von  $\rho_{\text{Wasser}}$ ,  $\mu_{\text{Wasser}}$  und  $c_{p, \text{Wasser}}$ .

Funktion von	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
$\rho_{\text{Wasser}}$	$-3,9100 \cdot 10^3$	$5,8847 \cdot 10^1$	-0,26326	$5,2368 \cdot 10^{-4}$	$-3,9423 \cdot 10^{-7}$
$\mu_{\text{Wasser}}$	$8,0525 \cdot 10^{-2}$	$-6,7022 \cdot 10^{-4}$	$1,8789 \cdot 10^{-6}$	$-1,7664 \cdot 10^{-9}$	-
$c_{p, \text{Wasser}}$	$5,2353 \cdot 10^3$	-6,7626	$1,08 \cdot 10^{-2}$	-	-

*Anmerkung: Da bei der Funktion der Dichte von Wasser ein Wert von  $1 \cdot 10^4$  erwartet wird, muss der Koeffizient  $k_4$  mindestens bis zu dem Zahlenwert von  $10^{-11}$  angegeben werden, um ausreichende Genauigkeit bei der Berechnung der Funktion zu liefern.*

Nun werden die ermittelten Koeffizienten der Funktionen im Case in `./constant/liquidF/thermophysicalProperties` eingegeben (siehe Abbildung 5.19).

```

/*-----*- C++ -*------*/
|=====|
| \ \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ \ / O p e r a t i o n | Version: v3.0+
| \ \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com
| \ \ \ / M a n i p u l a t i o n |
|=====|
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       thermophysicalProperties;
}
// *****
// Temperature dependent power law:
// *****\
mu = (muTempCoeffs<0> + muTempCoeffs<1>*T + ...)*pow(shearRate, muPowerLawExp-1)
muMin -> lower viscosity bound
muMax -> upper viscosity bound
\*****/

thermoType
{
  type          heRhoThermo;
  mixture       pureMixture;
  transport     tempPowerLaw;
  thermo        hPolynomial;
  equationOfState icoPolynomial;
  specie        specie;
  energy        sensibleInternalEnergy;
}

mixture
{
  specie
  {
    nMoles      1;
    molWeight    50;
  }
  equationOfState
  {
    rhoCoeffs<8>  (-3910 58.85 -0.263263 0.00052368 -0.00000039423 0 0 0);
  }
  thermodynamics
  {
    Hf          0;
    Sf          0;
    CpCoeffs<8> (5235.3 -6.7626 0.0108 0 0 0 0 0);
  }
  transport
  {
    muPowerLawExp  1;
    muMin          0.0001;
    muMax          1000;
    muTempCoeffs<8> (0.08053 -0.0006702 0.0000018789 -0.0000000017664 0 0 0 0);
    kappaCoeffs<8> (0.5562 0 0 0 0 0 0);
  }
}

// *****

```

Abbildung 5.19: *Thermophysical Properties* mit den ermittelten Funktionen für die Simulation des Aufwärmvorgangs des Experimentes.

Da der Strömungskanal 992 mm lang ist, wird die Multiphase-Simulation zuerst nur am Endstück des Strömungskanals getestet.

Die Boundary Conditions für diesen Case sind sehr einfach gehalten:

- inlet
- outlet
- wall
- atmosphere

## Kartoffel

Im Gegensatz zu der verwendeten Flüssigkeit, sind für den Feststoff nicht genügend Daten vorhanden, um für sie eine Funktionen zu bilden. Deshalb müssen konstante Stoffwerte für die Simulation verwendet werden. Die Werte der spezifischen Wärmekapazität und die anderen aufgelisteten Stoffwerte in Tabelle 5.8 wurden Kühn (2018) entnommen. Dabei kann man drei Fälle von Kartoffeln unterscheiden: *Kartoffel spät*, *Kartoffel früh* und *Kartoffel-süß*, wobei Kartoffel-süß nicht im Experiment verwendet wurde. *Kartoffel spät* und *Kartoffel früh* unterscheiden sich durch den Zeitpunkt der Ernte.

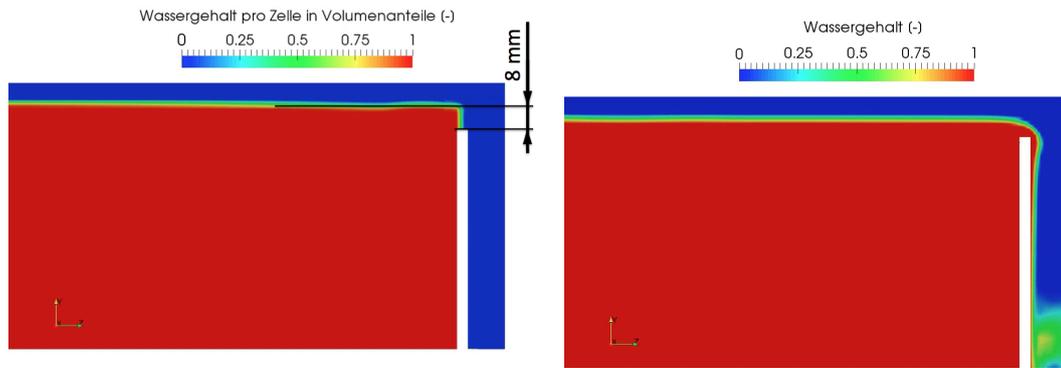
Tabelle 5.8: *Lagerungsbedingungen und Stoffeigenschaften von Kaltlagergütern* nach Kühn (2018). Mit  $c_{p, > 0\text{ °C}}$ , der spezifischen Wärmekapazität vor dem Gefrieren,  $c_{p, < 0\text{ °C}}$ , der spezifischen Wärmekapazität nach dem Gefrieren,  $h_f$ , der Schmelzenthalpie,  $t_{\text{Lagerung}}$ , der Lagerungszeit (W = Wochen, M = Monate),  $F_a$ , der Feuchtigkeitsausscheidung in g/(kg d) und  $\varphi_r$ , der relativen Feuchte in m%.

Kartoffel- sorte	$\varphi_r$ in %	$c_{p, > 0\text{ °C}}$	$c_{p, < 0\text{ °C}}$	$h_f$	$t_{\text{Lagerung}}$	$F_a$ bei 0 °C	Wasser- % gehalt
spät	85 - 90	3430	1800	255000	6 - 9 M	0,14	76
früh	85 - 90	3560	1840	270000	1 - 6 W	-	81,2
süß	65 - 90	3140	1670	225000	4 - 6 M	-	68,5

Die Feuchtigkeitsausscheidung in g/(kg d) bei 0 °C könnte einen Einfluss auf das Aufwärmverhalten haben, da die ausgeschiedene Feuchtigkeit nach dem Auftauvorgang nicht in der Kartoffel vorhanden ist und somit die spezifische Wärmekapazität senkt. Da die Experimente Anfang März durchgeführt wurden und die Kartoffeln bereits länger gelagert waren, ist die Wärmekapazität wahrscheinlich geringer, als in der Literatur angegeben.

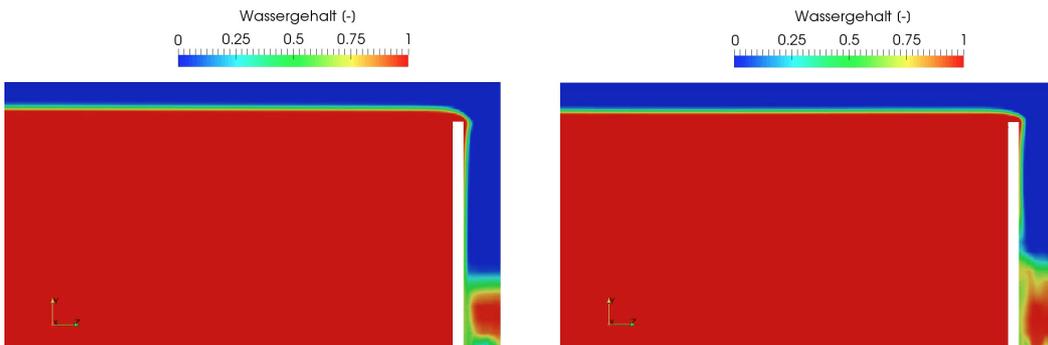
### 5.2.2 Simulation der Pegelhöhe

Damit die Pegelhöhe des Strömungskanals bei unterschiedlichen Einströmgeschwindigkeiten einfach ermittelt werden kann, wird ein Multiphase-Case mit den gewonnenen Erkenntnisse in Abschnitt 4.4 aufgebaut. Die Geometrie wurde an den Strömungskanal angepasst, vernetzt und simuliert. Durch die Simulation des Strömungskanals, wird die Pegelhöhe berechnet (Abbildung 5.20) und anschließend mit den Berechnungen in Gleichung (5.2) verglichen.



(a) Durch setFields wird das Wasser im Kanal auf eine Gesamthöhe von 94 mm über dem Boden des Strömungskanals gesetzt.

(b) Durch den hydrostatischen Druck, der sich durch das überstehende Wasser ergibt, beginnt das Wasser über das Wehr in Richtung des Abflusses zu fließen.



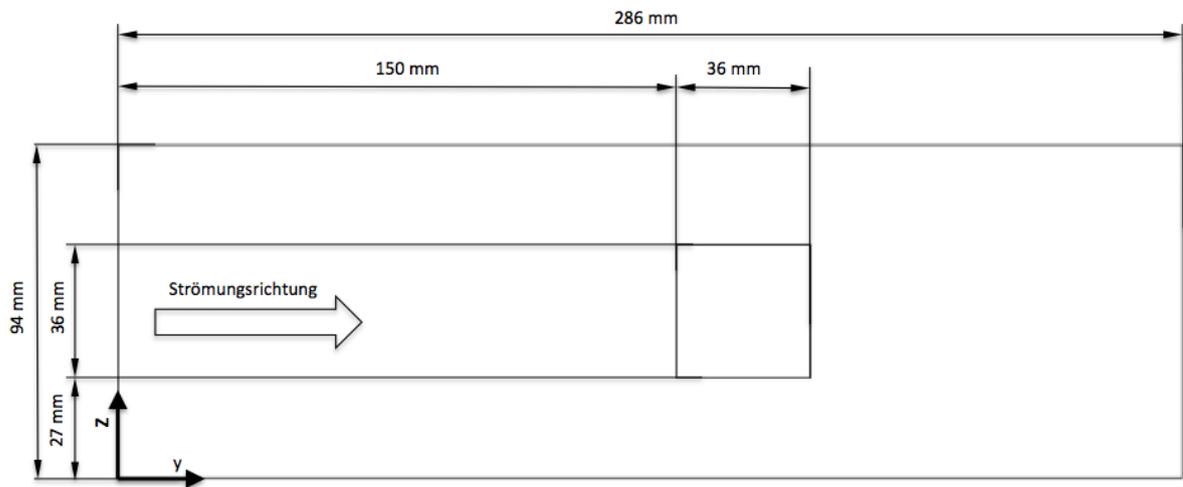
(c) Da die gegenüberliegende Fläche als *wall* definiert ist, prallt das Wasser ab.

(d) Das Wasser versucht den Druckausgleich zwischen Überstand und durch das Inlet nachbeförderter Wassermenge zu erreichen.

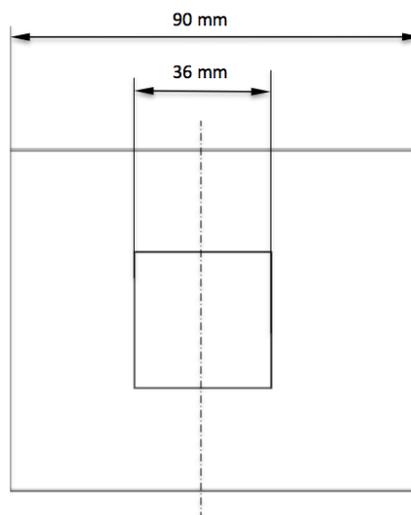
Abbildung 5.20: Aufbau eines neuen Cases zur Simulation der Pegelhöhe auf Basis des Tutorials *damBreaking*.

Die Berechnungen für den Strömungskanal dauern rund 96h. Wegen der langen Simulationsdauer wurde zuerst eine Simulation der Pegelhöhe für den Strömungskanal durchgeführt. In weiterer Folge wurde der Auftauvorgang mit der bekannten Pegelhöhe in einem Ausschnitt des Strömungskanals (in weiterer Erwähnung als kleiner Strömungskanal bezeichnet) simuliert. Die Geometrie des kleinen Strömungskanals (Abbildung 5.21) wird mit Hilfe von *Gambit* erstellt und anschließend vernetzt. Für den Strömungskanal Abbildung 5.2 wurde die Geometrie ebenfalls mit *Gambit* erstellt und vernetzt. Die Vernetzung des Strömungskanals ist aufgrund der Geometrie schwierig, da diese von einem kleinen, runden Einlass auf einen verhältnismäßig großen, quadratischen Querschnitt aufgeweitet wird. Zusätzlich muss in den Randbereichen ein Gradient im Gitter berücksichtigt werden. In diesem herrschen andere Bedingungen wie zum Beispiel die hohe Strömungsgeschwindigkeit direkt beim Einlass gegenüber jener des Kanals. Das muss bei der Vernetzung berücksichtigt werden. Weitere

Gradienten bei der Vernetzung mussten um die Geometrie des Kartoffelwürfels gemacht werden, damit die Strömungsgeschwindigkeiten und somit auch der Wärmetransport an diesen Stellen richtig berechnet wird. Mit einem Ausschnitt aus dem Strömungskanal um die Geometrie des Würfels erhält man ein strukturiertes Gitter und kann die Gradienten des Gitters genauer anpassen. Das Geschwindigkeitsprofil im kleinen Kanal wird vereinfacht als konstant über den Querschnitt angenommen.



(a) y/z-Ebene



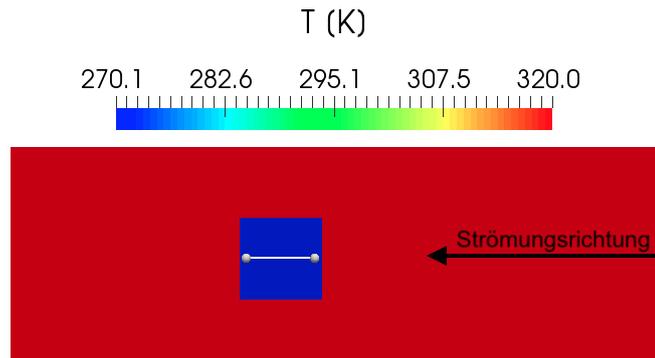
(b) x/z-Ebene

Abbildung 5.21: Skizze des kleinen Strömungskanals

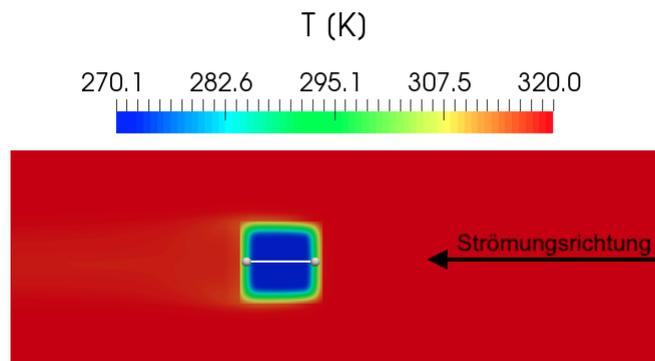
### 5.2.3 Vergleich der Simulation mit den Experimenten

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte in *ParaView*. Dabei wurde der Strömungskanal in der Längsachse mit der Funktion *Clip* geschnitten (siehe Abbildung 5.22) und im Bereich der Sensoren von +3 mm vom Rand der angeströmten Seite des Feststoffes bis zu +33 mm mit dem Tool *Plot Over Line* ein

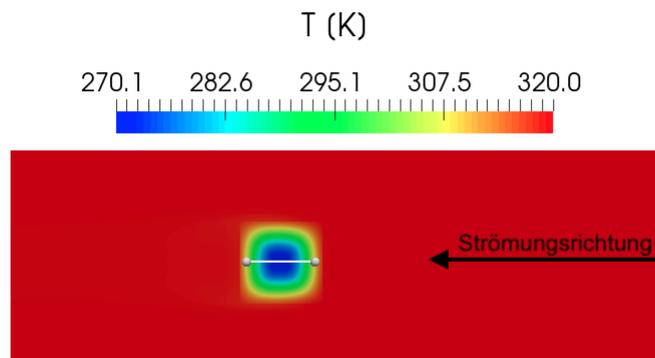
*LineChartView* erstellt (siehe Abbildung 5.23). Zusätzlich kann die Verschiebung des kältesten Punktes ermittelt werden.



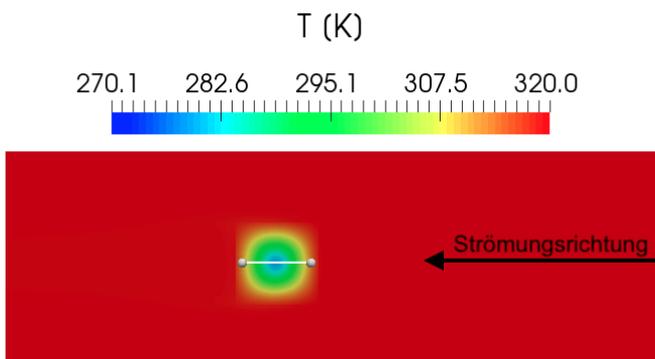
(a) Minute 0



(b) Minute 3



(c) Minute 10



(d) Minute 16

Abbildung 5.22: Auswertung des berechneten Aufwärmvorgangs in *Paraview*.

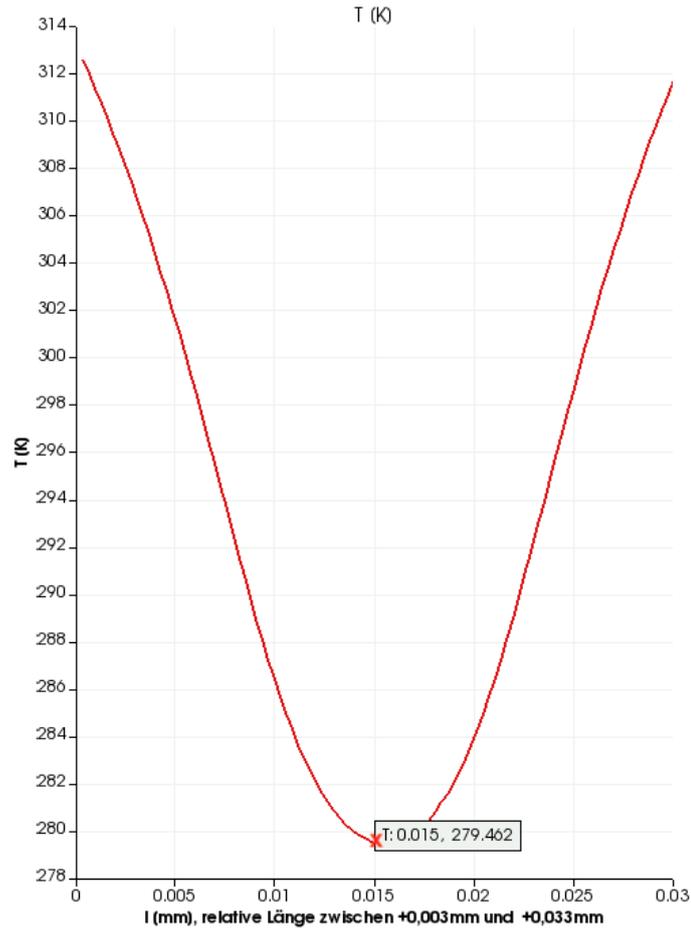


Abbildung 5.23: Auswertung der Simulation mit der Funktion *Plot Over Line* in *ParaView*.

Die ersten Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine kontinuierliche  $c_p$ -Funktion für die Schmelzenthalpie zu keiner befriedigenden Lösung führt. Diese lässt die Berechnung beim Auftauvorgang "einfrieren" wie in Abbildung 5.24 zu sehen ist. Die Simulation des Auftauvorgangs mit einer  $c_p$ -Stufenfunktion, liefert weitaus besser Ergebnisse.

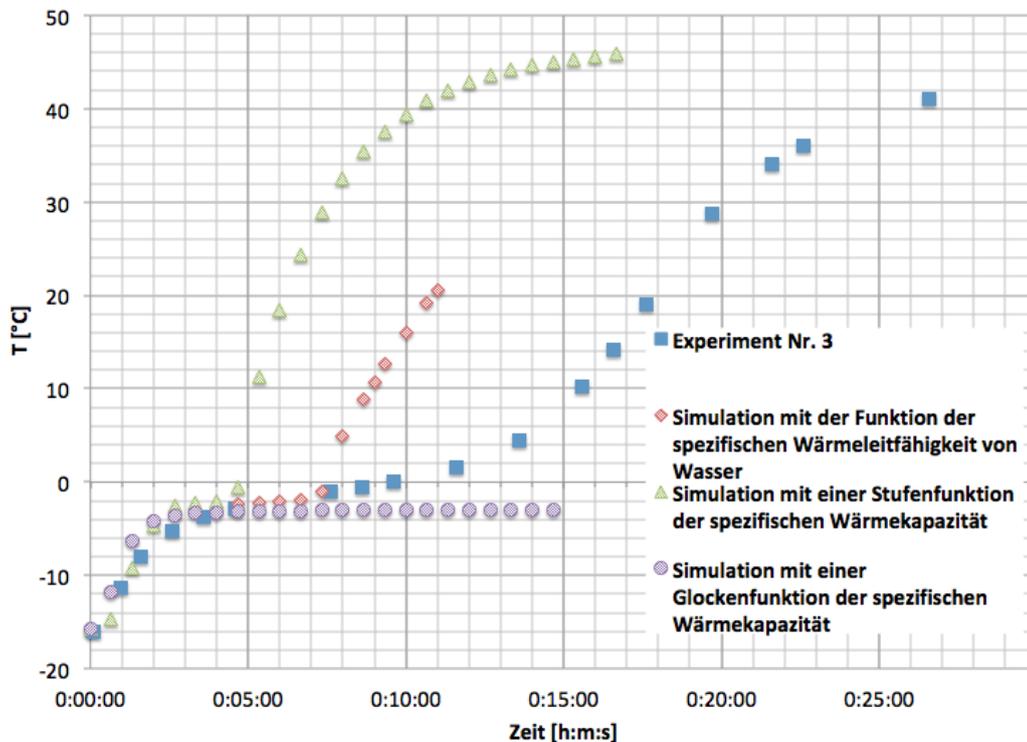


Abbildung 5.24: Vergleich des Experimentes bei einer Fluidtemperatur von 47 °C mit verschiedenen Simulationen. Bei der ersten Simulation wurde die Wärmeleitfähigkeit als Funktion eingestellt. Bei der zweiten Simulation wurde eine Stufenfunktion der  $c_p$ -Funktion eingestellt. Bei der letzten Simulation wurde eine Glockenkurve der  $c_p$ -Funktion.

Die Dauer des Auftauvorganges ist bei der Simulation mit der  $c_p$ -Stufenfunktion nur ca. ein Fünftel so lange, wie beim Experiment gemessen wurde. Nach dem Auftauvorgang, springt die Temperatur in ca. 30 s auf über 11 °C. Dieser Sprung kann durch einen zu niedrigen Wert für die Wärmeleitfähigkeit ausgelöst worden sein. Die Steigung der Aufwärmkurve lässt außerdem vermuten, dass die Wärmeleitfähigkeit stark von der Temperatur abhängig ist. Deshalb müssen in der Literatur Werte für diese im Arbeitsbereich gesucht werden. Zur Anpassung der Wärmeleitfähigkeit bietet sich ein Experiment an, in dem zuerst ein Kartoffelwürfel aufgeheizt wird und anschließend dieser Aufheizvorgang simuliert wird. Durch die Anpassung der Koeffizienten der Funktion der Wärmeleitfähigkeit in der Simulation, kann diese schrittweise an die reale Funktion der Wärmeleitfähigkeit angenähert werden (siehe Kapitel 6).

### 5.3 Zusammenfassung

Nachdem ein Versuchsstand für die Experimente für den Auftauvorgang geplant und gebaut wurde, wurden die Experimente durchgeführt. Dabei wurden Kartoffelwürfel mit einer Seitenlänge von je 36 mm aufgetaut. Kartoffeln wurden

verwendet, da diese die erforderliche Größe haben, leicht handhabbar sind und reproduzierbare Ergebnisse, aufgrund ähnlicher Stoffwerte, liefern. An drei Stellen in dem Kartoffelwürfel wurden Sensoren positioniert, mit denen der Temperaturverlauf bei der Aufwärmung gemessen wurde. Daraus ergaben sich Temperaturkurven, welche für die Simulation als Vergleich dienen. In weiterer Folge wurden die Stoffwerte, welche für die Simulationen notwendig sind, ermittelt. Wenn möglich, wurden Funktionen der Stoffwerte über den Temperaturbereich des Fluids erstellt. Am Ende dieses Kapitels, wurde der Auftauvorgang simuliert und die Ergebnisse wurden wiederum als Auftaukurven dargestellt. Die Auftaukurven des Experiments und der Simulation stimmen jedoch nicht überein. Im Gegensatz zu der kontinuierlichen Funktion der virtuellen  $c_p$ -Funktion, liefert die  $c_p$ -Stufenfunktion wesentlich bessere Ergebnisse. Um die Simulation zu verbessern, muss die spezifische Wärmeleitfähigkeit der Kartoffel auf eine kontinuierliche Funktion geändert werden, da dieser Stoffwert stark von der Temperatur abhängig ist. Daher könnte die Simulation mit der Funktion der Wärmeleitfähigkeit wesentlich verbessert werden.

# Kapitel 6

## Experimente zur Wärmeleitfähigkeit und Dichtebestimmung

Die in Kapitel 5 erzielten Ergebnisse der Simulation des Auftauvorganges lassen vermuten, dass die Funktion der Wärmeleitfähigkeit essentiell für die Simulation ist. Bisher wurde die Wärmeleitfähigkeit in der Simulation als Konstante eingegeben, da in der Literatur ebenfalls konstante Werte verwendet wurden (Unterabschnitt 1.3.1). Die Funktion der Wärmeleitfähigkeit soll mit einem Experiment eines Aufheizvorgangs und der entsprechenden Simulation zu diesem, ermittelt werden.

### 6.1 Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit

Eine Möglichkeit die Funktion der spezifischen Wärmeleitfähigkeit der Kartoffel zu ermitteln ist, dass zuerst ein Kartoffelstück durch ein Hezelement aufgeheizt wird und dieses Experiment durch die Simulation nachgestellt wird. Beim Experiment werden an mehreren Positionen Temperatursensoren positioniert. Durch deren Daten können Aufheizkurven erstellt werden. Durch die Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit, werden die sich aus der Simulation ergebenden Aufheizkurven möglichst an jene im Experiment angepasst.

Nach einer weiteren Literaturrecherche wurden Literaturdaten der Wärmeleitfähigkeit bei mehreren Temperaturen gefunden. Diese Literaturquellen sind Yamada (1970) und Califano and Calvelo (1991).

Die Stoffeigenschaften werden sich durch den Gefrierprozess im Auftauexperiment von jenen der rohen Kartoffeln unterscheiden. Daher dient das Experiment dazu, vor allem einen Richtwert für die Funktion der spezifischen Wärmeleitfähigkeit zu erhalten. An diesen soll die Funktion, so gut wie möglich, angepasst werden.

### 6.1.1 Aufbau des Experimentes

Für das Experiment wird ein quaderförmiges Kartoffelstück vorbereitet, welches eine quadratische Querschnittsfläche mit einer Seitenlänge von jeweils 48 mm und eine Tiefe von 80 mm hat. Für die exakte Positionierung wurden für das verwendete Heizelement, mit dem Durchmesser 6,5 mm und der maximalen Leistung von 10,944 W und zwei Pt100-Sensoren mit dem Durchmesser von je 3 mm, Löcher in die Kartoffel gebohrt. Damit der Kontakt gegeben ist und die Wärmeleitung nicht verfälscht wird, wurden die Löcher mit einem Durchmesser von 5 mm und 2,5 mm etwas kleiner gebohrt. Durch die Bohrungen wurde die Position der Sensoren und des Heizelementes gewährleistet. Um bei der späteren Simulation an der Außenseite der Kartoffel eine *zeroGradient* Randbedingung setzen zu können, muss das Kartoffelstück, welches aus zwei mit Wärmeleitpaste aneinander geklebten Kartoffelstücken besteht, außen isoliert werden. Dies wurde mit zurechtgeschnittenem 40 mm starkem Polyurethan-Isoliermaterial bewerkstelligt. Zwischen dem Kartoffelstück und der Isolierung wurde ein Pt100-Temperatursensor in flacher Ausführung mit Wärmeleitpaste zwischen Kartoffel und Isolierung angebracht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.1 ersichtlich.

Das Heizelement wurde mit der maximalen Spannung vom Netzgerät versorgt, welche 72 V betrug. Der Strom wurde mittels Multimeter gemessen. Dieses wurde in Serie vor dem Heizelement eingebauten. Der Strom betrug 152 mA und blieb während der Messung konstant. Nach der Formel Gleichung (6.1) lässt sich daraus die verwendete Heizleistung berechnen, welche 10,9 W beträgt.

$$P = I \cdot U \tag{6.1}$$

Der Versuch wurde wiederum auf Video aufgezeichnet, um genauere Messpunkte zu erhalten und Bereiche besser auflösen zu können, falls dies nötig ist.

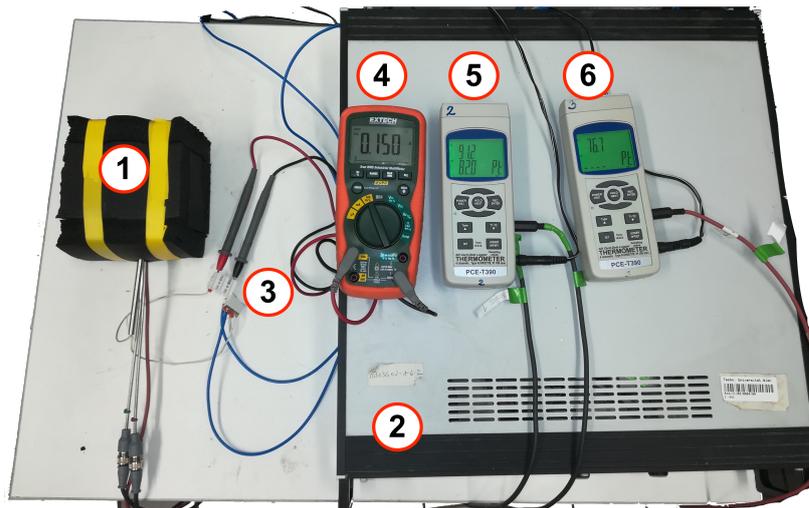


Abbildung 6.1: Aufbau für das Experiment zur Validierung der Wärmeleitfähigkeit. Mit (1) 48 mm x 48 mm x 80 mm Kartoffelstück mit 3 Bohrungen für zwei Pt100-Tempersensoren rund und einem Pt100-Tempersensor flach und dem eingebauten Heizelement und Isolierung, (2) Netzgerät mit +/- Pol an der Rückseite, (3) seriell einbinden der Messspitzen des Multimeters in die Schaltung, (4) Multimeter und (5)/(6) Thermometer zur Temperaturmessung

Nach dem Versuch wurde die Kartoffel in der Symmetrieebene durchgeschnitten und die Position der Sensoren wurde überprüft (Abbildung 6.2).

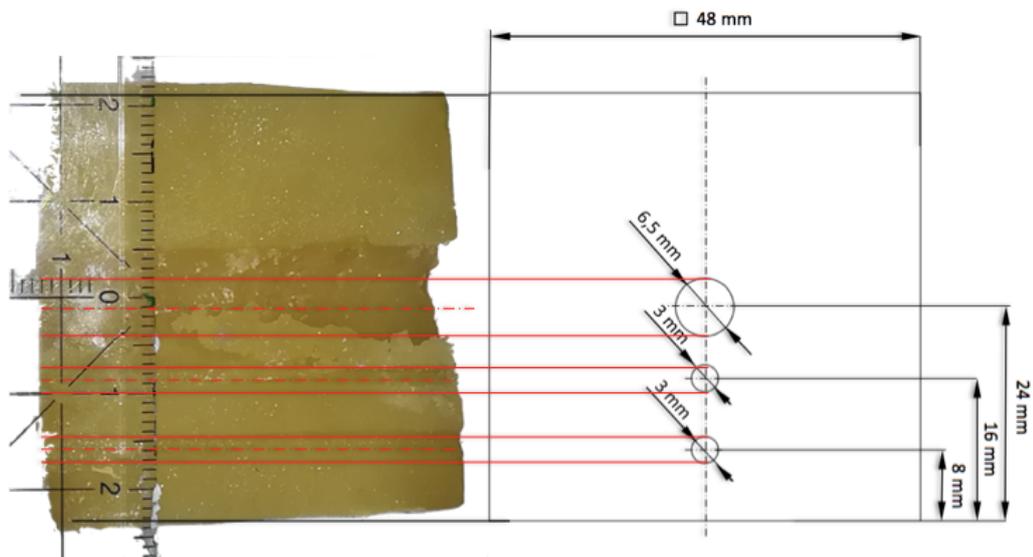


Abbildung 6.2: Querschnitt der Kartoffel nach dem Experiment zur Validierung der Wärmeleitfähigkeit (li.) und Skizze der Anordnung der Bohrungen im Kartoffel (re.).

### 6.1.2 Ergebnis des Experimentes

Um die verwendeten drei Pt100-Sensoren abzugleichen, wurden Temperaturmessungen bei verschiedenen Temperaturen, am Auslass des Umlaufthermostats durchgeführt (Abbildung 6.3). Es gilt, dass die Abweichung der eingestellten Temperatur zu der tatsächlichen umso größer ist, je weiter die Temperatur von der Raumtemperatur abweicht.

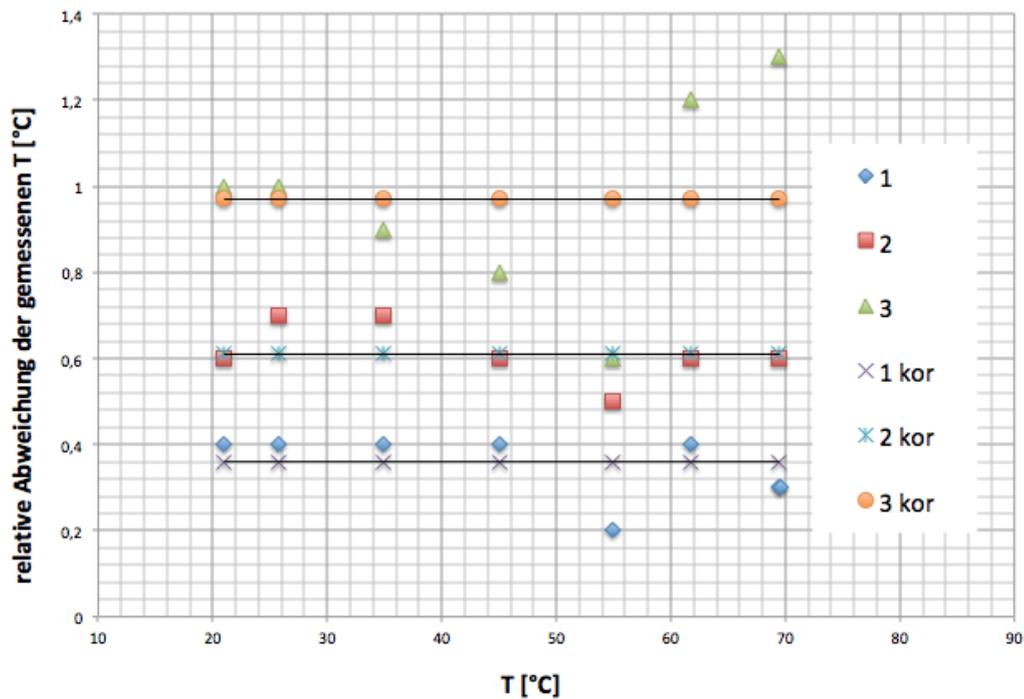


Abbildung 6.3: Abweichungen der gemessenen Temperatur der Sensoren von der eingestellten Temperatur am Umlaufthermostat.

Durch die berechneten Abweichungen vom Ist-Wert ergeben sich die in Tabelle 6.1 bestimmten Werte als Mittelwerte der Abweichungen.

Tabelle 6.1:  $\Delta T$  der einzelnen Sensoren in °C

Sensornummer	1	2	3
$\Delta T_{\text{Korrektur}}$ in °C	0,36	0,61	0,97

#### Ergebnisse der Messung:

Die jeweiligen Temperaturen wurden aus der Videoaufzeichnung, für die benötigten Zeitschritte, ausgelesen und durch die jeweiligen Mittelwerte der Abweichung korrigiert (Abbildung 6.4).

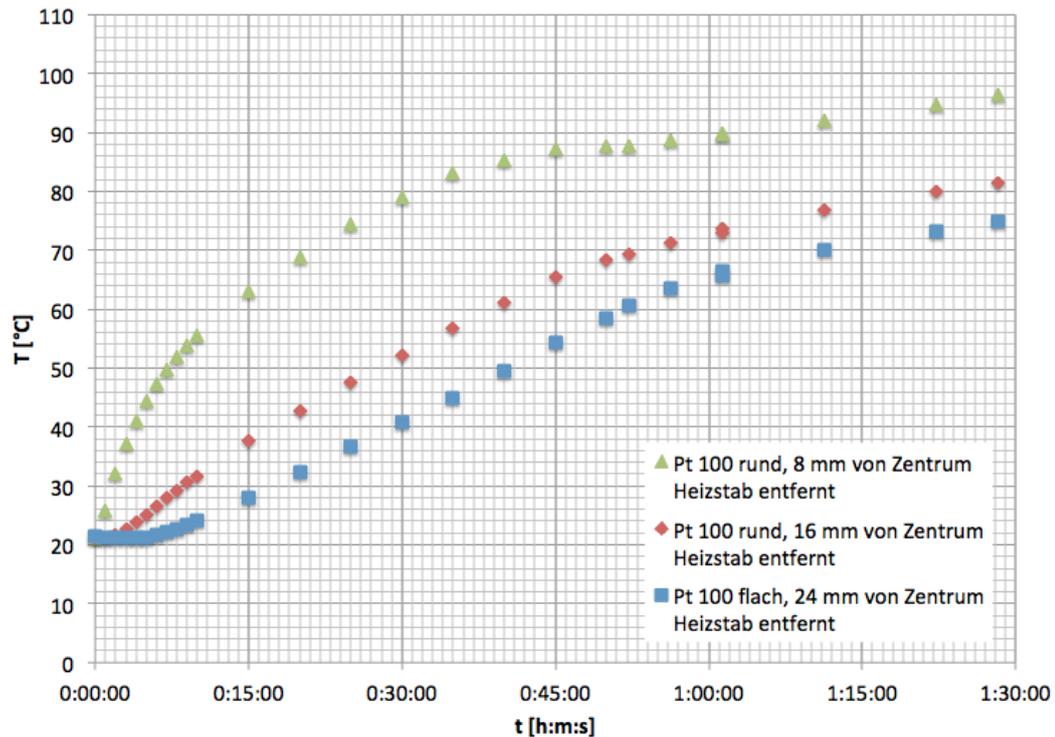


Abbildung 6.4: Korrigierte Temperatur der Sensoren 1, 2 und 3 bei der Aufheizung eines quaderförmigen Kartoffelstückes zur Validierung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit.

Die Steigung der aus den gemessenen Temperaturen erstellte Aufheizkurve, nimmt mit zunehmender Zeit ab. Diese Abnahme wird durch Effekte der lokalen Überhitzung ausgelöst. Diese sind etwa der Dampfaustritt, welcher ab Minute 30 bemerkt wurde oder die veränderte spezifische Wärmeleitfähigkeit durch den verbrannten Bereich direkt am Heizelement. Da diese Phänomene in der Simulation nicht berücksichtigt werden, wird für die Anpassung der Simulation nur der Bereich bis Minute 25 betrachtet.

### 6.1.3 Aufbau der Simulation

Für die Simulation wurde die exakte Position der Sensoren und des Heizstabes, wie bereits beschrieben, bestimmt. Anschließend wurde die Geometrie in *Gambit* konstruiert. Die Schwierigkeit dabei war, dass die runden Sensoren und das runde Heizelement auf einen quadratischen Querschnitt vernetzt werden mussten. Dies wurde wie in Abbildung 6.5 gelöst, indem der Querschnitt des Kartoffelstückes in verschiedene kleinere Einheiten aufgeteilt wurde. Durch einen Gradienten in der Zellengröße konnten Zellen eingespart werden. Für den Querschnitt ergeben sich 6804 Zellen, für das Volumen 432320 Zellen mit einer Skewness von unter 0,51. Die Verteilung der Güte der Zellen ist in Abbildung 6.6 ersichtlich.

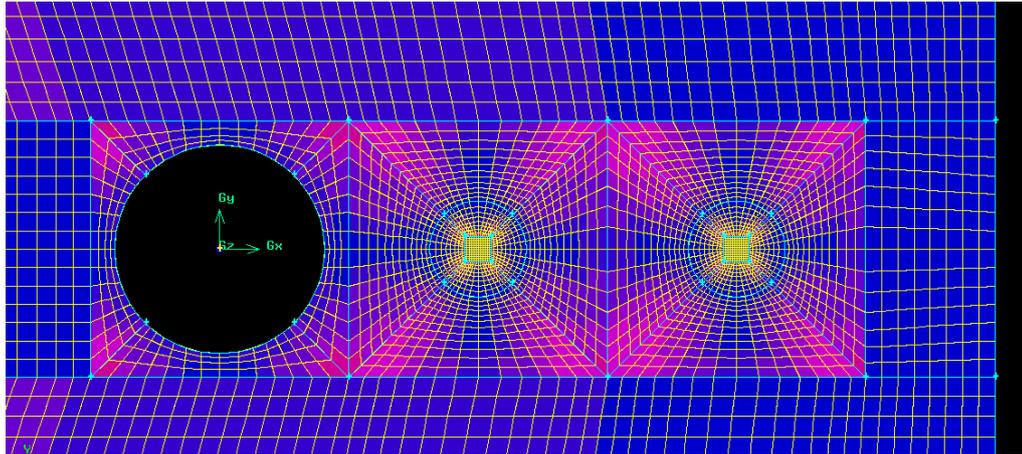


Abbildung 6.5: Vernetzung der Geometrie im Programm *Gambit* im Bereich des Heizstabes und der Pt100 Sensoren rund.

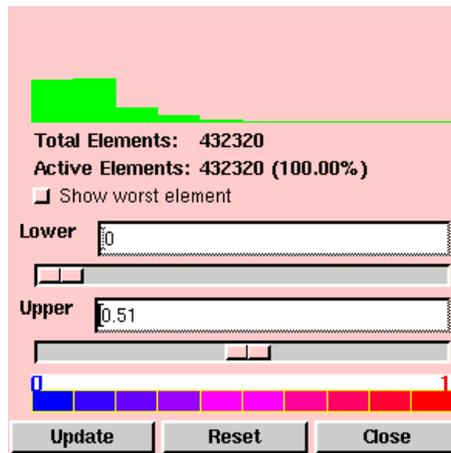


Abbildung 6.6: Kontrolle der Gitterqualität in *Gambit*.

### 6.1.4 Ermittlung der Stoffdaten

Als ersten Anhaltspunkt für die Funktion wurden Daten aus der Literatur verwendet. Diese in Yamada (1970) (Daten von 10 °C bis 75 °C, mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 76 %) gefundenen Daten mussten zuerst von kcal/(m · hr · °C) in die Einheit W/(m K) durch die Gleichung (6.2) umgerechnet werden.

$$1 \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} \cdot \frac{4184 \frac{\text{J}}{\text{kcal}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 1,1622 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (6.2)$$

Die in Califano and Calvelo (1991) gefundenen Daten (von 50 °C bis 100 °C) waren bereits in W/(m K) angegeben. Somit ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgelisteten Werte.

Tabelle 6.2: Literaturdaten für die Wärmeleitfähigkeit von Kartoffeln. Erster Abschnitt: Spezifische Wärmeleitfähigkeiten von 10 °C bis 75 °C, Literatur: Yamada (1970), Mitte Originalwerte, rechts in SI-Einheiten umgerechnete Werte. Zweiter Abschnitt: Spezifische Wärmeleitfähigkeiten von 50 °C bis 70 °C, Literatur: Califano and Calvelo (1991).

T [°C]	Thermal Conductivity (kcal/(m hr °C))	Thermal Conductivity (W/(m K))
Werte nach Yamada (1970)		
10	0,417	0,485
20	0,43	0,4997
30	0,442	0,514
40	0,451	0,524
50	0,462	0,537
65	0,473	0,5497
75	0,478	0,556
Werte nach Califano and Calvelo (1991)		
50	-	0,545
60	-	0,558
70	-	0,556

Durch die Eintragung und Auswertung der Stoffwerte in *Microsoft Excel* erhält man die Koeffizienten von Gleichung (6.3).

$$\lambda = -60,07 + 0,5834 \cdot T - 0,00187272 \cdot T^2 + 0,000002004 \cdot T^3 \quad (6.3)$$

### 6.1.5 Ergebnisse der Simulation

Zwischen dem Experiment und der Simulation ergeben sich wiederum Abweichungen (Abbildung 6.7). Diese können einerseits durch eine falsche Funktion der spezifischen Wärmeleitfähigkeit entstehen, welche durch die Literaturdaten ermittelt wurde. Andererseits durch eine falsche Funktion der Wärmekapazität, welche derzeit vor und nach dem Schmelzvorgang nur durch eine Konstante beschrieben wird. Eine Funktion dieser würde wiederum genauere Ergebnisse liefern.

## KAPITEL 6. EXPERIMENTE ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT UND DICHTBESTIMMUNG

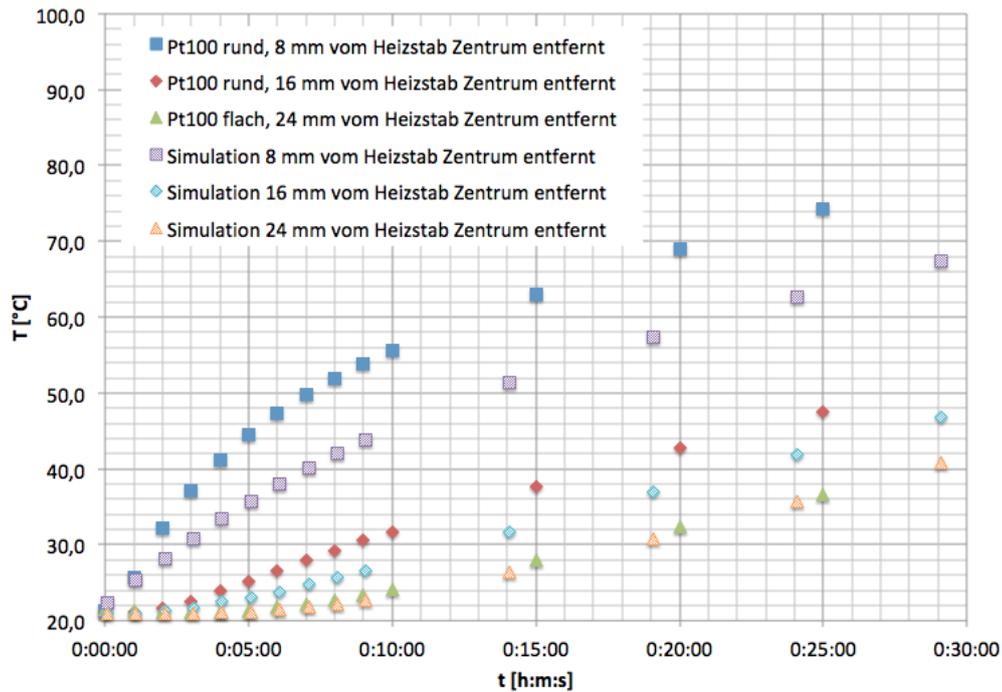


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Simulation in *OpenFOAM* im Vergleich mit der Temperaturmessung beim Aufheizvorgang eines quaderförmigen Kartoffelstückes.

Einen großen Einfluss hat ebenfalls die Funktion der spezifischen Wärmekapazität (siehe Abbildung 6.8), deren experimentelle Messung nicht Teil dieser Arbeit ist. In der Literatur findet man dazu bei Kartoffeln und Früchten nur konstante Werte.

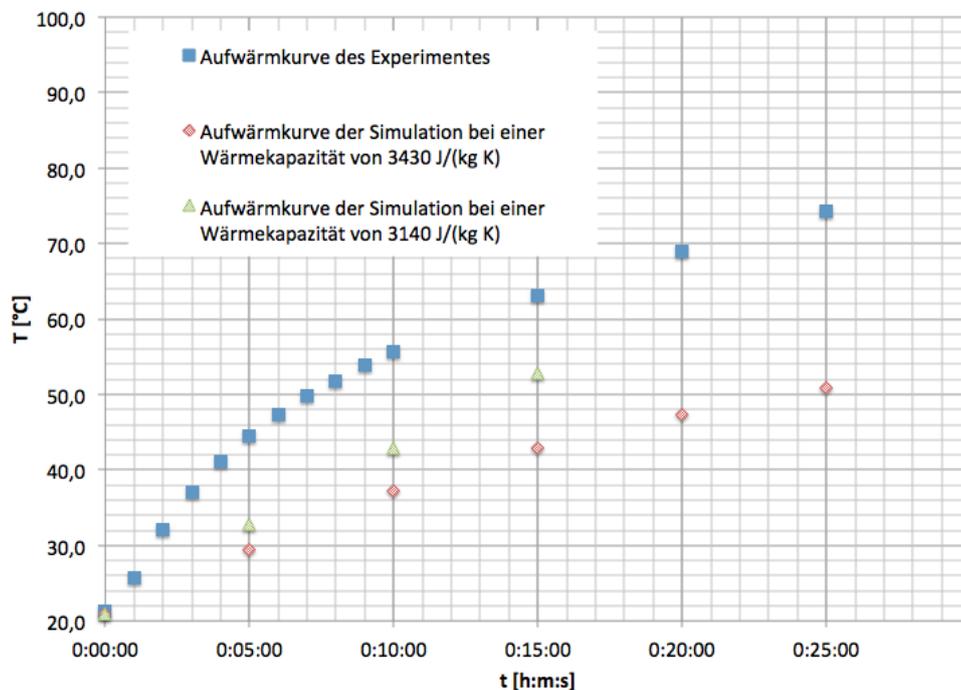


Abbildung 6.8: Vergleich der Aufheizkurven von Simulationen mit unterschiedlichem  $c_p$ -Werten mit der Aufwärmkurve des Experimentes.

Durch Simulationen wurde außerdem bestätigt, dass bei einer höheren Wärmeleitfähigkeit ein geringerer und bei einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit ein steilerer Anstieg der Temperatur zu beobachten ist (Abbildung 6.9). Dadurch kann eine ungefähre, weil die Wärmekapazität ebenfalls einfließt, Abschätzung gemacht werden, ob die Wärmeleitfähigkeit in einem bestimmten Temperaturbereich zu hoch oder zu niedrig ist.

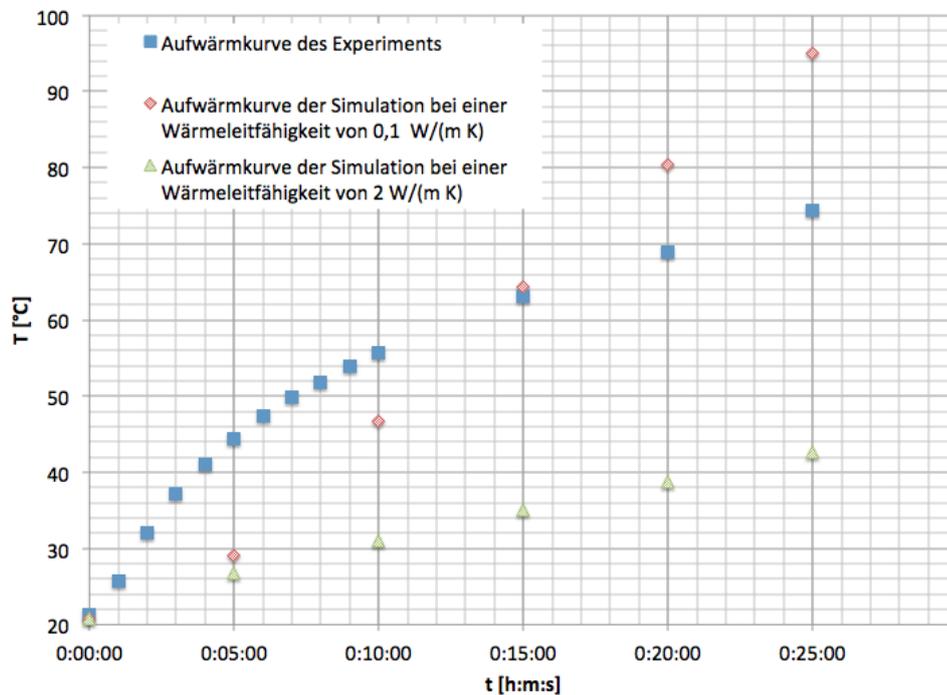


Abbildung 6.9: Vergleich der Aufheizkurven von Simulationen mit unterschiedlichem  $\lambda$ -Werten mit der Aufwärmkurve des Experimentes.

## 6.2 Experiment zur Dichtebestimmung von Kartoffeln

Die Dichte hat einen wesentlichen Einfluss auf den Anstieg der Temperatur, da sich die Wärmekapazität auf die Masse bezieht. Einfache Experimente zur Bestimmung der Dichte wurden durchgeführt, um sicherzustellen, dass der angenommene Wert aus der Literatur für diese Berechnungen richtig ist. Für das Experiment wurden ein Messbecher, eine Küchenwaage und mehrere Kartoffeln benötigt. Zuerst wurde das Tara-Gewicht des Messbechers bestimmt, danach wurden 400 ml Wasser eingefüllt und es wurde erneut abgewogen. Zuletzt wurde je eine Kartoffel hinzugefügt und das Gesamtgewicht bestimmt. Aus dem Quotienten der Differenz des Gewichtes, vor und nach der Zugabe der Kartoffeln und dem abgelesenen Differenzvolumen, erhält man die Dichte nach der Gleichung (6.4)). Die Dichte des Wassers bei der gemessenen Temperatur ist dabei nicht notwendig, da sich die Messung nur auf das verdrängte Volumen und auf die Massendifferenz bezieht.

$$\rho = \frac{m_{\text{Kartoffel}}}{V_{\text{Kartoffel}}} = \frac{\Delta m_{\text{Waage}}}{\Delta V_{\text{Messbecher}}} \quad (6.4)$$

### Fehlerbetrachtung

Die Skala zum Ablesen des Pegelstandes am Messbecher ist in 10 ml-Abständen unterteilt. Bei einer Abschätzung von +/-2 ml ergibt sich daraus ein relativer Ablesefehler für die Berechnung der Dichte nach der Formel Gleichung (6.5).

$$f_{\text{relativ}} = \left| \frac{\rho_{\text{max}}}{\rho_{\text{mittel}}} \right| = \left| \frac{\frac{\Delta m_{\text{Waage}}}{\Delta V_{\text{Messbecher}+2\text{ml}}}}{\frac{\Delta m_{\text{Waage}}}{\Delta V_{\text{Messbecher abgelesen}}}} \right| = \left| \frac{\Delta V_{\text{Messbecher}+2\text{ml}}}{\Delta V_{\text{Messbecher abgelesen}}} \right| \quad (6.5)$$

Die in Tabelle 6.3 erhaltenen Ergebnisse passen gut zu den in der Literatur Benk et al. (2013) gefundenen. In dieser befindet sich die Dichte der Kartoffeln je nach Stärkegehalt zwischen 1053 kg/m<sup>3</sup> und 1153 kg/m<sup>3</sup>

Tabelle 6.3: Experiment zur Bestimmung der Dichte von Kartoffeln. Massen in g, Volumen in ml und Dichte in kg/m<sup>3</sup>.

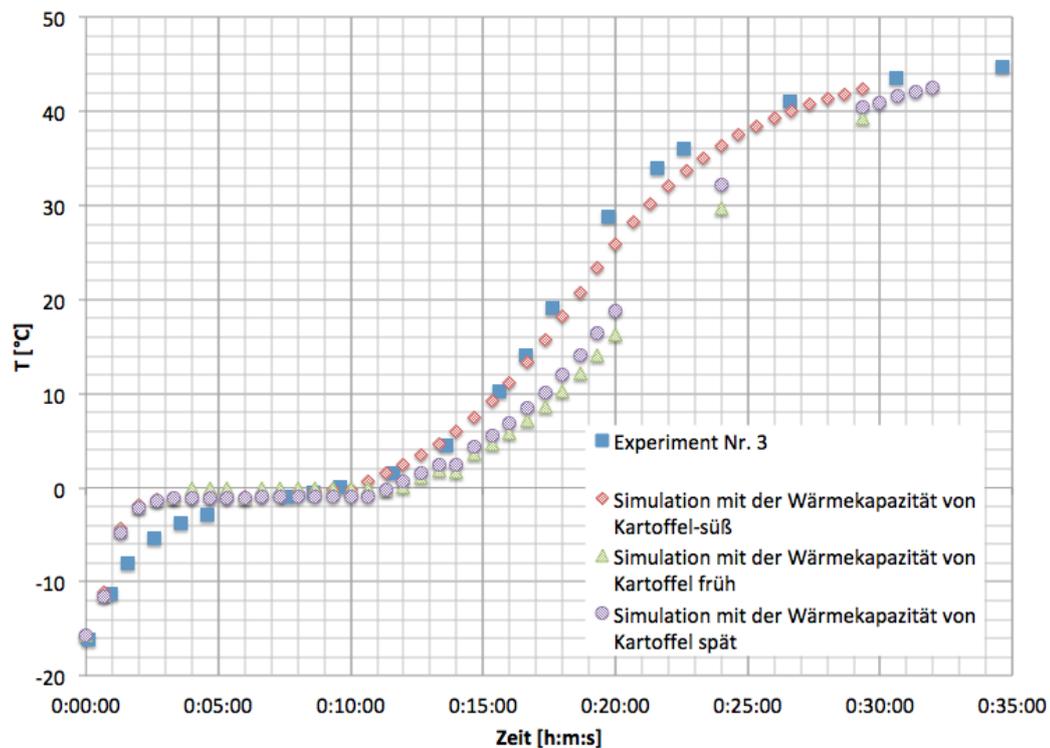
	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3
m <sub>Behälter</sub>	92	107	107
m <sub>+ 400 ml</sub>	503	37	501
m <sub>+Kartoffel</sub>	636	37	649
Δm	175	133	148
V <sub>400 ml</sub>	400	400	400
V <sub>+ Kartoffel</sub>	560	525	533
ΔV	160	125	133
ρ	1094	1090	1113
relativer Ablesefehler	1,0125	1,0160	1,0226
relativer Ablesefehler in %	1,25	1,60	2,26

## 6.3 Simulationsergebnisse mit einer Funktion der Wärmeleitfähigkeit

Für den negativen Temperaturbereich wurden die Lambdawerte von Wasser verwendet. Diese Annahme soll nur zu Abschätzung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit dienen, da für die Ermittlung der exakten Funktion wiederum ein Experiment notwendig wäre.

## KAPITEL 6. EXPERIMENTE ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT UND DICHTBESTIMMUNG

Bei der Simulation des Auftauvorganges mit der kontinuierlichen Funktion von  $c_p$ , wurde der Auftauvorgang zu kurz abgebildet. Deshalb wurde die gesamte Schmelzenthalpie auf einen Temperaturbereich von 0,2 °C aufgeteilt. Diese Einstellung führte zu dem in Abbildung 6.10 ersichtlichen Ergebnis. Hierbei sieht man die zu schnelle Temperaturzunahme vor dem Auftauprozess. Das lässt auf eine zu niedrige Wärmeleitfähigkeit, bzw. eine zu geringe Wärmekapazität schließen.



(a)

Abbildung 6.10: Vergleich von dem Experiment Nr. 3 (siehe Tabelle 5.3) mit der Simulation des Aufwärmprozesses mit verschiedenen Wärmekapazitäten der Kartoffeln (siehe Tabelle 5.8).

Aus dem Vergleich zwischen Experiment und Simulation sind einige Abweichungen signifikant ausgeprägt:

- Unter 0 °C weicht die Funktion stark von der des Experimentes ab, was daran liegt, dass hierfür die  $\lambda$ -Funktion von Wasser verwendet wurde. Jene von Kartoffeln wurde in der Literatur nicht gefunden.
- Die unterschiedlichen Kartoffelsorten weichen um einiges von der Funktion des Experimentes ab. Eine größere Steigung, wie sie bei der Simulation der *Kartoffels süß* vorhanden ist, stimmt besser mit den Messdaten überein. Dies liegt jedoch ausschließlich an dem  $c_p$ -Wert nach dem Schmelzen. Dieser ist nicht nur von der Kartoffelsorte, sondern auch von dem Feuchtigkeitsgehalt der Kartoffel abhängig. Auch Lagerdauer, Lagerbedingungen und der

## KAPITEL 6. EXPERIMENTE ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT UND DICHTEBESTIMMUNG

Anbauort spielen eine wesentliche Rolle. Der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und spezifischer Wärmekapazität ist in Abbildung 6.11 ersichtlich und zeigt deutlich auf, dass der  $c_p$ -Wert einer großen Schwankungsbreite unterliegt.

Die Abweichung der Aufwärmkurven in Abbildung 6.10 kann, wie in Abbildung 6.11 ersichtlich, auch von einem geringeren Feuchtigkeitsgehalt in den Kartoffeln kommen. Um genaue Werte des Feuchtigkeitsgehaltes und somit der Wärmekapazität der Kartoffel zu bekommen, müsste der Feuchtigkeitsgehalt der Kartoffel experimentell gemessen werden. Somit kann man den Wert der Wärmekapazität einschränken, da dieser, bei verschiedenen Feuchtigkeiten, Werte zwischen  $2000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  und  $3600 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  haben kann.

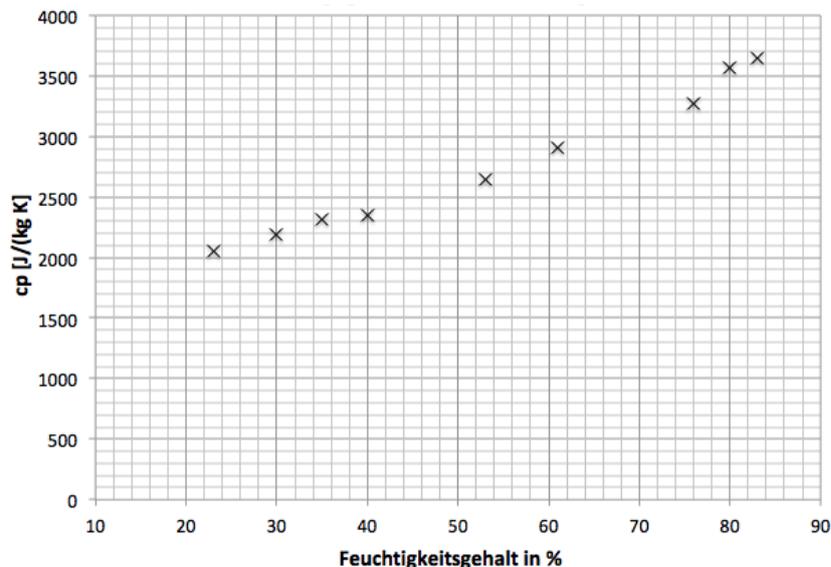


Abbildung 6.11: Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von der Feuchtigkeit in der Kartoffel (Yamada (1970))

Nun werden die Aufwärmkurven von den Experimenten Nr. 1, 3 und 5 simuliert. Diese sind in Abbildung 6.12, Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14 dargestellt. Es ist der Trend zu erkennen, dass sich die simulierten Aufwärmkurven mit sinkender Temperatur des Fluids schlechter an jene des Experimentes anschmiegen. Bei Abbildung 6.12 wird die Aufwärmkurve der Simulation mit der fast identischen Aufwärmkurve des Experimentes verglichen. Der einzige Unterschied ist, dass der Wert der Wärmeleitfähigkeit konstant gehalten wird. Dieser ist vor dem Schmelzen  $2,83 \text{ W}/(\text{kg K})$  und nach dem Schmelzen  $0,635 \text{ W}/(\text{kg K})$ . Somit ist ersichtlich wie wichtig die genaue Funktion der Wärmeleitfähigkeit für die korrekte Berechnung des Schmelzvorganges ist. In der Literatur findet man jedoch meist nur konstante Werte für die Wärmeleitfähigkeit.

## KAPITEL 6. EXPERIMENTE ZUR WÄRMELEITFÄHIGKEIT UND DICHTBESTIMMUNG

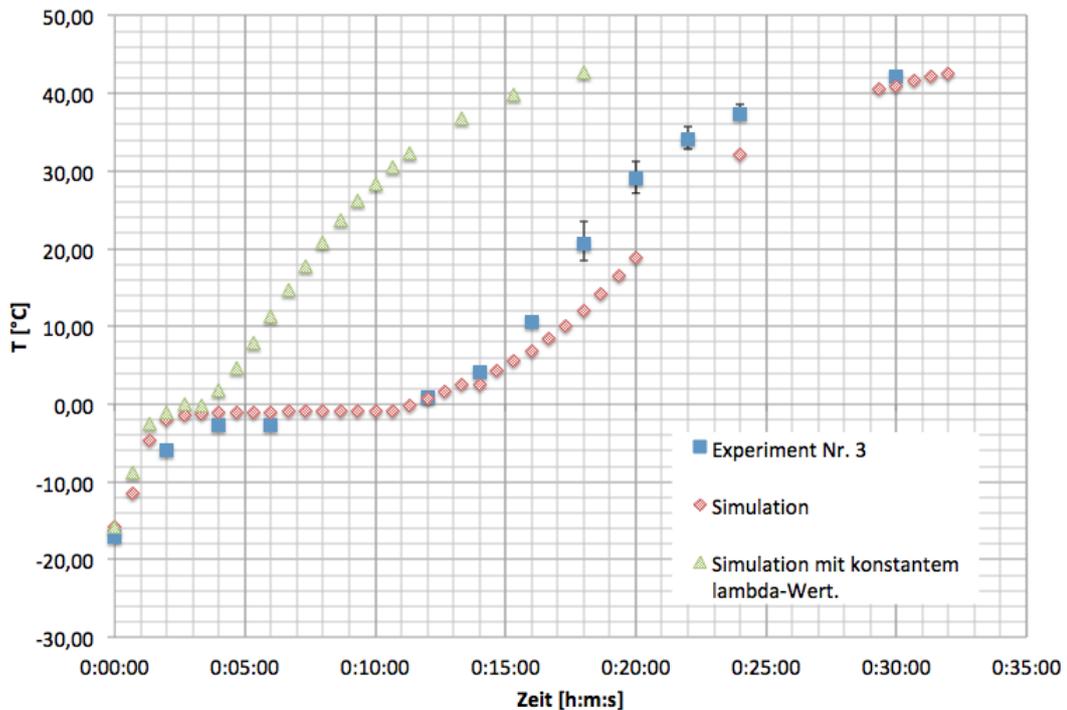


Abbildung 6.12: Vergleich von Experiment Nr. 3 (Tabelle 5.3) mit eingezeichneten Fehlerbalken, mit der dazugehörigen Simulation mit den Werten für die Wärmekapazität von Kartoffel-früh und der beinahe identen Simulation. Bei dieser wurde jedoch ein konstanter  $\lambda$ -Wert von  $2,83 \text{ W}/(\text{m K})$  vor dem Schmelzpunkt und ein konstanter  $\lambda$ -Wert von  $0,635 \text{ W}/(\text{m K})$  nach dem Schmelzpunkt eingestellt.

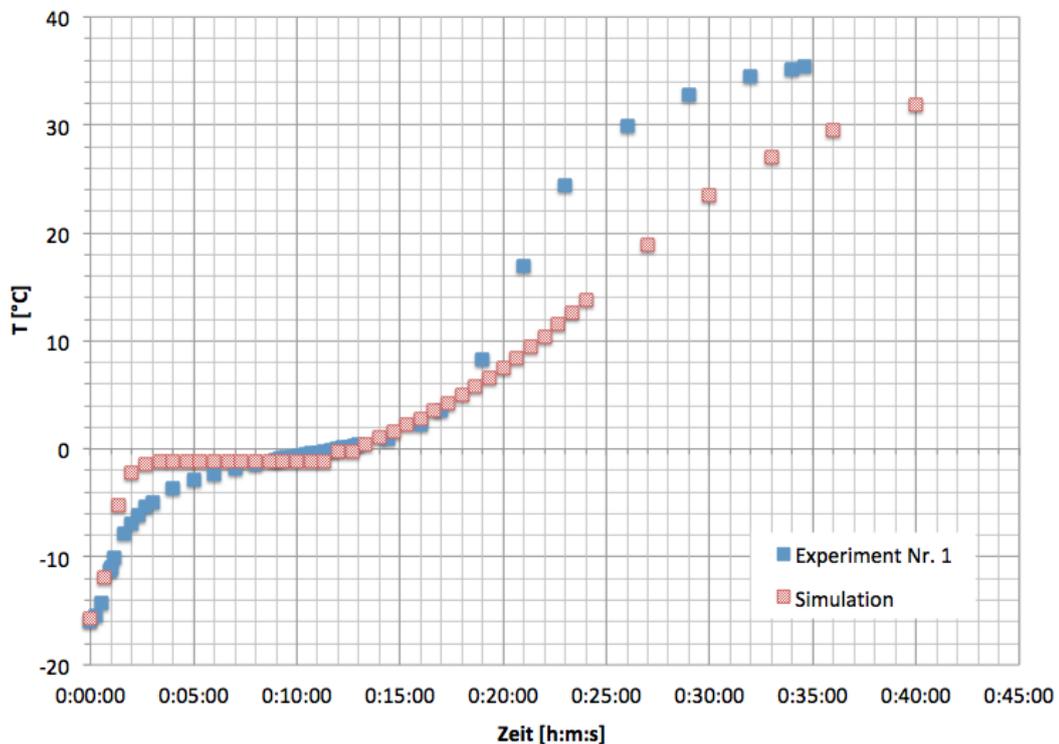


Abbildung 6.13: Vergleich von Experiment Nr. 1 (Tabelle 5.3) mit der dazugehörigen Simulation.

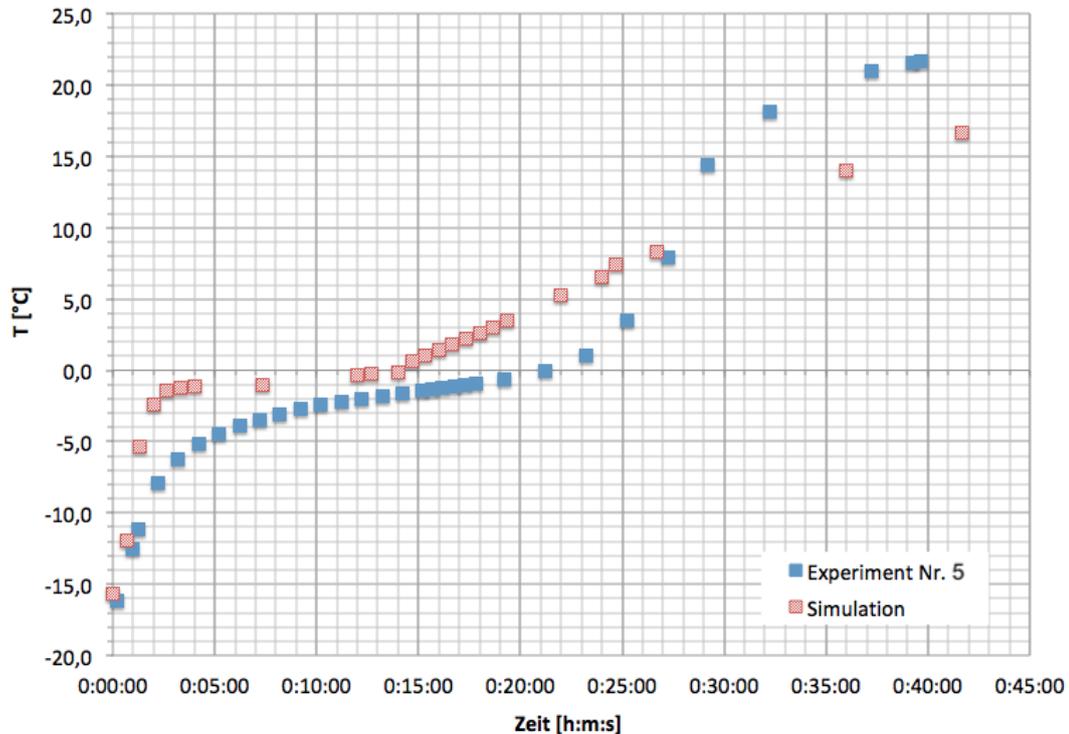


Abbildung 6.14: Vergleich von Experiment Nr. 5 (Tabelle 5.3) mit der dazugehörigen Simulation.

### Kältester Punkt bei der Pasteurisation

Bei den Simulationen wurde ebenfalls ausgewertet, ob sich der kälteste Punkt durch die Anströmung einer Seite des Würfels hin zur abgeströmten Seite bewegt. Die Temperaturmessungen bei den Experimenten zum Aufwärmvorgang lassen dies vermuten, da der Sensor auf der abgeströmten Seite jenem auf der angeströmten Seite hinterher hinkt. Bei der Simulation blieb der kälteste Punkt jedoch immer der Mittelpunkt des Würfels wie in der Auswertung in Anhang D in Tabelle D nachzulesen ist. Bei den durchgeführten Simulationen wurde auch keine Verschiebung des kältesten Punktes festgestellt.

## 6.4 Zusammenfassung

Die Simulation mit der stufenförmigen  $c_p$ -Funktion bildete den Auftauvorgang zu kurz ab. Aus diesem Grund wurde vermutet, dass die Funktion der Wärmeleitfähigkeit, welche bis zu diesem Zeitpunkt nur als Konstante eingegeben wurde, essentiell für die Berechnung ist. Daher wurde ein Experiment zur Anpassung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Nach der Eingabe der Funktion der Wärmeleitfähigkeit, wurden für 47°C und 37°C sehr gute Ergebnisse, mit nur wenigen Grad unterschied zwischen dem Experiment und der Simulation, erzielt. Durch eine bessere Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit

und der Wärmekapazität, können in weiteren Arbeiten noch bessere Ergebnisse erzielt werden. Der kälteste Punkt des Feststoffes, welcher essentiell bei einem Pasteurisationsprozess ist, war in der Simulation stets im Mittelpunkt. Das Experiment ließ jedoch vermuten, dass dieser etwas in Richtung abgeströmte Seite versetzt ist. Diese Untersuchungen müssten in einer weiteren Arbeit durchgeführt werden. Da die Seitenlänge der in Kapitel 7 simulierten Fruchtwürfel nur 6 mm beträgt, ist die Verschiebung des kältesten Punktes für den betrachteten Prozess von geringer Bedeutung.

# Kapitel 7

## Simulation des Auftauvorganges von Fruchtwürfeln

Beim Pasteurisationsprozess von *AGRANA Fruit Austria GmbH* werden Fruchtzubereitungen für Fruchtjoghurt hergestellt. Als Beispiel, wie diese Simulation für diesen Prozess eingesetzt werden kann, werden in diesem Kapitel die Stoffdaten auf jene von Erdbeerstücken in Erdbeermarmelade geändert. Dazu werden die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 3 bis Kapitel 6 verwendet, um den Auftauprozess eines Fruchtstückes zu simulieren. Für Erdbeermarmelade werden die in Kapitel 3 gemessenen Stoffdaten verwendet. Die Werte für den Feststoff werden aus der Literatur entnommen und adaptiert. Andere Früchte welche für die Fruchtzubereitung verwendet werden sind z.B Marillen, Pfirsiche, Himbeeren und Heidelbeeren.

Wie in Abschnitt 2.3 erklärt, ergibt sich die Scherspannung durch die unterschiedliche absolute Geschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Feststoffwand. Da in dieser Simulation jedoch der Feststoff starr im Raum verankert ist, hat dieser die Geschwindigkeit 0 m/s. In einem realen System würde der Feststoff nicht starr im Raum verharren, weshalb die Strömungsgeschwindigkeiten um das Fruchtstück nicht als absolute, sondern als relative zu sehen sind. Für realitätsnähere Ergebnisse der Scherspannung muss man die Berechnungen mit einer *Diskreten Elemente Methode* (DEM) verknüpfen, da sich hier der Feststoff im Fluid dreht, um der geringsten Scherspannung ausgesetzt zu sein. Diese Verknüpfung könnte in Folgearbeiten erstellt werden.

Für die folgenden Simulationen wurden die Stoffwerte angepasst. Dafür wurden für die Region *liquidF* die Stoffwerte für Erdbeermarmelade eingesetzt und für die Region *solidF* jene für ein Erdbeerstück.

### **Erdbeerstücke**

0:

$$T_{\text{liquidF}} = 272 \text{ K } (-1,15 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\rho_{\text{liquidF}} = 1092,3 \text{ kg/m}^3$$

*thermophysicalProperties:*

breakTempOne 273.15;

kappaCoeffsOne<8> (9.29814 -0.04647 0.000075 0 0 0 0 0);

kappaCoeffsTwo<8> (16.797 -0.1192 0.0002129 0 0 0 0 0);

breakTempOne 272;

breakTempTwo 272.9;

breakTempThree 273;

breakTempFour 273.1;

breakTempFive 274;

CpCoeffsOne<8> (1930 0 0 0 0 0 0 0);

CpCoeffsTwo<8> (1930 0 0 0 0 0 0 0);

CpCoeffsThree<8> (1500000 0 0 0 0 0 0 0);

CpCoeffsFour<8> (1500000 0 0 0 0 0 0 0);

CpCoeffsFive<8> (3890 0 0 0 0 0 0 0);

CpCoeffsSix<8> (3890 0 0 0 0 0 0 0);

### **Erdbeermarmelade**

0:

$$T_{\text{liquidF}} = 363 \text{ K } (90 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$u_y = 0,003 \text{ m/s}$$

$$\rho_{\text{liquidF}} = 1251 \text{ kg/m}^3$$

*thermophysicalProperties:*

CpCoeffs<8> (4000 0 0 0 0 0 0 0);

muPowerLawExp 0.48525;

muMin 0.0001;

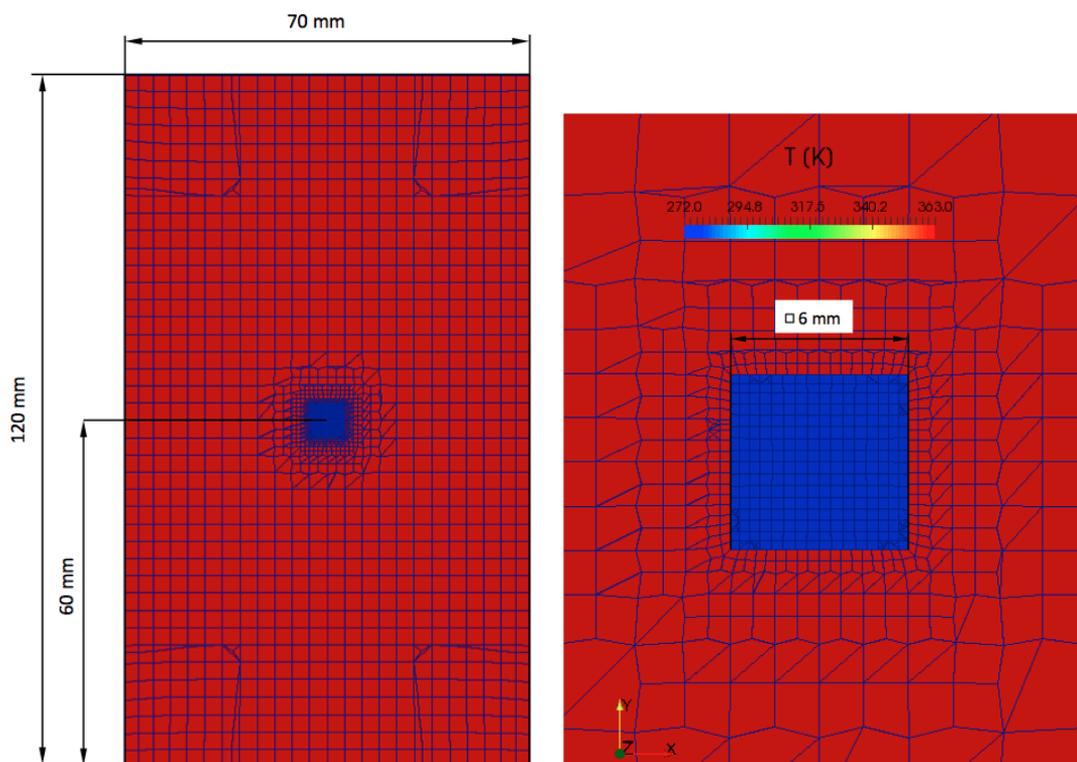
muMax 1000;

muTempCoeffs<8> (136.861 -0.372297 -0.0013123 0.00000360881 0 0 0 0);

kappaCoeffs<8> (0.5984 0 0 0 0 0 0 0);

## 7.1 Simulation der Erwärmung einer Erdbeere in verschiedenen Lagen

Zuerst wird ein Erdbeerstück, welches gerade im Strömungskanal liegt, aufgewärmt (Abbildung 7.1). Der Strömungskanal hat die Abmaße  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm. Die Reynolds-Zahl beträgt 1,14. Diese wurde analog zu Gleichung (2.10) mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,003 m/s, einer charakteristischen Länge von 0,006 m, einer Dichte der Erdbeermarmelade von  $1251 \text{ kg/m}^3$  und einer dynamischen Viskosität von  $0,0197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , berechnet. Tomas (2008) gibt einen Bereich der Reynolds-Zahl von 24 bis 130 für laminar fließende Wirbeln für glatte umflossene Kugeln an. Da es sich bei der Geometrie in der Simulation jedoch um einen Würfel handelt und dieser in der Realität nicht glatt ist, wurde dieser Wert mit einer Reynolds-Zahl von 1,14 unterschritten um im laminaren Bereich zu sein. In Abbildung 7.2 wird der Aufwärmvorgang zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Der Auftauvorgang des Erdbeerwürfels mit den Seitenlängen von je 6 mm dauert insgesamt 38 s. Die Schubspannung muss durch das Tool *calculator* in *Paraview* zuerst berechnet werden, danach kann diese angezeigt werden. Da die Scherspannung und die dynamische Viskosität, aus welchen die Schubspannung berechnet wird, nur in der Flüssigphase berechnet werden, wird die Boundary Condition *liquidF\_to\_solidF*, also jenen Bereich der die Grenzfläche zwischen Fest-



(a) Ganzer Strömungskanal, Schnittebene x-y-Ebene. (b) Vernetzung um den Würfel, gezoomt.

Abbildung 7.1: Lage und Vernetzung des geraden Würfels im Strömungskanal.

## KAPITEL 7. SIMULATION DES AUFTAUORGANGES VON FRUCHTWÜRFELN

---

stoff und Flüssigkeit in der Region *liquidF* darstellt, sichtbar geschaltet. Die Schubspannung sieht man in Abbildung 7.3.

Die Vernetzung des Strömungskanals, sowie des Fruchtwürfels wurde mittels *cfMesh* ausgeführt. Die maximale Zellengröße des Strömungskanals wurde dabei mit 2 mm angegeben, jene des Würfels mit 0,4 mm. Die Querstriche durch die Zellen entstehen bei der grafischen Ausgabe durch das verwendete Postprocessing Tool *ParaView*.

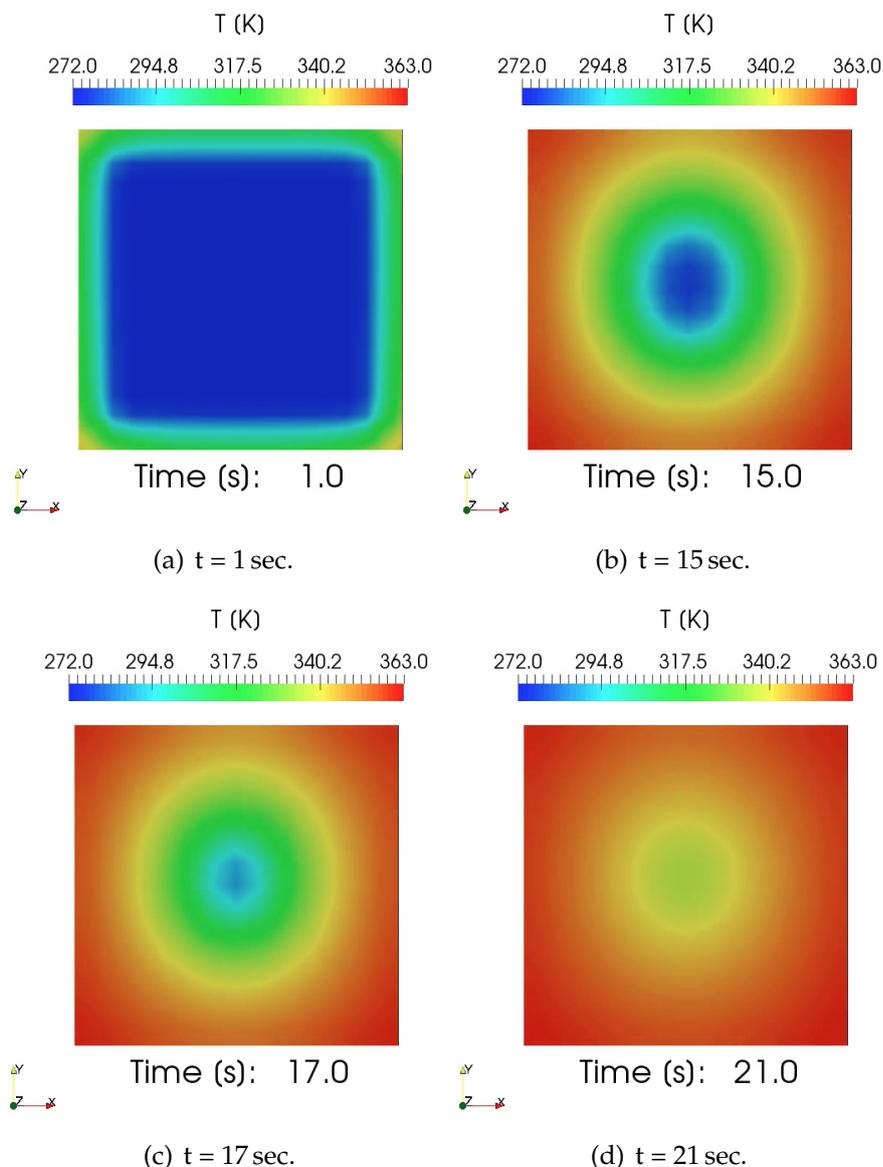


Abbildung 7.2: Aufwärmvorgang in einem gerade im Strömungskanal angeordneten Erdbeerwürfel in Erdbeermarmelade. Die Schnittebene teilt den Würfel in der  $xy$ -Ebene. Die Strömungsrichtung der Erdbeermarmelade ist in  $+y$ -Richtung. Der Aufwärmvorgang auf die Fluidtemperatur ist nach ca.17s abgeschlossen. Strömungskanal  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm, Seitenlänge des Erdbeerstückes 6 mm.

## KAPITEL 7. SIMULATION DES AUFTAUORGANGES VON FRUCHTWÜRFELN

Der Auftauvorgang ist nach ca. 17s abgeschlossen. Es ist eine geringfügig langsamere Aufwärmung der abgeströmten Seite, durch die Verschiebung der Ellipsenform der Temperatur in +y-Richtung, festzustellen. Aufgrund der geringen Seitenlänge der Würfel von 6 mm, hat dieses Phänomen für diesen Pasteurisationsprozess keine Bedeutung.

In Abbildung 7.3 sieht man die Schubspannung an der Oberfläche des Feststoffes während des Aufwärmprozesses. Ab Sekunde 35 verändert sich die Schubspannung nicht mehr.

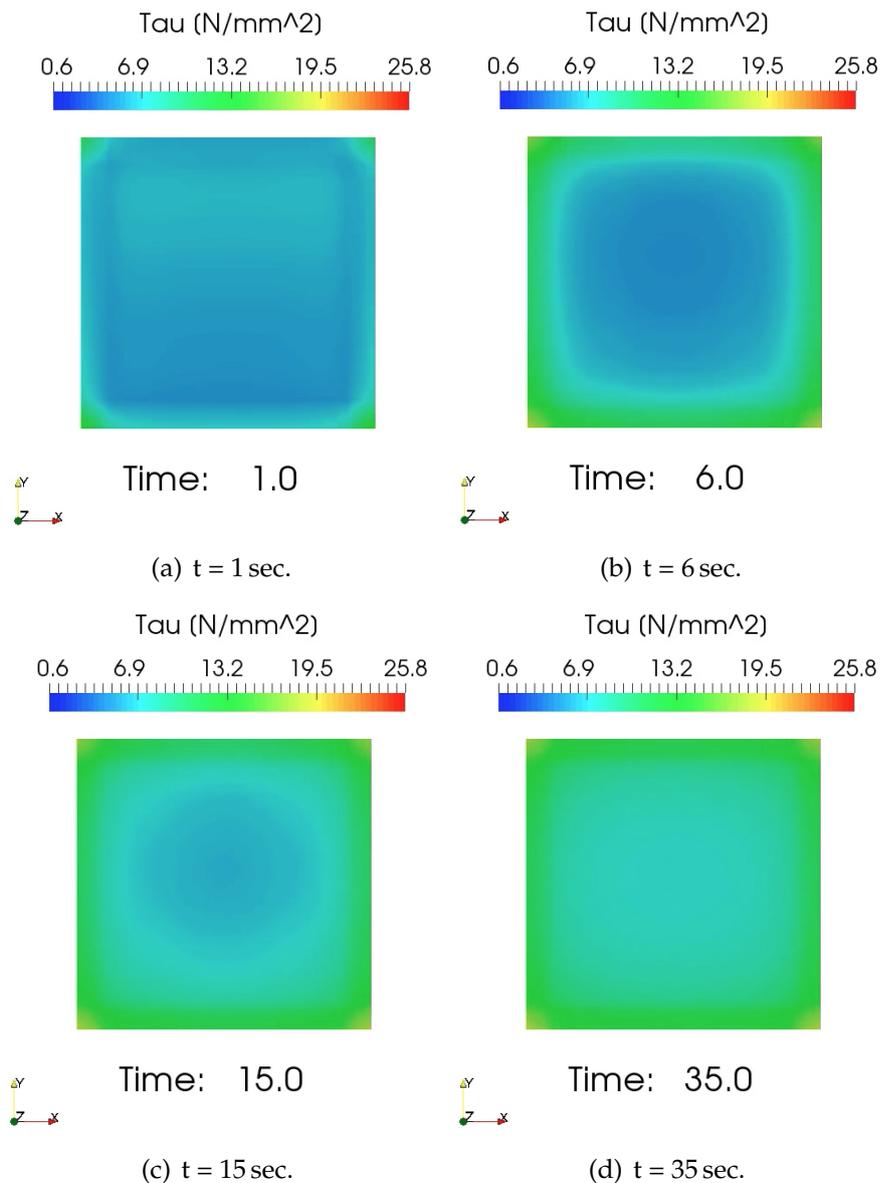
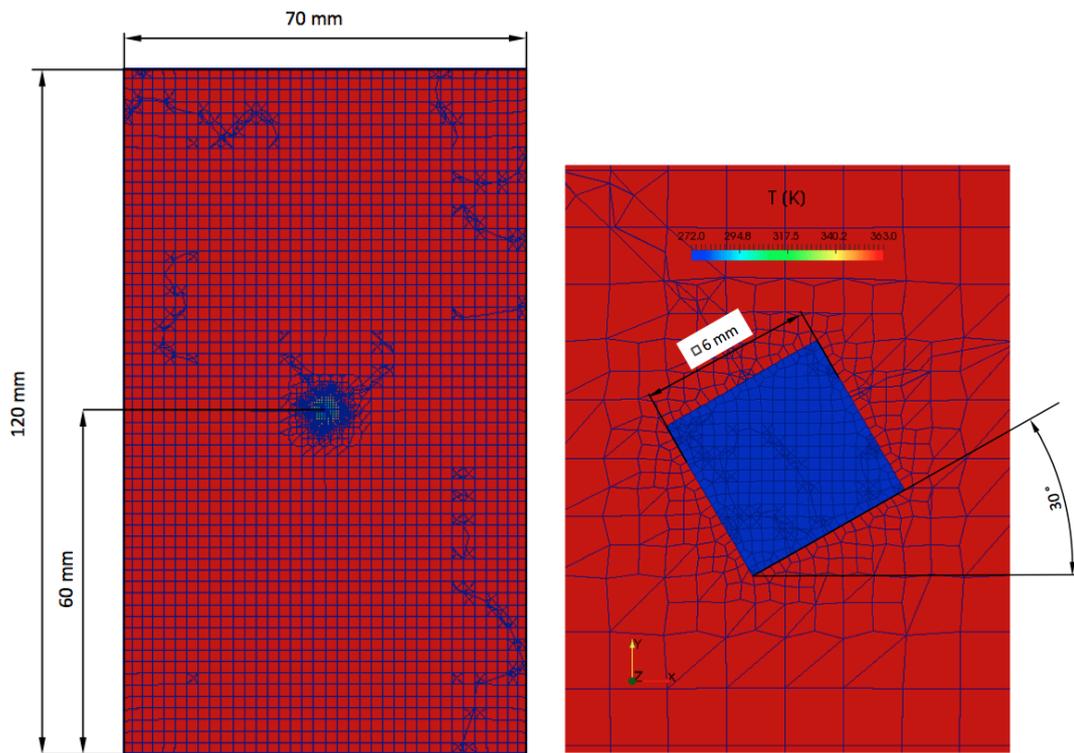


Abbildung 7.3: Scherspannung an der Außenhaut von einem gerade im Raum angeordneten Würfel während des Aufwärmvorganges. Die Strömungsrichtung der Erdbeermarmelade ist in +y-Richtung. Nach 35 sec. bleibt die Schubspannung unverändert. Strömungskanal  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm, Seitenlänge des Erdbeerstückes 6 mm.

## KAPITEL 7. SIMULATION DES AUFTAUORGANGES VON FRUCHTWÜRFELN

Die Scherspannung steigt von Sekunde 1 bis 15 auf ca.  $14 \text{ N/m}^2$  an den Kannten und auf ca.  $7 \text{ N/m}^2$  auf der Fläche an. In der Literaturstelle Kraft (2012) wurden Werte um  $3 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$  für Fruchtstücke angegeben. Dieser Wert wurde mit  $14 \text{ N/m}^2$ , weit unterschritten.

Nun wird der Aufwärmgang einer Erdbeere welche schräg im Strömungskanal liegt simuliert. Der Strömungskanal hat die Maße (x y z) = (70 120 60) mm. Der Würfel ist dabei um  $+30^\circ$  zur x-Achse gedreht, wobei der Mittelpunkt weiterhin jener des Strömungskanals ist (siehe Abbildung 7.4).



(a) Ganzer Strömungskanal, Schnittebene x-y-Ebene. (b) Vernetzung um den Würfel, gezoomt.

Abbildung 7.4: Lage und Vernetzung des schrägen Würfels im Strömungskanal.

Die Vernetzung des Würfels richtet sich parallel zu den Achsen aus und nicht, wie es ideal wäre, nach den Seitenlängen des Würfels.

In Abbildung 7.5 ist der Aufwärmvorgang einer Erdbeere, welche schräg im Strömungskanal liegt, ersichtlich.

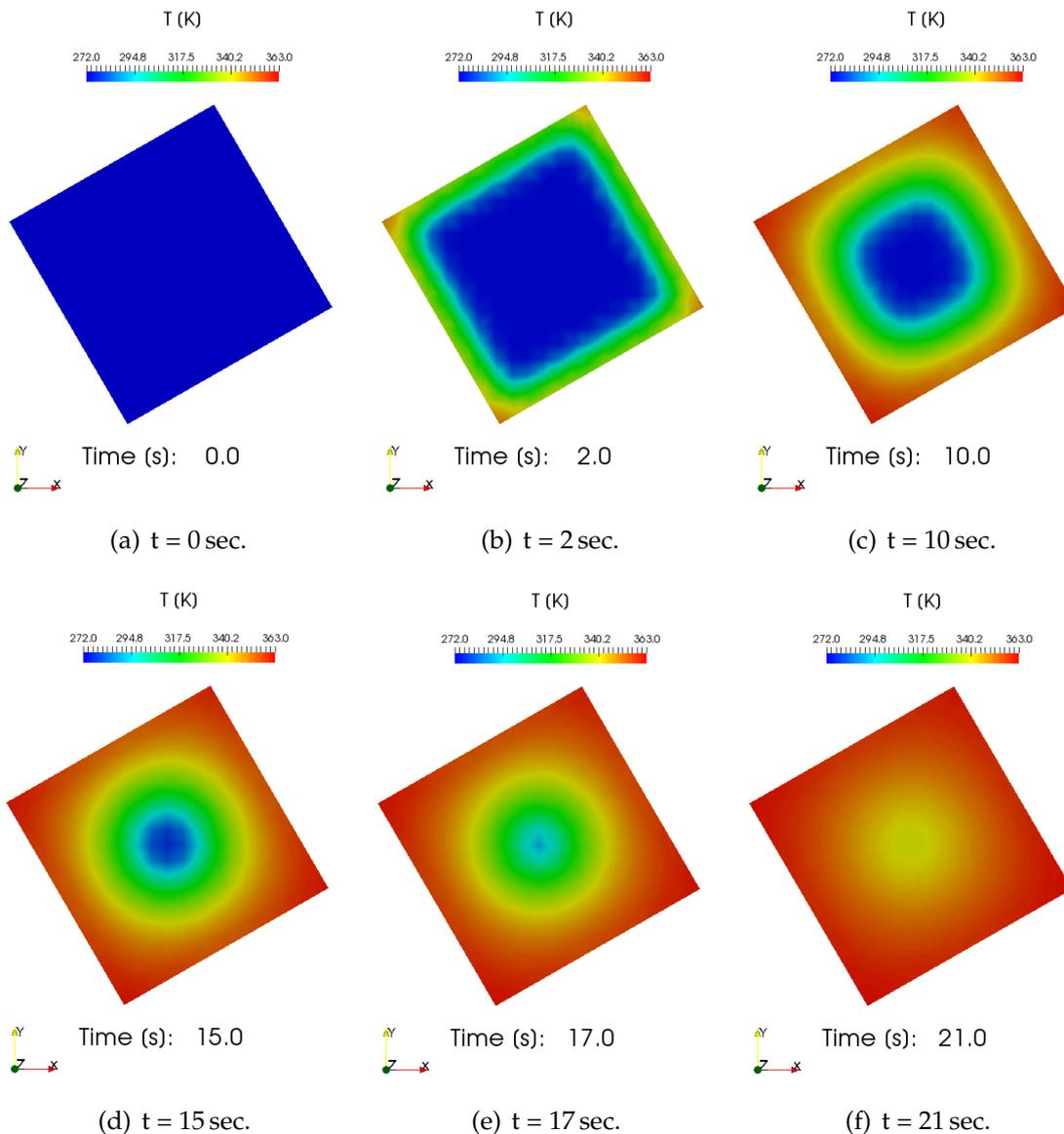


Abbildung 7.5: Aufwärmvorgang in einem schräg im Raum angeordneten Würfel. Die Schnittebene teilt den Würfel in der  $xy$ -Ebene. Die Strömungsrichtung der Erdbeermarmelade ist in  $+y$ -Richtung. Der Aufwärmvorgang bis zur Fluidtemperatur ist nach 16 s abgeschlossen. Strömungskanal  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm, Seitenlänge des Erdbeerstückes 6 mm.

Der Temperaturanstieg findet im schrägen Fruchtstück, im Gegensatz zu dem geraden Fruchtstück, rotationssymmetrisch um den Mittelpunkt statt. Der Auftauvorgang ist nach ca. 17 s abgeschlossen und somit gleich jenem des geraden Fruchtstückes.

In Abbildung 7.6 wird die Veränderung der Scherspannung auf der Außenseite des Würfels dargestellt.

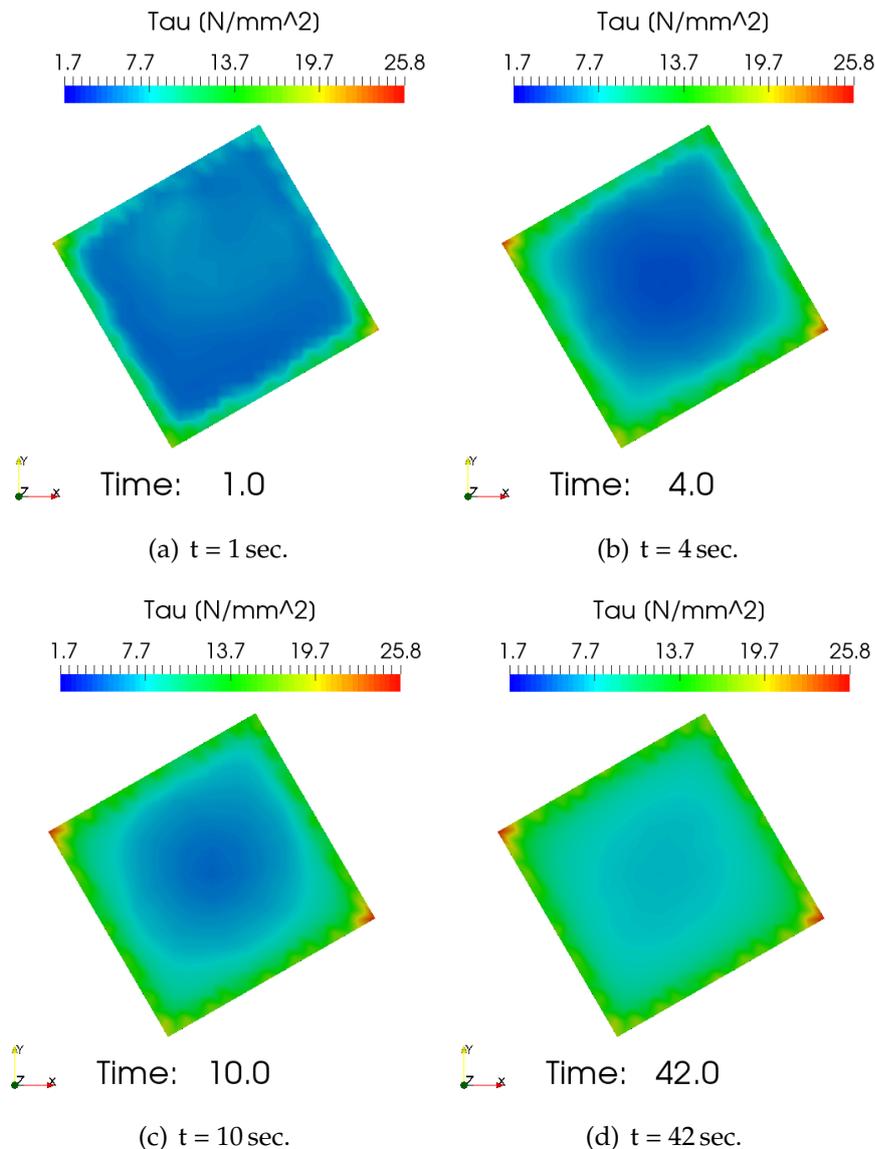


Abbildung 7.6: Scherspannung an der Außenhaut von einem schräg im Raum angeordneten Würfeln während des Aufwärmvorganges. Die Strömungsrichtung der Erdbeermarmelade ist in +y-Richtung. Nach 50 sec. bleibt die Scherspannung unverändert, von Sekunde 16 bis Sekunde 50 ändert sie sich jedoch noch, obwohl ab Sekunde 16 der Aufwärmvorgang abgeschlossen ist. Strömungskanal (x y z) = (70 120 60) mm, Seitenlänge des Erdbeerstückes 6 mm.

Zu sehen ist, dass die Scherspannung ab Sekunde 10 relativ konstant bleibt. Diese liegt bei den Kanten bei ca.  $14 \text{ N/m}^2$  und bei den Flächen bei ca. der Hälfte. Die maximale Scherspannung, mit etwa  $26 \text{ N/m}^2$ , wird auf die Ecken des Fruchtwürfels ausgeübt. Die angeströmte Seite ist etwas stärker belastet als die abgeströmte Seite. Das ist durch die Verzerrung des blauen Bereiches in Abbildung 7.6 (b) und (c) ersichtlich.

## 7.2 Simulation der Erwärmung mehrerer Würfeln in beliebigen Lagen

Für die Konstruktion der chaotischen, unstrukturierten Anordnung mehrerer Würfel im Strömungskanal eignet sich das Open Source Programm *FreeCAD*, welches unter dem URL <https://www.freecadweb.org> zu finden ist. Für die Vernetzung, welche sich aufgrund der Geometrie wenig strukturieren lässt, eignet sich das Freeware Programm *cfMesh* welches unter dem URL <https://cfmesh.com> zu finden ist.

Die Vorgangsweise ist hierbei folgende:

- Konstruktion der einzelnen Volumina in *FreeCAD* und Ausführen der Booleschen Operation *substrate*. Damit wird das Volumen der Würfel von jenem der Flüssigkeit abgezogen.
- Zerteilen der Geometrie in deren Oberflächen und anschließendes Extrahieren der Flächen in Flächengruppen (auswählen aller Flächen mit der selben Boundary Condition).
- Nun muss bei den .stl Files der Name der Boundary Condition geändert werden, damit diese in der Simulation richtig angezeigt wird.
- Mit dem Befehl `cat boundaryCondition1.stl boundaryCondition2.stl ... -> liquid.stl` werden beispielsweise die Flächen zu einem stl-File zusammengefügt.
- Mit `surfaceFeatureEdges liquid.stl liquid.fms` wird das .stl File zu einem Volumen zusammengefasst, welches anschließend mit dem Befehl `cartesianMesh` vernetzt wird.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Gittergeometrie kaum beeinflusst werden kann. Es kann die minimale, beziehungsweise maximale Zellengröße eingegeben werden. Diese kann dafür für einzelne Bereiche angepasst werden. Somit ist es möglich im Strömungskanal eine gröbere Auflösung zu bestimmen und im Feststoff ein feineres Gitter zu generieren.

### Ergebnisse des Aufwärmvorgangs mehrerer, chaotisch im Raum angeordneten Erdbeerwürfel

Die drei Fruchtstücke wurden wie in Abbildung 7.7 im Strömungskanal angeordnet. Die Fruchtwürfel haben eine Kantenlänge von jeweils 6 mm und der Strömungskanal hat Maße  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm. Die Reynolds-Zahl beträgt wiederum 1,14.

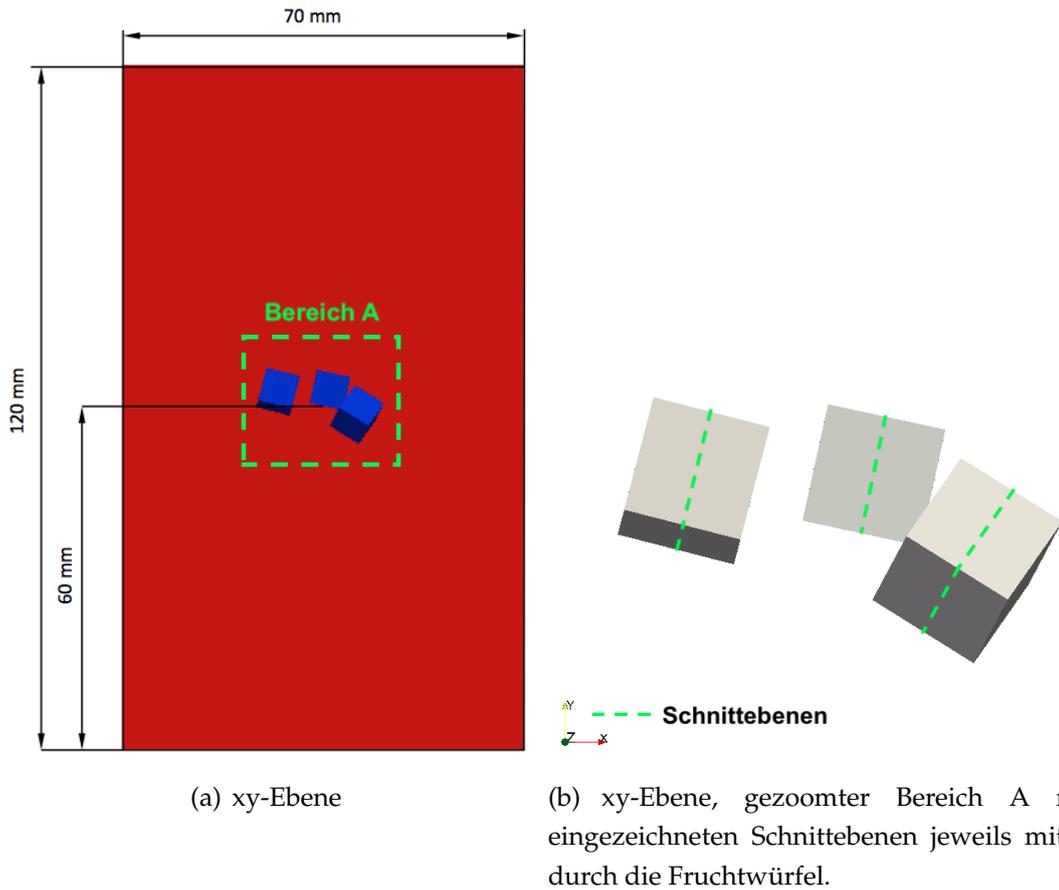


Abbildung 7.7: Anordnung von drei Erdbeerstücken im Strömungskanal. Strömungskanal  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm, Seitenlänge der Erdbeerstücke je 6 mm.

Die Vernetzung der in Abbildung 7.7 (b) eingezeichneten Schnittebenen werden in Abbildung 7.8

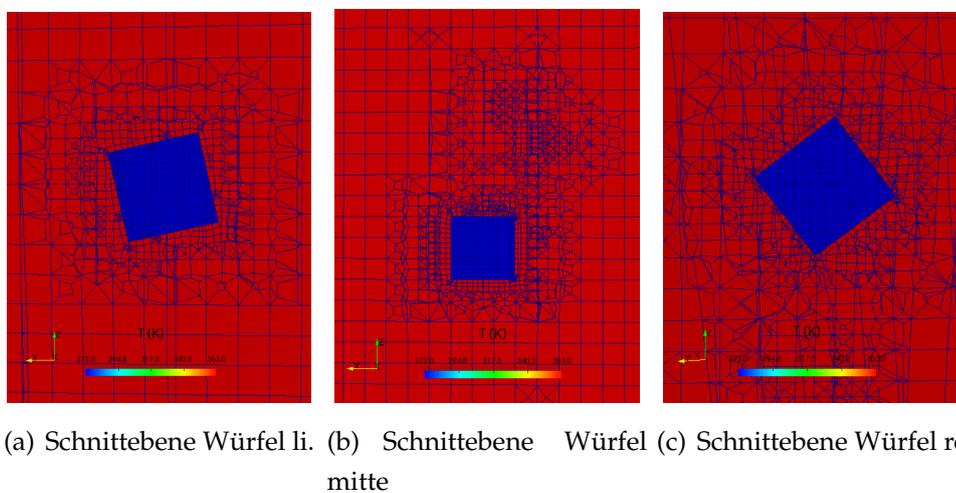


Abbildung 7.8: Vernetzung der Schnittebenen bei drei Erdbeerstücken

In Abbildung 7.9 sieht man den Aufwärmvorgang von mehreren, chaotisch in einem Strömungskanal angeordneten Erdbeerstücken, wobei zur Auswertung die Flüssigkeit ausgeblendet wurde und die Fruchtstücke in der Mitte geteilt wurden.

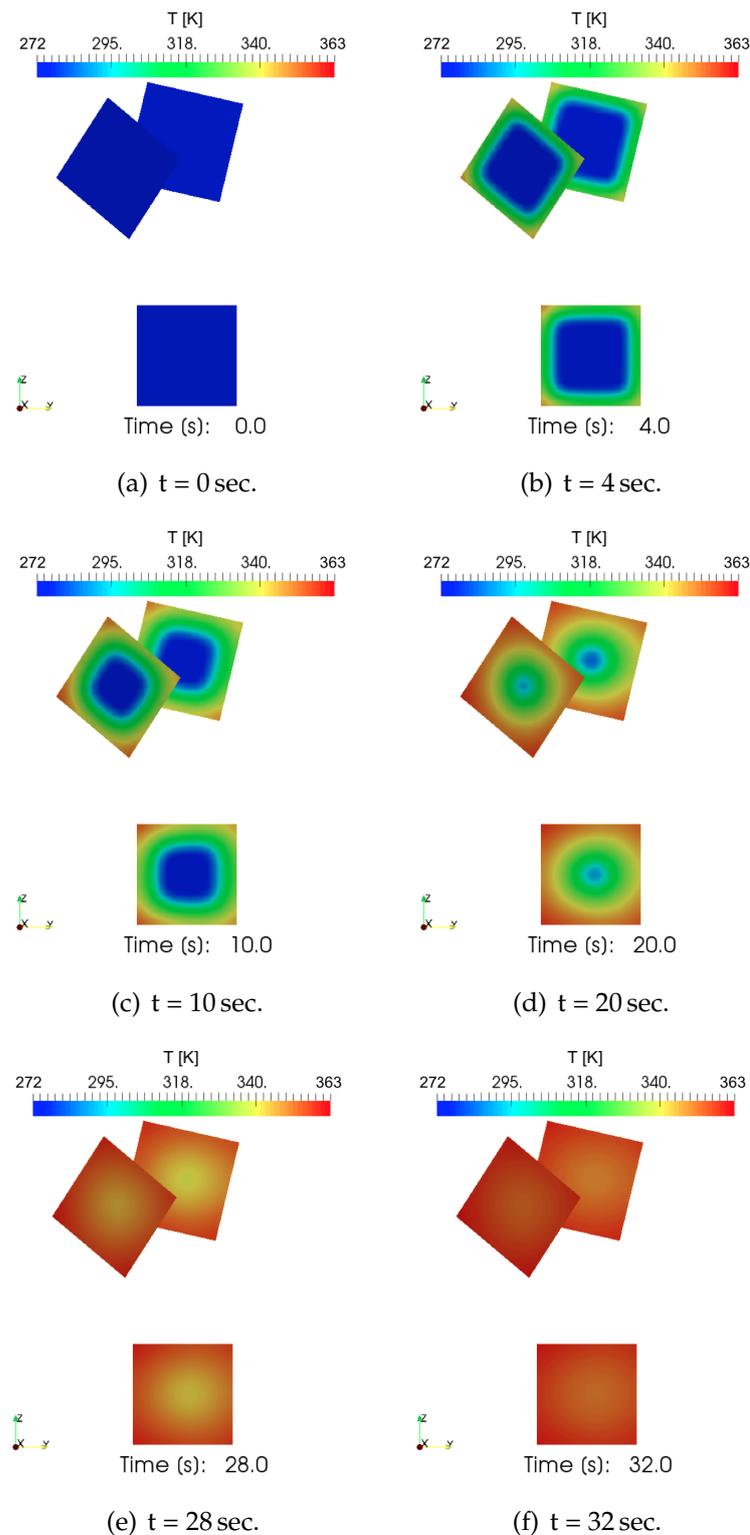


Abbildung 7.9: Aufwärmvorgang in drei chaotisch im Raum angeordneten Würfeln. Die Schnittebene teilt die Würfel jeweils in der Mitte in zwei gleich große Hälften, wobei die näherliegende Hälfte ausgeblendet wurde. Die Strömungsrichtung der Erdbeermarmelade ist in  $+y$ -Richtung. Der Aufwärmvorgang auf die Fluidtemperatur ist nach 20 s abgeschlossen. Strömungskanal  $(x \ y \ z) = (70 \ 120 \ 60)$  mm, Seitenlänge der Erdbeerstücke je 6 mm.

## KAPITEL 7. SIMULATION DES AUFTAUORGANGES VON FRUCHTWÜRFELN

Der Auftauvorgang benötigt ca. 20 s. Es ist eine deutliche Verschiebung der jeweiligen Temperaturfront in den Fruchtwürfeln erkennbar. Diese wird vor allem durch die Strömung beeinflusst.

In Abbildung 7.10 sieht man die Schubspannung an der Oberfläche der Würfel während des Aufwärmvorganges von mehreren, chaotisch in einem Strömungskanal angeordneten Erdbeerstücken, wobei zur Auswertung nur die Boundary Condition *liquidF\_to\_solidF* eingeblendet wurde.

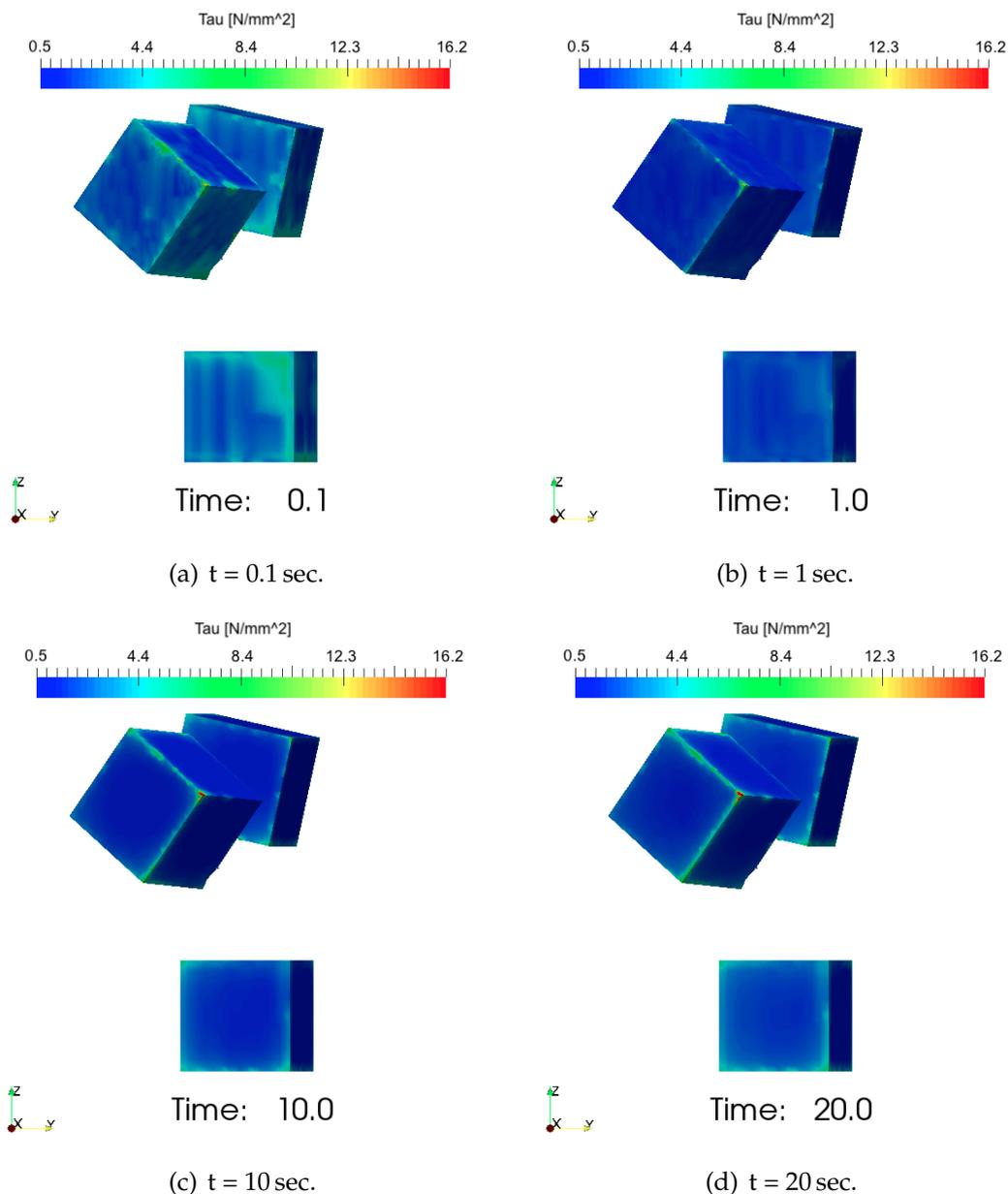


Abbildung 7.10: Scherspannung an der Außenhaut von drei chaotisch im Raum angeordneten Würfel während des Aufwärmvorganges. Strömungskanal ( $x \ y \ z$ ) = (70 120 60) mm, Seitenlänge der Erdbeerstücke je 6 mm.

Die Scherspannungen an den Oberflächen der Würfel sind sehr unterschiedlich. An den Flächen sind sie mit  $2 \text{ N/m}^2$  wesentlich geringer, als jene beim geraden und schrägen Fruchtstück mit  $7 \text{ N/m}^2$ .

### 7.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Aufwärmvorgang von einem gerade im Strömungskanal liegenden Fruchtstück, einem schräg im Strömungskanal liegenden Fruchtstück und mehreren, chaotisch im Raum angeordneten Fruchtstücken simuliert. Der Aufwärmvorgang dauert bei den hier betrachteten Fruchtstücken zwischen 17s bei den einzelnen Würfeln und weniger als 20s bei mehreren Fruchtwürfeln. Die berechnete Scherspannung an der Oberfläche der Würfel ergibt Werte zwischen  $0,1$  und  $25 \text{ N/m}^2$ . In der Literaturstelle Kraft (2012) werden kritische Werte der Scherspannung für Früchte, im Bereich von  $0,01$  bis  $0,05 \text{ N/mm}^2$  ( $10^4$  bis  $5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ ) angegeben. Da die Abweichungen sehr groß sind, sollte hier erneut eine Literaturrecherche gemacht werden, beziehungsweise müssen die Normalspannungen der verwendeten Früchte experimentell ermittelt werden.

# Kapitel 8

## Optimierung des Pasteurisationsprozesses

Die Werte für die maximale Scherspannung wurden in den getätigten Simulationen weit unterschritten. In Kapitel 7 wurde eine Reynolds-Zahl von 1,14 erreicht. Diese wurde analog zu Gleichung (2.10) mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,003 m/s, einer charakteristischen Länge von 0,006 m, einer Dichte der Erdbeermarmelade von 1251 kg/m<sup>3</sup> und einer dynamischen Viskosität von 0,0197 Pa·s, berechnet. Um mit dieser Simulation erste Aussagen über die erlaubte Umdrehungsgeschwindigkeit treffen zu können, muss der Solver zuerst um das Turbulenzmodell erweitert werden, da durch die hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten des Rührwerkes turbulente Strömungen entstehen. Danach kann die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit iterativ nach Abbildung 8.1 optimiert werden.

Zuerst muss eine maximale Scherspannung definiert werden, z.B. durch den in der Literatur gefundenen maximalen Wert, multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor. Als nächstes muss die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührwerkes abgeschätzt werden. Die Geschwindigkeit am *Inlet*,  $u_{\text{Inlet}}$ , im Strömungskanal, ergibt sich aus der Umdrehungsgeschwindigkeit,  $U_{\text{Rührwerk}}$ , multipliziert mit dem Radius des Rührwerkes  $r_{\text{Rührwerk}}$  (siehe Gleichung (8.1)). Um die maximale Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen, wird der Radius des Rührwerks benötigt. Die Geschwindigkeit wird am *Inlet* des Strömungskanals als Randbedingung gesetzt und die Simulation kann durchgeführt werden. Nach der Simulation wird die maximale Scherspannung am Fruchtwürfel ermittelt. Bei zu hohen Scherspannungen wird die Umdrehungsgeschwindigkeit reduziert, bei zu geringen erhöht. Diese iterative Ermittlung der optimalen Umdrehungsgeschwindigkeit kann für mehrere Temperaturen durchgeführt werden. Diese kann z.B. in 10-Grad Schritten, von der geringsten Temperatur bis zur höchsten Temperatur der Flüssigkeit während des Prozesses, durchgeführt werden.

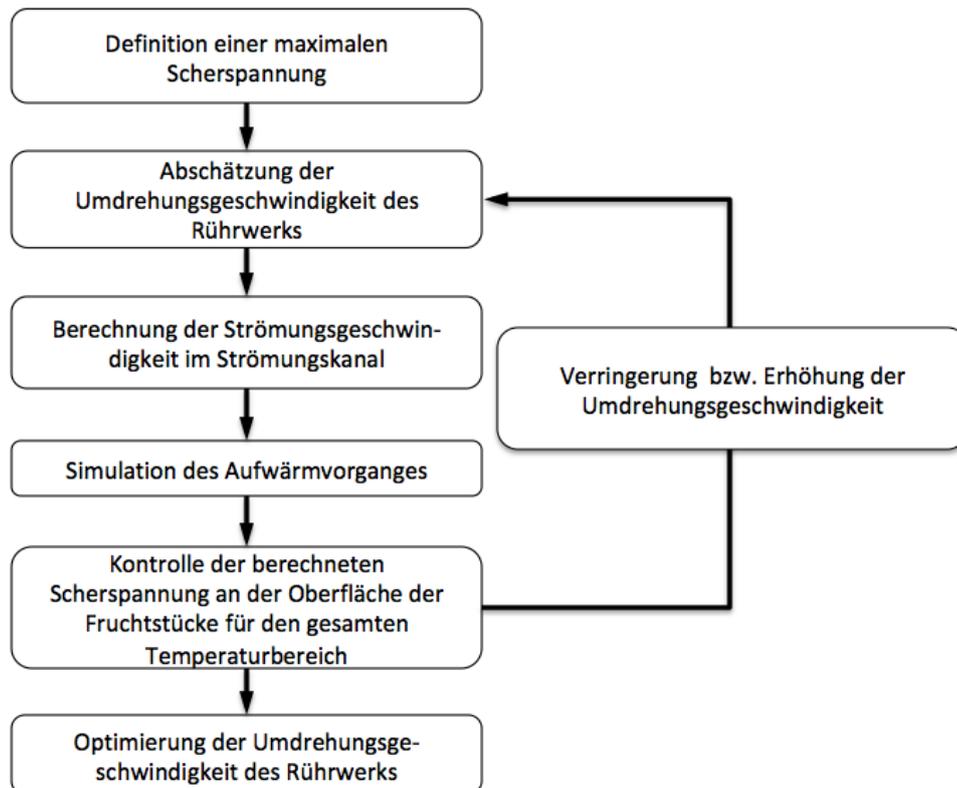


Abbildung 8.1: Iterative Erstellung der optimalen Funktion der Umdrehungsgeschwindigkeit

Aus dem jeweiligen Optima der Umdrehungsgeschwindigkeit je Temperatur wird die Funktion der Umdrehungsgeschwindigkeit über die Prozesszeit entwickelt.

$$u_{Inlet} = r_{Ruehrwerk} \cdot \frac{U_{Ruehrwerk}}{2 \cdot \Pi \cdot 60} \quad (8.1)$$

Anhand der Ergebnisse des Experimentes in Kapitel 3 kann vorhergesagt werden, dass die Umdrehungsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur, aufgrund der sinkenden Viskosität (Abbildung 3.3), ansteigen darf. Mit sinkender Viskosität verringert sich die auf das Fruchtstück ausgeübte Scherspannung. Aufgrund der Abnahme der maximal zulässigen Scherspannung des Fruchtstückes sind wiederum geringere Umdrehungsgeschwindigkeiten zulässig.

Für die iterative Bestimmung der maximalen Umdrehungsgeschwindigkeit können erste Näherungen durch die Funktion der maximal zulässigen Scherspannung des Fruchtwürfels erzielt werden (Abbildung 8.2). Dafür muss die Schergeschwindigkeit auf die Umdrehungsgeschwindigkeit umgerechnet werden.

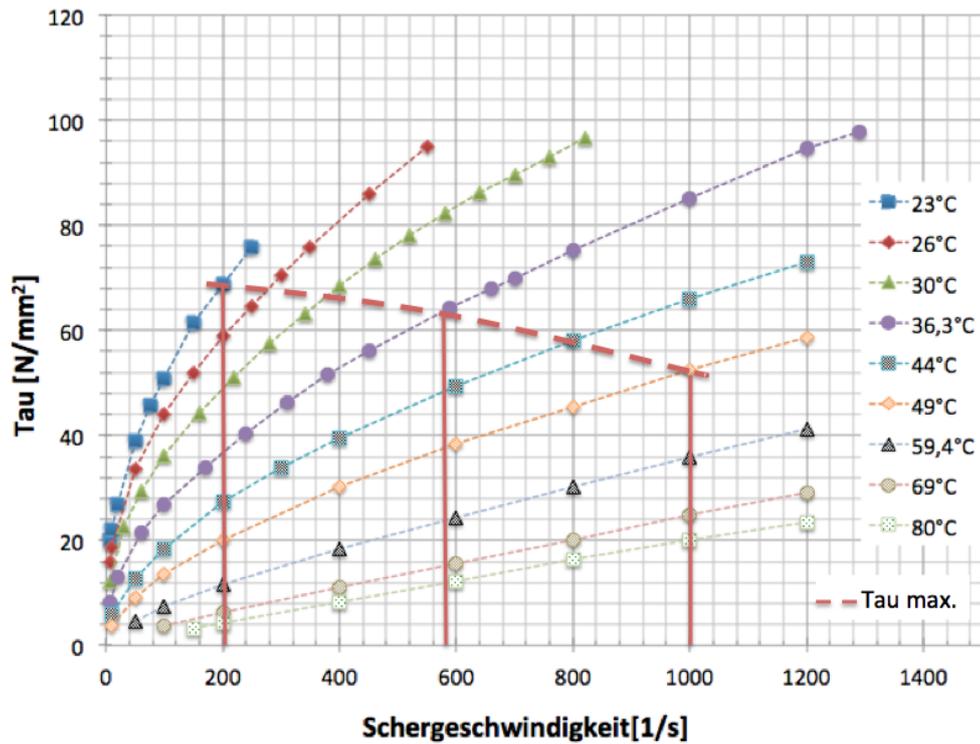


Abbildung 8.2: Erste Annäherung an die maximale Schergeschwindigkeit, somit auch an die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit, über die Funktion der maximalen Scherspannung des Fruchtstückes.

Für genauere Berechnungen muss die Simulation mittels *Diskreter Elemente Methode* erfolgen. Diese berücksichtigt ebenfalls die sehr kritischen Bereiche an den Seiten der Rührblätter.

# Kapitel 9

## Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird die Diplomarbeit kurz zusammengefasst. In einem Ausblick soll auf mögliche weiterführende Arbeiten hingewiesen werden, da diese komplexe Thematik nach wie vor ungelöste Bereiche aufweist. Dazu werden weitere Überlegungen zur Beschädigung von Stoffen in der Pasteurisation angeführt.

### 9.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Simulation eines Pasteurisationsprozesses mit der die Prozessparameter so eingestellt werden können, dass die Pasteurisation so schonend wie möglich für die Struktur des Feststoffes ist. Dafür wurde die Aufgabenstellung in verschiedene Problemstellungen unterteilt, teilweise durch Experimente nachgestellt und anschließend simuliert. Am Ende wurden die gelösten Problemstellungen zusammengesetzt. Warum diese Arbeit erstellt wurde, wird dabei in der Einleitung behandelt, in Kapitel 2 wird auf die Theorie zum Pasteurisationsprozess, zu CFD und zu theoretischen Hintergründen der Wärmeleitung, des Auftauens und der Scherspannung eingegangen. Im Kapitel 3 werden Experimente zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Temperatur, Scherspannung und dynamischer Viskosität mittels eines Rotationsviskosimeters durchgeführt. Daraus wird die, für die Simulation nötige Funktion der dynamischen Viskosität, welche von der Temperatur und der Schergeschwindigkeit abhängt, entwickelt. Diese wurde anschließend in den *OpenFOAM*-Case eingebettet und es wurden zur Kontrolle einige Kombinationen von Temperatur und Schergeschwindigkeit simuliert. Die Abweichungen zwischen Experiment und Simulation waren dabei hauptsächlich von der erstellten Funktion abhängig, die, da sie ein breites Spektrum an Temperaturen und Schergeschwindigkeiten abbilden muss, einen Kompromiss zwischen den verschiedenen experimentell ermittelten Kurven darstellt. Im Kapitel 4 wurde der Aufwärmprozess untersucht, wobei ein besonderer Fokus auf den Auftauvorgang gelegt wurde. Dieser ist bestimmend für die richtige Simulation des Prozesses. Zuerst wurde ein

Auftauvorgang einer Eiskugel in einem Strömungskanal simuliert. Um diesen zu überprüfen wurde die Enthalpiebilanz um den Bilanzraum Strömungskanal berechnet. Da die Schließbedingung jedoch nicht erfüllt wurde, musste in Kapitel 5 ein experimenteller Aufbau entworfen werden, in welchem ein Kartoffelstück aufgetaut wurde. Bei dem Vergleich von dem Auftauvorgang einer Kartoffel und der Simulation dieses Prozesses wurde ersichtlich, dass die Simulation fehlerhaft war. Einerseits muss die Funktion der Schmelzenthalpie, welche in eine  $c_p$ -Funktion umgewandelt wurde, für eine richtige Berechnung in einer schmalen Stufenfunktion eingegeben werden, andererseits ist die Funktion der spezifischen Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur, essentiell für die Dauer des Schmelzvorganges. Deshalb wurde in Kapitel 6 ein Experiment durchgeführt, welches die Aufwärmung eines Kartoffelstückes beinhaltet. Dieses Experiment wurde zur Anpassung der Funktion der Wärmeleitfähigkeit verwendet, indem ein Case erstellt wurde, der dieses Experiment nachstellt. Bei den Experimenten wurden aus verschiedenen Gründen Kartoffeln verwendet. Die wichtigsten Gründe dafür waren die Größe, die leichte Handhabung, die während der Experimente erhältliche, ähnliche subjektive Produktqualität und die langsame Verderblichkeit, welche zu einer schnellen Änderung der Stoffeigenschaften führen würde. Nachdem die Themen Schergeschwindigkeit und Aufwärm-/Auftauprozess abgehandelt wurden, wurden diese Teilergebnisse in Kapitel 4 bis 6 zusammengesetzt und es konnte die Scherspannung an der Oberfläche des Feststoffes während des Aufwärmvorganges simuliert werden. Nun wurden die in der Literatur gefundenen Stoffdaten von Erdbeeren für den Feststoff und die in Kapitel 3 gemessenen Stoffwerte für die Erdbeermarmelade eingesetzt. Bei jenen Stoffdaten, welche nicht in der Literatur gefunden wurden, wurden die Stoffwerte von ähnlichen Stoffen eingesetzt. Dadurch wird eine Annäherung erreicht. Diese Stoffwerte können in Folgearbeiten durch eine erneute Literaturrecherche, beziehungsweise durch Experimente ermittelt werden. In Kapitel 8 wird gezeigt wie anhand dieser Diplomarbeit erste Optimierungen des Pasteurisationsprozesses erzielt werden können.

Für eine bessere Übersicht, welche Stoffdaten in der gefundenen Literatur vorhanden sind, welche selbst gemessen werden mussten und welche angenähert werden, dient die Tabelle in Anhang E.

## 9.2 Ausblick

Als optimales Ergebnis gilt ein aus dem Zweistoffgemisch entwickeltes Fluid mit Stoffeigenschaften, die das Feststoff-Flüssigkeitsgemisch abbilden. Dadurch können komplette Pasteurisationsanlagen simuliert werden und jene Bereiche,

in denen eine zu hohe Scherspannung auftritt, durch eine optimierte Geometrie substituiert werden.

### **Überlegungen zu Beschädigung von Stoffen in der Pasteurisation für Folgearbeiten**

Um die maximale auftretende Scherspannung zu ermitteln, kann diese Simulation mit einer *Diskreten Elemente Methode* gekoppelt werden, wodurch sich die absoluten Scherspannungen ergeben und nicht relative. Diese müssen um die Geschwindigkeit des Feststoffes korrigiert werden, weil der Feststoff nicht starr im Raum verharrt, sondern sich relativ zur Flüssigkeit mitbewegt.

Zusätzlich muss für den Pasteurisationsprozess der Effekt des Zerplatzens bei an der Oberfläche schwimmenden Fruchtstücken untersucht werden. Durch den angesetzten Unterdruck beim Abkühlprozess kann es durch den verminderten Dampfdruck zu einem schlagartigen Verdampfen des im Fruchtstück befindlichen Wassers kommen. Die plötzliche Volumenausdehnung des Dampfes kann zu einem Zerplatzen der Fruchtstücke führen. Dadurch würde eine unerwünschte Zerkleinerung dieser entstehen. Durch die erforderlichen hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten des Rührers, um eine schnelle Erwärmung zu ermöglichen und dadurch die Prozesszeit zu verkürzen, gelangen viele Fruchtstücke an die Oberfläche des Flüssigkeitsspiegels. Daher ist dieser Prozess nicht zu vernachlässigen.

# Anhang A

## Messdaten und *OpenFOAM*-Files zu Kapitel 3

Tabelle A.1: Messungen der Viskositätsänderung von Erdbeermarmelade beim Aufwärmvorgang 1ter Teil.

Viskositätsmessung von Bio-Erdbeer-Konfitüre in verschiedenen Drehzahl(Scher)geschwindigkeiten und bei verschiedenen							
Messungen Raphael Pieringer, BSc							
Durchgeführt 08.11.2017							
Ort: BI04 VT Hauptlabor, Getreidemarkt, TU Wien							
Gerät: RM180Rheomat; Messsystem 11							
T	M	D	tau	mu	mu		
°C	mN m	s-1	Pa	Pa s	Pa s		
23°C	23,0	0,0	6,5	20,0	3,077	3,0769	
	0,0	0,0	10,0	22,1	2,210	2,2100	
	0,0	0,0	20,0	26,9	1,345	1,3450	
	0,0	0,0	50,0	38,9	0,778	0,7780	
	0,0	0,0	75,0	45,8	0,611	0,6107	
	22,2	0,0	100,0	50,9	0,509	0,5090	
	0,0	0,0	150,0	61,5	0,410	0,4100	
	0,0	0,0	200,0	68,7	0,344	0,3435	
	0,0	0,0	250,0	75,8	0,303	0,3032	
	26,0	0,0	6,5	15,8	2,431	2,4308	
26°C	0,0	0,0	10,0	18,7	1,870	1,8700	
	0,0	0,0	50,0	33,5	0,670	0,6700	
	0,0	0,0	100,0	44,0	0,440	0,4400	
	0,0	0,0	150,0	52,0	0,347	0,3467	
	0,0	0,0	200,0	58,9	0,295	0,2945	
	0,0	0,0	250,0	64,7	0,259	0,2588	
	0,0	0,0	300,0	70,4	0,235	0,2347	
	0,0	0,0	350,0	75,8	0,217	0,2166	
	0,0	0,0	450,0	85,9	0,191	0,1909	
	0,0	0,0	550,0	95,0	0,173	0,1727	
30°C	29,8	0,0	6,5	12,2	1,877	1,8769	
	0,0	0,0	30,0	22,5	0,750	0,7500	
	0,0	0,0	60,0	29,5	0,492	0,4917	
	0,0	0,0	100,0	36,1	0,361	0,3610	
	0,0	0,0	160,0	44,3	0,277	0,2769	
	0,0	0,0	220,0	51,1	0,232	0,2323	
	0,0	0,0	280,0	57,4	0,205	0,2050	
	0,0	0,0	340,0	63,3	0,186	0,1862	
	0,0	0,0	400,0	68,5	0,171	0,1713	
	0,0	0,0	460,0	73,5	0,160	0,1598	
	0,0	0,0	520,0	78,1	0,150	0,1502	
	0,0	0,0	580,0	82,2	0,142	0,1417	
	0,0	0,0	640,0	86,2	0,135	0,1347	
	0,0	0,0	700,0	89,5	0,128	0,1279	
	30,3	0,0	760,0	93,0	0,122	0,1224	
	0,0	0,0	820,0	96,7	0,118	0,1179	
	36,3°C	36,1	0,0	6,5	8,3	1,275	1,2754
		0,0	0,0	20,0	13,1	0,655	0,6550
0,0		0,0	60,0	21,5	0,358	0,3583	
35,7		0,0	100,0	26,8	0,268	0,2680	
0,0		0,0	170,0	34,0	0,200	0,2000	
0,0		0,0	240,0	40,4	0,168	0,1683	
0,0		0,0	310,0	46,3	0,149	0,1494	
0,0		0,0	380,0	51,5	0,136	0,1355	
0,0		0,0	450,0	56,1	0,125	0,1247	
0,0		0,0	590,0	64,2	0,109	0,1088	
0,0		0,0	660,0	67,9	0,103	0,1029	
0,0		0,0	700,0	69,9	0,100	0,0999	
44°C	0,0	0,0	800,0	75,2	0,094	0,0940	
	0,0	0,0	1000,0	85,2	0,085	0,0852	
	0,0	0,0	1200,0	94,6	0,079	0,0788	
	36,6	0,0	1291,0	97,9	0,076	0,0758	
	0,0	0,0	520,0	62,9	0,121	0,1210	
	42,2	0,0	10,0	5,9	0,591	0,5910	
	0,0	0,0	50,0	12,9	0,258	0,2580	
	0,0	0,0	100,0	18,4	0,184	0,1840	
	0,0	0,0	200,0	27,4	0,137	0,1370	
	43,3	0,0	300,0	33,9	0,113	0,1130	
	0,0	0,0	400,0	39,5	0,099	0,0988	
	0,0	0,0	600,0	49,5	0,083	0,0825	
49°C	0,0	0,0	800,0	58,0	0,073	0,0725	
	44,7	0,0	1000,0	66,0	0,066	0,0660	
	0,0	0,0	1200,0	73,1	0,061	0,0609	
	49,0	0,0	10,0	3,7	0,368	0,3680	
	0,0	0,0	50,0	9,0	0,180	0,1800	
	0,0	0,0	100,0	13,5	0,135	0,1350	
	0,0	0,0	200,0	20,1	0,101	0,1005	
	0,0	0,0	400,0	30,2	0,076	0,0755	
	0,0	0,0	600,0	38,4	0,064	0,0640	
	0,0	0,0	800,0	45,5	0,057	0,0569	
	0,0	0,0	1000,0	52,4	0,052	0,0524	
	0,0	0,0	1200,0	58,8	0,049	0,0490	

Tabelle A.2: Messungen der Viskositätsänderung von Erdbeermarmelade beim Aufwärmvorgang 2ter Teil.

59,4°C	59,4	0,0	50,0	4,6	0,093	0,0926
	0,0	0,0	100,0	7,3	0,073	0,0730
	0,0	0,0	200,0	11,7	0,059	0,0585
	0,0	0,0	400,0	18,4	0,046	0,0460
	0,0	0,0	600,0	24,4	0,041	0,0407
	0,0	0,0	800,0	30,3	0,038	0,0379
	0,0	0,0	1000,0	36,0	0,036	0,0360
	0,0	0,0	1200,0	41,1	0,034	0,0343
69°C	69,0	0,0	10,0	0,0	0,000	0,0000
	0,0	0,0	50,0	0,0	0,000	0,0000
	0,0	0,0	100,0	3,6	0,036	0,0364
	0,0	0,0	200,0	6,3	0,031	0,0314
	0,0	0,0	400,0	11,0	0,028	0,0275
	0,0	0,0	600,0	15,6	0,026	0,0260
	0,0	0,0	800,0	20,1	0,025	0,0251
	0,0	0,0	1000,0	24,8	0,025	0,0248
80°C	80,0	0,0	10,0	0,0	0,000	0,0000
	0,0	0,0	50,0	0,0	0,000	0,0000
	0,0	0,0	150,0	3,3	0,022	0,0223
	0,0	0,0	200,0	4,4	0,022	0,0221
	0,0	0,0	400,0	8,3	0,021	0,0208
	0,0	0,0	600,0	12,3	0,021	0,0205
	77,6	0,0	800,0	16,3	0,020	0,0204
	0,0	0,0	1000,0	20,2	0,020	0,0202
0,0	0,0	1200,0	23,6	0,020	0,0197	

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
|  \ \  /  | F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \  /  | O peration | Version: plus
|  \ \  /  | A nd       | Web: www.OpenFOAM.com
|  \ \  /  | M anipulation|
|-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    top
    {
        type      zeroGradient;
        value     uniform (0 0 0);
    }
    movingWall
    {
        type      rotatingWallVelocity;
        origin    (0 0 0);
        axis      (0 0 1);
        omega     8.11;
    }
    wall
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform (0 0 0);
    }
}
// *****

```

Abbildung A.1: File  $u$  für die Berechnung der Schergeschwindigkeit im Rotationsviskosimeter.

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: v3.0+
| \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.com
| \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
|-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       thermophysicalProperties;
}

// *****
//*****Temperature dependent power law:
mu = (muTempCoeffs<0> + muTempCoeffs<1>*T + ...)*pow(shearRate, muPowerLawExp-1)
muMin -> lower viscosity bound
muMax -> upper viscosity bound
\*****/

thermoType
{
    type          heRhoThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     tempPowerLaw;
    thermo        hPolynomial;
    equationOfState icoPolynomial;
    specie        specie;
    energy        sensibleInternalEnergy;
}

mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight    50;
    }
    equationOfState
    {
        rhoCoeffs<8>    (1251.12 0 0 0 0 0 0 0);
    }
    thermodynamics
    {
        Hf            0;
        Sf            0;
        CpCoeffs<8>    (4000 0 0 0 0 0 0 0);
    }
    transport
    {
        muPowerLawExp    0.48525;
        muMin            0.0001;
        muMax            1000;
        muTempCoeffs<8> (136.861 -0.372297 -0.0013123 0.00000360881 0 0 0 0);
        kappaCoeffs<8>  (0.5984 0 0 0 0 0 0 0);
    }
}

// *****

```

Abbildung A.2: File ./constant/medium/thermophysicalProperties anhand der Berechnung des Cases-Cylinder j100 T26.

# Anhang B

## Kontrolle der Enthalpiedifferenz

```
import numpy as np
import matplotlib as mpl
mpl.use('Agg')
import matplotlib.pyplot as plt
#from matplotlib.ticker import save as tikz_save
import csv
import pandas as pd
from collections import OrderedDict

temperature = {}
test={}

for case in range(0, 64):
    temperature[case] = pd.read_csv('dT/dT.'+str(case)+'.csv', header=0, delimiter = ',')

myfile = open('AllData', 'wb')
for j in range(0,np.size(temperature[1].values)):
    myfile.write(temperature[1].keys()[j]+',')
myfile.write('\n')
print(np.size(temperature[1].keys))
for case in range(0,64):
    for i in range (0, np.size(temperature[case].values)):
        myfile.write(str(temperature[case].values[0][i])+',')
    myfile.write('\n')
```

Abbildung B.1: Für die Zusammenfassung der einzelnen Simulationsdaten nötiges *Python*-Skript.

# Anhang C

## Messdaten der Experimente im Strömungskanal

Tabelle C.1: Geförderter Volumenstrom je nach eingestellter Pumpenleistung am Umlaufthermostat.

### Auslitern der Pumpe des Umlaufthermostats

Pumpenleistung %	Zeiteinheit [s]	Liter in Zeiteinheit	Liter pro Minute
7	20	0,6	1,8
10	20	1,08	3,24
12	10	0,86	5,16
15	10	1,22	7,32
20	10	1,28	7,68
30	10	1,4	8,4
40	10	1,4	8,4
50	10	1,4	8,4
60	10	1,4	8,4
70	10	1,44	8,64

Tabelle C.2: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 37\text{ °C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 1,6\text{ l/min}$ .

Versuch 1: $T = 37\text{ °C}$ , $u = 1,6\text{ l/min}$												
		Pt1000			Pt100		Pt1000			Pt100		
		Aufgezeichnete Werte						Korrigierte Werte				
Zeit [h:m:s]	relative Zeit [h:m:s]	Pt1000 abge- strömte Seite [°C]	Pt1000 ange- strömte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	
0:01:30	0:00:00	-15,7	-15,0	-16,0	36,8	36,1	-15,7	-15,0	-16,0	36,8	36,1	
0:01:45	0:00:15	-10,0	-9,4	-15,5	36,8	36,1	-10,0	-9,4	-15,5	36,8	36,1	
0:02:00	0:00:30	-6,9	-6,2	-14,3	36,8	36,2	-6,9	-6,2	-14,3	36,8	36,2	
0:02:27	0:00:57	-4,3	-3,6	-11,3	36,8	36,0	-4,3	-3,6	-11,3	36,8	36,0	
0:02:30	0:01:00	-4,1	-3,4	-11,0	36,8	36,0	-4,1	-3,4	-11,0	36,8	36,0	
0:02:40	0:01:10	-3,5	-2,8	-10,1	36,8	36,1	-3,5	-2,8	-10,1	36,8	36,1	
0:03:10	0:01:40	-2,2	-1,5	-7,9	36,8	36,0	-2,2	-1,5	-7,9	36,8	36,0	
0:03:30	0:02:00	-1,4	-0,7	-6,9	36,8	36,1	-1,4	-0,7	-6,9	36,8	36,1	
0:03:50	0:02:20	-0,7	0,2	-6,1	36,7	36,2	-0,7	0,2	-6,1	36,7	36,2	
0:04:10	0:02:40	0,2	1,3	-5,4	36,8	36,1	0,2	1,3	-5,4	36,8	36,1	
0:04:30	0:03:00	1,3	2,6	-4,9	36,8	36,1	1,3	2,6	-4,9	36,8	36,1	
0:05:30	0:04:00	4,1	5,5	-3,7	36,7	36,0	4,1	5,5	-3,7	36,7	36,0	
0:06:30	0:05:00	6,6	8,0	-2,9	36,7	36,1	6,6	8,0	-2,9	36,7	36,1	
0:07:30	0:06:00	9,4	10,9	-2,3	36,6	36,0	9,4	10,9	-2,3	36,6	36,0	
0:08:30	0:07:00	11,9	13,5	-1,8	36,7	35,9	11,9	13,5	-1,8	36,7	35,9	
0:09:30	0:08:00	14,0	15,7	-1,4	36,7	36,0	14,0	15,7	-1,4	36,7	36,0	
0:10:27	0:08:57	15,8	17,5	-1,0	36,7	36,0	15,8	17,5	-1,0	36,7	36,0	
0:10:42	0:09:12	16,3	18,0	-0,9	36,7	36,0	16,3	18,0	-0,9	36,7	36,0	
0:10:58	0:09:28	16,7	18,5	-0,8	36,7	36,1	16,7	18,5	-0,8	36,7	36,1	
0:11:18	0:09:48	17,3	19,0	-0,7	36,7	36,0	17,3	19,0	-0,7	36,7	36,0	
0:11:36	0:10:06	17,8	19,5	-0,6	36,7	36,0	17,8	19,5	-0,6	36,7	36,0	
0:11:56	0:10:26	18,4	20,1	-0,5	36,8	36,0	18,4	20,1	-0,5	36,8	36,0	
0:12:12	0:10:42	18,8	20,5	-0,4	36,8	35,9	18,8	20,5	-0,4	36,8	35,9	
0:12:32	0:11:02	19,3	21,0	-0,3	36,7	36,0	19,3	21,0	-0,3	36,7	36,0	
0:12:49	0:11:19	19,8	21,5	-0,2	36,8	36,0	19,8	21,5	-0,2	36,8	36,0	
0:13:09	0:11:39	20,3	22,0	-0,1	36,8	36,1	20,3	22,0	-0,1	36,8	36,1	
0:13:24	0:11:54	20,6	22,4	0,0	36,7	36,0	20,6	22,4	0,0	36,7	36,0	
0:13:43	0:12:13	21,1	22,8	0,1	36,7	36,1	21,1	22,8	0,1	36,7	36,1	
0:13:58	0:12:28	21,4	23,2	0,2	36,7	36,1	21,4	23,2	0,2	36,7	36,1	
0:14:15	0:12:45	21,9	23,5	0,3	36,7	36,0	21,9	23,5	0,3	36,7	36,0	
0:14:29	0:12:59	22,2	23,8	0,4	36,8	36,1	22,2	23,8	0,4	36,8	36,1	
0:15:55	0:14:25	24,1	25,7	1,0	36,8	36,1	24,1	25,7	1,0	36,8	36,1	
0:17:30	0:16:00	25,9	27,5	2,3	36,8	36,1	25,9	27,5	2,3	36,8	36,1	
0:18:30	0:17:00	27,0	28,5	3,6	36,7	36,1	27,0	28,5	3,6	36,7	36,1	
0:20:30	0:19:00	29,0	30,5	8,3	36,8	36,1	29,0	30,5	8,3	36,8	36,1	
0:22:30	0:21:00	30,7	32,1	16,9	36,8	36,1	30,7	32,1	16,9	36,8	36,1	
0:24:30	0:23:00	32,2	33,6	24,4	36,8	36,2	32,2	33,6	24,4	36,8	36,2	
0:27:30	0:26:00	34,1	35,4	29,9	36,7	36,1	34,1	35,4	29,9	36,7	36,1	
0:30:30	0:29:00	35,2	36,6	32,8	36,8	36,1	35,2	36,6	32,8	36,8	36,1	
0:33:30	0:32:00	36,0	37,2	34,5	36,8	36,1	36,0	37,2	34,5	36,8	36,1	
0:35:30	0:34:00	36,3	37,5	35,2	36,8	36,1	36,3	37,5	35,2	36,8	36,1	
0:36:07	0:34:37	36,4	37,6	35,4	36,8	36,2	36,4	37,6	35,4	36,8	36,2	

Tabelle C.3: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 37\text{ °C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 0,8\text{ l/min}$ .

Versuch 2: $T = 37\text{ °C}$ , $u = 0,8\text{ l/min}$													
		Pt1000					Pt100		Pt1000			Pt100	
		Aufgezeichnete Werte						Korrigierte Werte					
Zeit [h:m:s]	Zeitverschiebung [h:m:s] 00:00:04 relative Zeit [h:m:s]	Pt1000 abge-	Pt1000 ange-	Pt1000 Mitte	Pt100 Einlass	Pt100 Auslass	Pt1000 abge-	Pt1000 ange-	Pt1000 Mitte	Pt100 Einlass	Pt100 Auslass		
		strömte Seite [°C]	strömte Seite [°C]	[°C]	[°C]	[°C]	strömte Seite [°C]	strömte Seite [°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
0:01:39	0:00:04	-14,4	-13,0	-16,2	36,4	35,5	-15,2	-12,5	-17,4	37,2	36,7		
0:02:32	0:00:57	-6,0	-4,0	-11,3	36,4	35,3	-6,8	-3,9	-12,5	37,2	36,5		
0:02:39	0:01:04	-5,6	-3,6	-10,7	36,4	35,3	-6,4	-3,6	-11,9	37,2	36,5		
0:03:39	0:02:04	-3,2	-1,1	-7,2	36,3	35,2	-4,0	-1,2	-8,4	37,1	36,4		
0:04:39	0:03:04	-1,8	1,7	-5,3	36,1	35,1	-2,6	1,5	-6,5	36,9	36,3		
0:05:39	0:04:04	-0,6	4,7	-4,1	36,0	35,0	-1,4	4,3	-5,3	36,8	36,2		
0:08:39	0:07:04	4,0	11,7	-2,1	36,0	34,8	3,2	11,0	-3,3	36,8	36,0		
0:11:39	0:10:04	10,2	18,3	-1,0	35,9	34,8	9,4	17,3	-2,2	36,7	36,0		
0:14:39	0:13:04	15,7	23,0	0,2	35,9	34,7	14,9	21,8	-1,0	36,7	35,9		
0:17:39	0:16:04	20,4	26,6	2,0	35,9	34,7	19,6	25,2	0,8	36,7	35,9		
0:20:39	0:19:04	24,5	29,5	7,3	36,0	34,8	23,7	28,0	6,1	36,8	36,0		
0:23:39	0:22:04	28,0	31,7	18,0	35,9	34,7	27,2	30,1	16,8	36,7	35,9		
0:26:39	0:25:04	30,9	33,7	26,4	36,0	34,8	30,1	32,0	25,2	36,8	36,0		
0:29:39	0:28:04	33,0	35,1	30,4	36,0	34,8	32,2	33,3	29,2	36,8	36,0		
0:36:39	0:35:04	35,2	36,6	34,4	36,0	34,9	34,4	34,7	33,2	36,8	36,1		
0:41:39	0:40:04	35,7	37,0	35,4	36,0	34,8	34,9	35,1	34,2	36,8	36,0		
0:44:39	0:43:04	35,9	37,1	35,7	36,0	34,9	35,1	35,2	34,5	36,8	36,1		

Tabelle C.4: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 47\text{ °C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 1,6\text{ l/min}$ .

Versuch 3: $T = 47\text{ °C}$ , $u = 1,6\text{ l/min}$													
		Pt1000					Pt100		Pt1000			Pt100	
		Aufgezeichnete Werte						Korrigierte Werte					
Zeit [h:m:s]	Zeitverschiebung [h:m:s] 00:00:06 relative Zeit [h:m:s]	Pt1000 abge-	Pt1000 ange-	Pt1000 Mitte	Pt100 Einlass	Pt100 Auslass	Pt1000 abge-	Pt1000 ange-	Pt1000 Mitte	Pt100 Einlass	Pt100 Auslass		
		strömte Seite [°C]	strömte Seite [°C]	[°C]	[°C]	[°C]	strömte Seite [°C]	strömte Seite [°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
0:01:30	0:00:06	-15,7	-14,4	-16,1	46,5	45,3	-15,6	-15,5	-15,7	48,2	47,3		
0:02:21	0:00:57	-6,2	-3,2	-11,3	46,5	45,3	-6,1	-4,3	-10,9	48,2	47,3		
0:03:00	0:01:36	-3,8	-0,5	-8,0	46,4	45,1	-3,7	-1,6	-7,6	48,1	47,1		
0:04:00	0:02:36	-1,9	4,7	-5,3	46,3	45,1	-1,8	3,6	-4,9	48,0	47,1		
0:05:00	0:03:36	-0,1	8,7	-3,8	46,2	45,0	0,0	7,6	-3,4	47,9	47,0		
0:06:00	0:04:36	3,0	13,2	-2,8	46,1	44,8	3,1	12,1	-2,4	47,8	46,8		
0:09:00	0:07:36	11,5	24,4	-1,0	46,1	44,8	11,6	23,3	-0,6	47,8	46,8		
0:10:00	0:08:36	14,4	27,1	-0,5	46,1	44,9	14,5	26,0	-0,1	47,8	46,9		
0:11:00	0:09:36	17,1	29,3	0,1	46,1	44,8	17,2	28,2	0,5	47,8	46,8		
0:13:00	0:11:36	22,2	33,2	1,6	46,1	44,8	22,3	32,1	2,0	47,8	46,8		
0:15:00	0:13:36	26,7	36,2	4,5	46,1	44,8	26,8	35,1	4,9	47,8	46,8		
0:17:00	0:15:36	30,8	38,7	10,3	46,1	44,9	30,9	37,6	10,7	47,8	46,9		
0:18:00	0:16:36	32,5	39,8	14,1	46,1	44,9	32,6	38,7	14,5	47,8	46,9		
0:19:00	0:17:36	34,2	40,8	19,1	46,1	45,0	34,3	39,7	19,5	47,8	47,0		
0:21:07	0:19:43	37,3	42,5	28,8	46,1	44,9	37,4	41,4	29,2	47,8	46,9		
0:23:00	0:21:36	39,7	43,9	34,0	46,2	44,9	39,8	42,8	34,4	47,9	46,9		
0:24:00	0:22:36	40,7	44,5	36,0	46,2	45,0	40,8	43,4	36,4	47,9	47,0		
0:28:00	0:26:36	43,5	46,3	41,1	46,2	45,1	43,6	45,2	41,5	47,9	47,1		
0:32:00	0:30:36	44,9	47,1	43,5	46,2	45,0	45,0	46,0	43,9	47,9	47,0		
0:36:00	0:34:36	45,7	47,6	44,7	46,2	45,1	45,8	46,5	45,1	47,9	47,1		

Tabelle C.5: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 47\text{ °C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 0,8\text{ l/min}$ .

Versuch 4: $T = 47\text{ °C}$ , $u = 0,8\text{ l/min}$												
		Pt1000			Pt100			Pt1000			Pt100	
		Aufgezeichnete Werte						Korrigierte Werte				
Zeit [h:m:s]	Zeitverschiebung [h:m:s]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	
	relative Zeit [h:m:s]											
0:01:28	0:00:05	-12,4	-15,1	-15,8	45,5	44,2	-12,3	-16,2	-15,4	47,2	46,2	
0:01:50	0:00:27	-4,7	-8,5	-14,6	45,4	44,4	-4,6	-9,6	-14,2	47,1	46,4	
0:02:20	0:00:57	-1,4	-5,5	-11,3	45,4	44,1	-1,3	-6,6	-10,9	47,1	46,1	
0:03:20	0:01:57	5,7	-2,5	-7,1	45,2	43,9	5,8	-3,6	-6,7	46,9	45,9	
0:03:50	0:02:27	8,4	-1,4	-5,9	45,2	44,1	8,5	-2,5	-5,5	46,9	46,1	
0:04:20	0:02:57	11,4	-0,3	-5	45,1	44,1	11,5	-1,4	-4,6	46,8	46,1	
0:05:20	0:03:57	16,2	2,6	-3,8	45	43,8	16,3	1,5	-3,4	46,7	45,8	
0:06:20	0:04:57	20,1	6,2	-2,9	45	43,6	20,2	5,1	-2,5	46,7	45,6	
0:07:20	0:05:57	23,1	8,9	-2,3	44,9	43,7	23,2	7,8	-1,9	46,6	45,7	
0:08:20	0:06:57	25,4	12,2	-1,8	44,9	43,7	25,5	11,1	-1,4	46,6	45,7	
0:09:20	0:07:57	27,4	15,3	-1,4	44,9	43,6	27,5	14,2	-1	46,6	45,6	
0:10:20	0:08:57	29,1	18,2	-1	44,8	43,7	29,2	17,1	-0,6	46,5	45,7	
0:11:20	0:09:57	30,7	20,7	-0,6	44,8	43,6	30,8	19,6	-0,2	46,5	45,6	
0:12:20	0:10:57	32,2	23,2	-0,3	44,8	43,6	32,3	22,1	0,1	46,5	45,6	
0:13:20	0:11:57	33,4	25,5	0,1	44,8	43,4	33,5	24,4	0,5	46,5	45,4	
0:14:20	0:12:57	34,6	27,8	0,6	44,7	43,4	34,7	26,7	1	46,4	45,4	
0:15:20	0:13:57	35,7	29,8	1,5	44,7	43,5	35,8	28,7	1,9	46,4	45,5	
0:16:20	0:14:57	36,8	31,7	3,1	44,7	43,5	36,9	30,6	3,5	46,4	45,5	
0:17:20	0:15:57	37,7	33,5	6,6	44,8	43,6	37,8	32,4	7	46,5	45,6	
0:18:20	0:16:57	38,5	35,1	14,1	44,8	43,4	38,6	34	14,5	46,5	45,4	
0:20:20	0:18:57	40	38,1	26,7	44,8	43,5	40,1	37	27,1	46,5	45,5	
0:24:20	0:22:57	42,3	42,4	36,5	44,8	43,7	42,4	41,3	36,9	46,5	45,7	
0:28:20	0:26:57	43,6	44,4	40,6	44,8	43,6	43,7	43,3	41	46,5	45,6	
0:34:20	0:32:57	44,4	45,7	43,2	44,8	43,5	44,5	44,6	43,6	46,5	45,5	
0:40:20	0:38:57	44,7	46,2	44	44,8	43,5	44,8	45,1	44,4	46,5	45,5	

Tabelle C.6: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 1,6\text{ l/min}$ .

Versuch 5: $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $u = 1,6\text{ l/min}$												
		Pt1000			Pt100			Pt1000			Pt100	
		Aufgezeichnete Werte						Korrigierte Werte				
Zeit [h:m:s]	Zeitverschiebung [h:m:s]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	
	relative Zeit [h:m:s]											
0:01:46	0:00:13	-8,3	-10,6	-14,9	23,4	24,0	-9,1	-10,2	-16,1	24,2	25,2	
0:02:30	0:00:57	-2,1	-4,2	-11,3	23,4	24,0	-2,9	-4,1	-12,5	24,2	25,2	
0:02:46	0:01:13	-1,4	-3,5	-9,9	23,4	24,0	-2,2	-3,5	-11,1	24,2	25,2	
0:03:46	0:02:13	1,6	-1,9	-6,7	23,4	24,0	0,8	-1,9	-7,9	24,2	25,2	
0:04:46	0:03:13	2,9	-0,9	-5,0	23,4	24,0	2,1	-1,0	-6,2	24,2	25,2	
0:05:46	0:04:13	4,0	0,2	-3,9	23,4	24,0	3,2	0,1	-5,1	24,2	25,2	
0:06:46	0:05:13	5,2	1,6	-3,2	23,4	24,0	4,4	1,4	-4,4	24,2	25,2	
0:07:46	0:06:13	6,6	2,9	-2,6	23,4	24,0	5,8	2,6	-3,8	24,2	25,2	
0:08:46	0:07:13	8,0	4,0	-2,2	23,4	24,0	7,2	3,7	-3,4	24,2	25,2	
0:09:46	0:08:13	9,2	5,3	-1,8	23,4	24,0	8,4	4,9	-3,0	24,2	25,2	
0:10:46	0:09:13	10,2	6,5	-1,5	23,4	24,0	9,4	6,1	-2,7	24,2	25,2	
0:11:46	0:10:13	11,2	7,7	-1,2	23,4	24,0	10,4	7,2	-2,4	24,2	25,2	
0:12:46	0:11:13	12,0	8,8	-1,0	23,4	24,0	11,2	8,3	-2,2	24,2	25,2	
0:13:46	0:12:13	12,7	9,7	-0,8	23,4	24,0	11,9	9,1	-2,0	24,2	25,2	
0:14:46	0:13:13	13,5	10,7	-0,6	23,4	24,0	12,7	10,1	-1,8	24,2	25,2	
0:15:46	0:14:13	14,1	11,6	-0,4	23,4	24,0	13,3	10,9	-1,6	24,2	25,2	
0:16:46	0:15:13	14,7	12,4	-0,2	23,4	24,0	13,9	11,7	-1,4	24,2	25,2	
0:17:13	0:15:40	15,0	12,8	-0,1	23,4	24,0	14,2	12,1	-1,3	24,2	25,2	
0:17:43	0:16:10	15,3	13,2	0,0	23,4	24,0	14,5	12,4	-1,2	24,2	25,2	
0:18:18	0:16:45	15,6	13,6	0,1	23,4	24,0	14,8	12,8	-1,1	24,2	25,2	
0:18:48	0:17:15	15,9	13,9	0,2	23,3	24,0	15,1	13,1	-1,0	24,1	25,2	
0:19:21	0:17:48	16,3	14,4	0,3	23,3	24,0	15,5	13,6	-0,9	24,1	25,2	
0:20:46	0:19:13	17,0	15,3	0,6	23,3	23,9	16,2	14,5	-0,6	24,1	25,1	
0:22:46	0:21:13	18,0	16,6	1,2	23,3	23,9	17,2	15,7	0,0	24,1	25,1	
0:24:46	0:23:13	18,9	17,7	2,3	23,3	23,9	18,1	16,7	1,1	24,1	25,1	
0:26:46	0:25:13	19,7	18,8	4,7	23,4	24,0	18,9	17,8	3,5	24,2	25,2	
0:28:46	0:27:13	20,4	19,8	9,2	23,3	23,9	19,6	18,7	8,0	24,1	25,1	
0:30:46	0:29:13	21,1	20,8	15,6	23,3	24,0	20,3	19,7	14,4	24,1	25,2	
0:33:46	0:32:13	22,0	22,1	19,4	23,3	23,9	21,2	20,9	18,2	24,1	25,1	
0:38:46	0:37:13	23,0	23,3	22,2	23,3	23,9	22,2	22,1	21,0	24,1	25,1	
0:40:46	0:39:13	23,2	23,6	22,8	23,3	23,9	22,4	22,4	21,6	24,1	25,1	
0:41:11	0:39:38	23,2	23,7	22,9	23,4	23,9	22,4	22,5	21,7	24,2	25,1	

Tabelle C.7: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang im Strömungskanal mit einer Fluidtemperatur von  $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Fluidgeschwindigkeit von  $u = 0,81/\text{min}$ .

Versuch 6: $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $u = 0,8\text{ l/min}$													
		Pt1000					Pt100		Pt1000			Pt100	
		Aufgezeichnete Werte					Korrigierte Werte						
Zeit [h:m:s]	Zeitverschiebung [h:m:s]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]	Pt1000 abgeströmte Seite [°C]	Pt1000 angeströmte Seite [°C]	Pt1000 Mitte [°C]	Pt100 Einlass [°C]	Pt100 Auslass [°C]		
	relative Zeit [h:m:s]												
0:01:33	0:00:08	-11,0	-10,7	-15,8	23,2	22,9	-11,4	-11,9	-16,2	24,0	24,1		
0:02:22	0:00:57	-4,4	-4,7	-11,3	23,1	22,8	-4,8	-5,9	-11,7	23,9	24,0		
0:03:33	0:02:08	-2,0	-2,2	-7,0	23,1	22,8	-2,4	-3,4	-7,4	23,9	24,0		
0:04:33	0:03:08	-0,9	-1,0	-5,2	23,1	22,8	-1,3	-2,2	-5,6	23,9	24,0		
0:05:33	0:04:08	0,3	0,4	-4,0	23,1	22,7	-0,1	-0,8	-4,4	23,9	23,9		
0:06:33	0:05:08	2,0	2,3	-3,3	23,1	22,8	1,6	1,1	-3,7	23,9	24,0		
0:07:33	0:06:08	3,4	3,2	-2,7	23,0	22,8	3,0	2,0	-3,1	23,8	24,0		
0:14:33	0:13:08	11,8	11,4	-0,6	23,0	22,8	11,4	10,2	-1,0	23,8	24,0		
0:15:33	0:14:08	12,6	12,2	-0,4	23,0	22,8	12,2	11,0	-0,8	23,8	24,0		
0:16:33	0:15:08	13,4	13,0	-0,3	23,0	22,8	13,0	11,8	-0,7	23,8	24,0		
0:17:33	0:16:08	14,2	13,8	-0,1	23,0	22,8	13,8	12,6	-0,5	23,8	24,0		
0:17:43	0:16:18	14,3	13,9	0,0	23,0	22,8	13,9	12,7	-0,4	23,8	24,0		
0:18:17	0:16:52	14,7	14,3	0,1	23,0	22,8	14,3	13,1	-0,3	23,8	24,0		
0:20:09	0:18:44	15,9	15,5	0,5	23,0	22,8	15,5	14,3	0,1	23,8	24,0		
0:23:57	0:22:32	18,0	17,7	2,0	23,1	22,8	17,6	16,5	1,6	23,9	24,0		
0:26:40	0:25:15	19,9	19,0	5,0	23,1	22,8	19,5	17,8	4,6	23,9	24,0		
0:28:52	0:27:27	20,3	20,0	10,0	23,1	22,8	19,9	18,8	9,6	23,9	24,0		
0:30:54	0:29:29	21,1	20,8	15,8	23,1	22,9	20,7	19,6	15,4	23,9	24,1		
0:34:39	0:33:14	22,4	22,0	20,0	23,1	22,9	22,0	20,8	19,6	23,9	24,1		
0:42:09	0:40:44	23,6	23,1	22,9	23,1	23,0	23,2	21,9	22,5	23,9	24,2		

Tabelle C.8: Temperaturabgleich der für das Aufwärmexperiment verwendeten Sensoren.

Aufzeichnung: Abgleich der Temperaturmessung der verwendeten Sensoren							
T Umlaufthermostat [°C]	hinten 1 [°C]	vorne 2 [°C]	mitte 3 [°C]	Pt100 2_T1 [°C]	2_T1 [°C]	3_T1 [°C]	3_T2 [°C]
10,0	10,9	10,7	12,2	11,1	11,1	10,5	10,3
20,0	20,9	21,0	21,8	21,1	21,8	20,6	20,4
30,0	30,8	31,5	31,1	30,9	30,8	30,4	30,2
40,7	41,4	42,6	41,4	41,6	41,3	40,9	40,7
50,0	50,8	52,6	50,4	50,4	50,6	50,2	50,1

Differenz der gemessenen Temperatur zur eingestellten Temperatur des Umlaufthermometers und ermittelter Korrekturwert beziehungsweise Korrekturfunktion.							
T Umlaufthermostat [°C]	Pt 1000 hinten [°C]	Pt 1000 vorne [°C]	Pt 1000 mitte [°C]	Pt100 2_T1 [°C]	Pt100 2_T2 [°C]	Pt100 3_T1 [°C]	Pt100 3_T2 [°C]
Sensorposition	1	2	3	4	5	6	7
10,0	0,9	0,7	2,2	1,1	1,1	0,5	0,3
20,0	0,9	1,0	1,8	1,1	1,8	0,6	0,4
30,0	0,8	1,5	1,1	0,9	0,8	0,4	0,2
40,7	0,7	1,9	0,7	0,9	0,6	0,2	0,0
50,0	0,8	2,6	0,4	0,4	0,6	0,2	0,1
Korrekturfkt.	0,82	$0,047x(T-273,15)+0,13$	1,24	0,88	$1,64-0,022x(T-273,15)$	0,38	0,2

Tabelle C.9: Messdaten der Sensoren beim Aufwärmvorgang eines außen isolierten, quaderförmigen Kartoffelstückes mit den Außenmaßen von 48 mm x 48 mm x 80 mm mittels eines Heizstabes mit der Leistung von 10,94 W.

		Gemessene Werte			Korrigierte Werte		
		Senorentfernung von der Mittelachse Heizstab			Senorentfernung von Heizstab Mittelachse		
Zeitverschiebung [h:m:s]		8 mm	16 mm	24 mm	8 mm	16 mm	24 mm
Zeit [h:m:s]	relative Zeit [h:m:s]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]
0:00:14	0:00:00	21,6	21,8	22,4	21,2	21,2	21,4
0:01:14	0:01:00	26,1	21,8	22,2	25,7	21,2	21,2
0:02:14	0:02:00	32,5	22,2	22,1	32,1	21,6	21,1
0:03:14	0:03:00	37,5	23,2	22,1	37,1	22,6	21,1
0:04:14	0:04:00	41,5	24,5	22,1	41,1	23,9	21,1
0:05:14	0:05:00	44,8	25,8	22,3	44,4	25,2	21,3
0:06:14	0:06:00	47,7	27,2	22,7	47,3	26,6	21,7
0:07:14	0:07:00	50,2	28,5	23,1	49,8	27,9	22,1
0:08:14	0:08:00	52,2	29,9	23,7	51,8	29,3	22,7
0:09:14	0:09:00	54,2	31,2	24,3	53,8	30,6	23,3
0:10:14	0:10:00	56,0	32,2	25,0	55,6	31,6	24,0
0:15:14	0:15:00	63,4	38,3	29,0	63,0	37,7	28,0
0:20:14	0:20:00	69,3	43,3	33,4	68,9	42,7	32,4
0:25:14	0:25:00	74,7	48,2	37,6	74,3	47,6	36,6
0:30:14	0:30:00	79,4	52,8	41,8	79,0	52,2	40,8
0:35:14	0:35:00	83,4	57,3	46,0	83,0	56,7	45,0
0:40:14	0:40:00	85,6	61,8	50,4	85,2	61,2	49,4
0:45:14	0:45:00	87,7	66,1	55,2	87,3	65,5	54,2
0:50:14	0:50:00	88,1	68,9	59,5	87,7	68,3	58,5
0:52:30	0:52:16	88,1	69,9	61,7	87,7	69,3	60,7
0:00:00	0:52:30	89,1	71,8	64,5	88,7	71,2	63,5
0:05:00	0:57:30	89,9	73,7	66,7	89,5	73,1	65,7
16:00:00	0:57:30	90,3	74,2	67,3	89,9	73,6	66,3
16:10:00	1:07:30	92,5	77,5	71,0	92,1	76,9	70,0
16:21:00	1:18:30	95,2	80,6	74,2	94,8	80,0	73,2
16:27:00	1:24:30	96,9	82,1	75,8	96,5	81,5	74,8

# Anhang D

## Files zur Berechnung des Aufwärmvorgangs im Strömungskanal

```
/*----- C++ -----*/
\ \ \ \ \ F i e l d       | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\ \ \ \ \ O p e r a t i o n | Version: plus
\ \ \ \ \ A n d             | Web: www.OpenFOAM.com
\ \ \ \ \ M a n i p u l a t i o n
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       T;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField   uniform 320.15;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 320.15;
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    wall
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 320.15;
    }

    atmosphere
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 320.15;
    }

    liquidF_to_solidF
    {
        type      compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr      T;
        kappaMethod fluidThermo;
        value     uniform 320.15;
    }
}

// ***** //
```

Abbildung D.1: Beispiel des T Files bei einer Fluidtemperatur von 47 °C (Pfad im Case: ./0/liquidF/T).







ANHANG D. FILES ZUR BERECHNUNG DES AUFWÄRM- VORGANGS IM  
STRÖMUNGSKANAL

Tabelle D.1: Daten der simulierten Aufwärmkurven für *Kartoffel süß*, *Kartoffel früh* und *Kartoffel spät*.

Nr 12. Kartoffel süß				Nr 14. Kartoffel früh				Nr 18 Kartoffel spät			
Zeitschritt OF [s]	Zeit [h:m:s]	T [K]	T [°C]	Zeitschritt OF [s]	Zeit [h:m:s]	T [K]	T [°C]	Zeitschritt OF [s]	Zeit [h:m:s]	T [K]	T [°C]
0	0:00:00	257,45	-15,70	0	0:00:00	257,45	-15,70	0	0:00:00	257,45	-15,70
40	0:00:40	262,02	-11,13	40	0:00:40	261,72	-11,44	40	0:00:40	261,60	-11,55
80	0:01:20	268,80	-4,35	80	0:01:20	268,60	-4,55	80	0:01:20	268,44	-4,71
120	0:02:00	271,26	-1,89	120	0:02:00	271,14	-2,01	120	0:02:00	271,10	-2,05
160	0:02:40	271,90	-1,25	160	0:02:40	271,86	-1,29	160	0:02:40	271,80	-1,35
200	0:03:20	272,00	-1,15	200	0:03:20	271,99	-1,16	200	0:03:20	271,99	-1,16
240	0:04:00	272,00	-1,15	360	0:06:00	272,09	-1,07	240	0:04:00	272,00	-1,15
280	0:04:40	272,01	-1,14	680	0:11:20	272,90	-0,25	400	0:06:40	272,18	-0,97
320	0:05:20	272,05	-1,10	720	0:12:00	273,24	0,09	680	0:11:20	272,94	-0,21
360	0:06:00	272,14	-1,01	760	0:12:40	274,26	1,11	720	0:12:00	273,90	0,75
400	0:06:40	272,26	-0,89	800	0:13:20	275,00	1,85	760	0:12:40	274,70	1,55
440	0:07:20	272,42	-0,73	840	0:14:00	274,84	1,69	800	0:13:20	275,60	2,45
480	0:08:00	272,60	-0,55	880	0:14:40	276,80	3,65	880	0:14:40	277,50	4,35
520	0:08:40	272,77	-0,38	920	0:15:20	277,80	4,65	920	0:15:20	278,70	5,55
560	0:09:20	272,88	-0,27	960	0:16:00	278,96	5,81	960	0:16:00	280,00	6,85
600	0:10:00	272,90	-0,25	1000	0:16:40	280,28	7,13	1000	0:16:40	281,58	8,43
640	0:10:40	273,83	0,68	1040	0:17:20	281,75	8,60	1040	0:17:20	283,30	10,15
680	0:11:20	274,70	1,55	1080	0:18:00	283,40	10,25	1080	0:18:00	285,20	12,05
720	0:12:00	275,61	2,46	1120	0:18:40	285,25	12,10	1120	0:18:40	287,30	14,15
760	0:12:40	276,63	3,48	1160	0:19:20	287,29	14,14	1160	0:19:20	289,60	16,45
800	0:13:20	277,80	4,65	1200	0:20:00	289,50	16,35	1200	0:20:00	292,00	18,85
840	0:14:00	279,12	5,97	1440	0:24:00	302,90	29,75	1440	0:24:00	305,30	32,15
880	0:14:40	280,63	7,48	1760	0:29:20	312,50	39,35	1760	0:29:20	313,65	40,50
920	0:15:20	282,34	9,19	1760	0:29:20	312,50	39,35	1800	0:30:00	314,00	40,85
960	0:16:00	284,27	11,12					1840	0:30:40	314,80	41,65
1000	0:16:40	286,43	13,28					1880	0:31:20	315,30	42,15
1040	0:17:20	288,79	15,64					1920	0:32:00	315,70	42,55
1080	0:18:00	291,32	18,17								
1120	0:18:40	293,92	20,77								
1160	0:19:20	296,50	23,35								
1200	0:20:00	298,96	25,81								
1240	0:20:40	301,31	28,16								
1280	0:21:20	303,31	30,16								
1320	0:22:00	305,15	32,00								
1360	0:22:40	306,78	33,63								
1400	0:23:20	308,22	35,07								
1440	0:24:00	309,49	36,34								
1480	0:24:40	310,60	37,45								
1520	0:25:20	311,58	38,43								
1560	0:26:00	312,40	39,25								
1600	0:26:40	313,21	40,06								
1640	0:27:20	313,90	40,75								
1680	0:28:00	314,50	41,35								
1720	0:28:40	315,00	41,85								
1760	0:29:20	315,50	42,35								

Tabelle D.2: Verschiebung des kältesten Punktes zum Mittelpunkt des Würfels, in der Simulation des Aufwärmvorganges, mit den Stoffdaten von *Kartoffel süß*.

Nr 12. Kartoffel süß			
Zeitschritt in OpenFOAM	Zeit	Position des kältesten Punktes, absolut von der angeströmten Fläche aus	Absolute Abeichung von der Mitte
[s]	[h:m:s]	[mm]	[mm]
0	00:00:00	18	0
40	00:00:40	18	0
80	00:01:20	18	0
120	00:02:00	18	0
160	00:02:40	18	0
200	00:03:20	18	0
240	00:04:00	18	0
280	00:04:40	18	0
320	00:05:20	18	0
360	00:06:00	18	0
400	00:06:40	18	0
440	00:07:20	18	0
480	00:08:00	18	0
520	00:08:40	18	0
560	00:09:20	18	0
600	00:10:00	18	0
640	00:10:40	18	0
680	00:11:20	18	0
720	00:12:00	18	0
760	00:12:40	18	0
800	00:13:20	18	0
840	00:14:00	18	0
880	00:14:40	18	0
920	00:15:20	18	0
960	00:16:00	18	0
1000	00:16:40	18	0
1040	00:17:20	18	0
1080	00:18:00	18	0
1120	00:18:40	18	0
1160	00:19:20	18	0
1200	00:20:00	18	0

# Anhang E

## Benötigte Stoffwerte für die Simulation

Für die Simulationen von anderen Kombinationen von Feststoffen in einer Flüssigkeit bei einem Pasteurisationsprozesses, werden folgende Stoffdaten der Flüssigkeit und des Feststoffes benötigt.

### Benötigte Stoffdaten der Flüssigkeit

Die benötigten Stoffwerte für die Flüssigkeit müssen im File *./constant/liquidF/thermophysicalProperties* geändert werden.

Tabelle E.1: Benötigte Stoffwerte für die Simulation mit \* für selbst gemessene, + für Daten aus der Literatur und - für Daten die von einem ähnlichen Stoff adaptiert wurden.

Stoffwert	Bemerkung
$\rho^{*-}$	Die Funktion der Dichte der Flüssigkeit über den gesamten Bereich der Arbeitstemperatur.
$c_p^+$	Die Funktion der Wärmekapazität der Flüssigkeit über den gesamten Bereich der Arbeitstemperatur.
muPowerLawExp *	Den Exponenten der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ , siehe Gleichung (3.1)

$\mu$  \* Die Funktion der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit über den gesamten Bereich der Arbeitstemperatur.

$\kappa$ -  
Coeff +- Die Funktion der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit über den gesamten Bereich der Arbeitstemperatur.

### Benötigte Stoffdaten des Feststoffes

Die benötigten Stoffwerte für den Feststoff werden, müssen im File *./constant/solidF/thermophysicalProperties* geändert werden.

Tabelle E.2: Benötigte Stoffwerte für die Simulation mit \* für selbst gemessene, + für Daten aus der Literatur und - für Daten die von einem ähnlichen Stoff adaptiert wurden.

Stoffwert	Bemerkung
$\text{breakTemp}_i$ ( $0 < i < 6$ ) *	Temperatur bei der sich die Funktion der Wärmekapazität $i$ , in jene von $i+1$ ändert.
$\kappa$ CoeffsOne<8> und $\kappa$ CoeffsTwo<8> +-	Die Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes von der niedrigsten Temperatur bis zur $\text{breakTempOne}$ und jene ab dieser bis zur maximalen Temperatur des Feststoffes.
$c_p$ +	Die Funktion der Wärmekapazität des Feststoffes über den gesamten Bereich der Arbeitstemperatur.
$h_f$ +	Schmelzenthalpie des Feststoffes. Diese muss auf einen Temperaturbereich von ca. $0,2^\circ\text{C}$ verteilt werden. In dieser Arbeit wurde diese auf $0,2^\circ\text{C}$ festgelegt, da hiermit bei allen Simulationen gute Ergebnisse bei der Berechnung des Haltebereiches erzielt wurden.

$\rho^+$

Dichte des Feststoffes. Dieser Wert kann nur als Konstante eingegeben werden und nicht als Funktion der Temperatur. Wenn die Funktion der Dichte wichtig ist, muss dies im Solver umprogrammiert werden, um ebenfalls eine Funktion eingeben zu können.

# Literaturverzeichnis

Aigner, D. (2011). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 36. TU Dresden, Institut für Wasserbau und THM. URL: <http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~daigner/pdf/ueberf.pdf> aufgerufen am 20.02.2018.

ASHRAE (2006). *ASHRAE Handbook, Refrigeration: SI Edition (International System of Units)*. ASHRAE Publications.

Bakker, A. (2006). Lecture 7 - meshing applied computational fluid dynamics. URL: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>, Aufgerufen am 30.01.2018.

Balduzzi, F., Bianchini, A., Ferrara, G., and Ferrar, L. (2016). Dimensionless numbers for the assessment of mesh and timestep requirements in cfd simulations of darrieus wind turbines. *ELSEVIER-Article*.

Benk, E., Czaja, A., Bötticher, W., Drews, H., Gutschmidt, J., Herrmann, K., Kovacs, A., Martens, F., Mohler, H., Nehring, P., et al. (2013). *Obst, Gemüse, Kartoffeln, Pilze: 2. Teil*. Handbuch der Lebensmittelchemie. Springer Berlin Heidelberg. Dichtebestimmung auf Seite 484.

Califano, A. N. and Calvelo, A. (1991). Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100 °C. *Journal of Food Science*, pages 586 – 587. Volume 56.

David, Jairus R.D.; Graves, R. H. S. T. (2013). *Handbook of Aseptic Processing and Packaging (SECOND EDITION)*. Taylor & Francis Group.

Dimou, A., Stoforos, N. G., and Yanniotisa, S. (2011). Cfd simulations in still cans filled with solid food items in liquid. *Greece ELSEVIER - Procedia Food Science 11th International Congress on Engineering and Food (ICEF11)*.

Gieck, K. and Gieck, R. (2005). *Technische Formelsammlung*. Gieck. ISBN: 9783920379258.

Greenshields, C. (2017). Openfoam v5 user guide: 4.2 basic input/output file format. CFD Direkt. URL: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/basic-file-format/> aufgerufen am 01.03.2018.

- Harasek, M., Jordan, C., and Haddadi, B. (2018). URL: [www.cfd.at/sites/default/files/tutorialsV4/OFTutorialSeries.pdf](http://www.cfd.at/sites/default/files/tutorialsV4/OFTutorialSeries.pdf) aufgerufen am 06.03.2018.
- Harsfalvi, Z. (2017). Code Implementierung der Berechnung der Schergeschwindigkeit. TU-Wien Forschungsbereich: Thermische Verfahrenstechnik & Simulation. URL: [https://www.vt.tuwien.ac.at/thermische\\_verfahrenstechnik\\_und\\_simulation/](https://www.vt.tuwien.ac.at/thermische_verfahrenstechnik_und_simulation/).
- Kraft, A.-L. (2012). Charakterisierung der Beanspruchungsmechanismen scherempfindlicher Stoffsysteme im Rührprozess. Master's thesis, Hochschule Neubrandenburg.
- Kuhlmann, H. (2007). *Strömungsmechanik*. Ing Maschinenbau. Pearson Studium. ISBN: 9783827372307.
- Kurzweil, P., Frenzel, B., and Gebhard, F. (2009). *Physik Formelsammlung: mit Erläuterungen und Beispielen aus der Praxis für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Naturwissenschaftliche Grundlagen. ISBN: 9783834808752.
- Kühn, S. (2018). Lagerungsbedingungen und Stoffeigenschaften von Kaltlagergütern. Website Log4Job. URL: <https://www.log4job.com/de/refrigeration-storage-info> aufgerufen am 06.03.1.
- Kümmel, W. (2007). *Technische Strömungsmechanik - Theorie und Praxis*. B.G. Teubner Verlag.
- Kızıldaş, S., Erdoğan, F., and Palazoğlu, T. K. (2010). Simulation of heat transfer for solid-liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97(4):449 – 456.
- Lareo, C., Fryer, P. J., and Barigou, M. (1997). The fluid mechanics of two-phase solid-liquid food flows: A review. Technical report, School of Chemical Engineering, University of Birmingham, UK (Instituto de Ingenieria Quimica, Facultad de Ingenieria, Uruguay).
- Laurien, E. and Oertel(jr.), H. (2013). *Numerische Strömungsmechanik - Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*. Springer Vieweg.
- Massholder, F. (2018). lebensmittellexikon. URL: <https://www.lebensmittellexikon.de> aufgerufen am 07.02.2018.
- Moore, B., Nabhani, F., and Askari, V. (2017). Sensitivity analysis of spray painting process to input parameters: Validation of cfd jet impingement model against an experimental dataset. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.

- proRheo (2009). Bedienungsanleitung R 180. Homepage der Firma proRheo. URL: <http://www.prorheo.de> aufgerufen am 15.11.2017.
- Rimbach, G., Möhring, J., and Erbersdobler, H. F. (2010). *Lebensmittel-Warenkunde für Einsteiger*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg.
- Sun, D.-W. (2007). *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. Taylor & Francis Group.
- Tomas, J. (2008). Partikeltechnologie Partikeltrennung im Fluid. OTTO-VON-GUERICHKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG; Institut für Verfahrenstechnik - Mechanische Verfahrenstechnik; URL: [http://www.mvt.ovgu.de/mvt\\_media/Vorlesungen/VO\\_MTP/Folien\\_MTP\\_2.pdf](http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_MTP/Folien_MTP_2.pdf) aufgerufen am 23.04.2018.
- Willinger, R. (2011). Numerische Methoden für thermische Energiesysteme. Skriptum, Institut für Energietechnik und Thermodynamik Forschungsbereich für Strömungsmaschinen, Technische Universität Wien.
- Wärmeatlas (1997). *Verein Deutscher Ingenieure (VDI-GVC) (Hrsg.): VDI - WÄRMEATLAS. Recherchieren - Berechnen - Konstruieren. - 8. Aufl. - Berlin, Heidelberg*. Springer Verlag.
- Wärmeatlas (2013). *Vdi-Wärmeatlas*. Springer Verlag. VDI - Verein deutscher Ingenieure.
- Yamada, T. (1970). The thermal properties of potato. *Nippon Nōgeikagaku Kaishi*, pages 587–590.
- Yanniotis, S. (2007). *Heat Transfer in Food Processing: Recent Developments and Applications*. WIT Press. Chapter 6 Aseptic processing of liquid/particulate foods was used.