

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

# Simulation des Wärmetransportes durch Gips

*Peter Florian Kitzmüller, BSc 01226026*

betreut von  
ao. Univ. Prof. Dr. Herbert STÖRI  
und  
Dipl.-Ing. Dr.techn. René Josef PRIELER BSc  
Institut für Wärmetechnik TU Graz



Herbert Störi

30. August 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Brandschutz und die Rolle feuerhemmender Bauteile . . . . .	1
1.1.1	Materialien Bauteile und Umgebungen . . . . .	2
1.2	Anforderungen an feuerhemmende Bauteile und Materialien . . . . .	3
1.2.1	Verbrennung von Materialien . . . . .	3
1.2.2	Feuergefahren von Materialien und die daraus resultierenden Anforderungen . . . . .	4
1.2.3	Feuerwiderstand-Behandlungen . . . . .	5
1.2.4	Gefahren durch Rauch . . . . .	5
1.3	Testverfahren für feuerhemmende Bauteile und Materialien . . . . .	6
1.3.1	Einteilung der Feuertests . . . . .	6
1.3.2	Feuerwiderstandsprüfung . . . . .	6
1.3.3	Feuer-Reaktionsprüfungen . . . . .	8
1.4	Gängige feuerhemmende Materialien . . . . .	9
1.4.1	Gruppe I . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit</b>	<b>11</b>
2.1	Motivation . . . . .	11
2.1.1	Projekt: Rechnen statt messen . . . . .	11
2.2	Gips als feuerhemmendes Material . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Gips</b>	<b>14</b>
3.1	Vorkommen und Produktion . . . . .	14
3.1.1	Naturgips und Naturanhydrit . . . . .	15
3.1.2	Gips aus technischen Prozessen . . . . .	15
3.2	Chemische und physikalische Eigenschaften . . . . .	15
3.2.1	Ermittlung der Stoffdaten . . . . .	17
3.3	Gips als Baustoff . . . . .	26
3.3.1	Vollgipsdielen . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Experimente und Ergebnisse</b>	<b>28</b>
4.1	Aufbau . . . . .	28
4.2	Gipsdielen für die Untersuchungen (Proben) . . . . .	32
4.3	Ergebnisse und Interpretation . . . . .	36
4.3.1	Versuchsablauf . . . . .	36
4.3.2	Messergebnisse und Interpretation . . . . .	37

<b>5</b>	<b>Computational Fluid Dynamics (CFD)</b>	<b>41</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	41
5.2	Erhaltungsprinzipien . . . . .	42
5.3	Erhaltungsgleichung für skalare Größen . . . . .	42
5.4	Komponenten einer numerischen Lösungsmethode . . . . .	43
5.4.1	Mathematisches Modell . . . . .	43
5.4.2	Diskretisierungsmethode . . . . .	43
5.4.3	Numerisches Gitter . . . . .	43
5.4.4	Finite Approximation . . . . .	43
5.4.5	Lösungsmethode . . . . .	43
5.4.6	Konvergenzkriterium . . . . .	43
5.5	Finite-Volumen-Methode . . . . .	44
5.5.1	Approximation von Flächenintegralen . . . . .	44
5.5.2	Approximation von Volumenintegralen . . . . .	45
5.5.3	Das algebraische Gleichungssystem . . . . .	45
5.5.4	Lösung linearer Gleichungssysteme . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Modellierung von Gips als poröse Struktur mit Berücksichtigung des Phasenwechsels des ausgasenden Wasserdampfes</b>	<b>48</b>
6.1	Allgemeine Erhaltungsgleichungen . . . . .	48
6.1.1	Massenerhaltung . . . . .	48
6.1.2	Impulserhaltung . . . . .	49
6.1.3	Energieerhaltung . . . . .	49
6.2	Mehrphasen-Probleme . . . . .	50
6.2.1	Der Euler-Euler Ansatz . . . . .	50
6.2.2	Euler Modell Theorie . . . . .	52
6.2.3	Verdampfungs- und Kondensationsmodell . . . . .	57
6.2.4	Lee Modell . . . . .	57
6.3	Poröse Medien . . . . .	59
6.3.1	Limitierungen und Annahmen . . . . .	59
6.3.2	Impulsgleichung für Poröse Medien . . . . .	60
6.3.3	Relative Viskosität in porösen Medien . . . . .	61
6.3.4	Energiegleichung in porösen Medien . . . . .	61
6.3.5	Modellierung von porösen Medien basierend auf der Physikalischen Geschwindigkeit . . . . .	62
6.3.6	Mehrphasenprobleme in porösen Medien . . . . .	63
6.4	Löser Theorie . . . . .	64
6.4.1	Überblick der Löser . . . . .	64
6.4.2	Druck-basierter Löser . . . . .	65
6.5	Parameter UDF . . . . .	66
6.5.1	Temperatur UDF . . . . .	66
6.5.2	Druck UDF . . . . .	67
6.5.3	Gips Stoffwerte UDF . . . . .	67
6.5.4	Quellterm UDF . . . . .	69
6.6	Das Modell und Netzgitter . . . . .	70
6.7	Lösereinstellungen . . . . .	72
6.7.1	Generelle Einstellungen . . . . .	72
6.7.2	Mehrphasen Einstellungen . . . . .	72
6.7.3	Materialeigenschaften . . . . .	73
6.7.4	Zonen Einstellungen . . . . .	75

6.7.5	Randbedingungen . . . . .	76
6.7.6	Löser . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Ergebnis der Simulation</b>	<b>81</b>
7.1	Temperatur . . . . .	81
7.2	Phasenwechsel . . . . .	82
7.3	Geschwindigkeiten . . . . .	84
7.4	Volumenströme . . . . .	86
<b>8</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>92</b>
	<b>References</b>	<b>94</b>

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Zusammenfassung

Das IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Gesellschaft m.b.H. führt seit längere Zeit Brandversuche durch, um die Beständigkeit von Bauteilen im Brandfall zu untersuchen. Dies geschieht durch eine normgerechte Prüfung mit genormten Randbedingungen. Bei diesen Versuchen werden die zu prüfenden Bauteile in einem Prüf-Ofen einer vorgegebenen Temperatur der sogenannten ETK (Einheitstemperaturkurve) ausgesetzt und auf deren Resistenz gegenüber einer thermischen Belastung geprüft. Jedoch sind diese Prüfungen sehr kostenaufwendig. Daher wurde das Forschungsprojekt "Rechnen statt messen" ins Leben gerufen. Hierbei handelt es sich um eine Forschungszusammenarbeit der IBS und der TU Graz. Das Institut für "Thermal Engineering" in Graz begann, diese Versuche mit Computational Fluid Dynamics (CFD) und Finite-Elemente-Methode (FEM) zu simulieren. Die Simulationen stimmten mit den realen Prüfungen überein, jedoch sind viele physikalische Phänomene, die bei der Befeuerung von Materialien auftreten, nicht zufriedenstellend zu berechnen. Ein spezieller Prozess, der für den Brandschutz von großer Bedeutung ist, ist der Wärmetransport durch Gips, da dies ein wichtiges Material zur Verbesserung des Feuerwiderstandes von Türen und vielen weiteren Produkten darstellt. Gips besteht zu einem großen Teil (ca. 20 Gewichtsprozent) aus kristallin gebundenem Wasser. Dieses Wasser löst sich bei der Erwärmung aus der Gipsstruktur und beeinflusst den Wärmetransport im Gips drastisch. Es kommt zu einer Diffusion von Wasserdampf sowie, durch den Überdruck im Ofen, zu einem Druckgradienten, welcher zum Transport des Dampfes in kühlere Gebiete der porösen Gipsstruktur führt. Hier kommt ein weiteres physikalisches Phänomen von Wasser ins Spiel; der Phasenwechsel von Dampf zu Wasser bei Temperaturen um 100 Grad Celsius. Durch diese Kondensation wird Energie frei, welche die Gipsstruktur lokal erhitzt. Dieser Prozess wurde von der IBS an einem Kleinversuchsprüfofen mittels eines Experimentes untersucht. Dabei wurden Thermoelemente in verschiedener Tiefe von Gipsdielen eingebaut und die Temperaturen während der Befeuerung mit der ETK aufgezeichnet.

Nun ist es von großer Bedeutung eben diesen Prozess in einer Simulation zu reproduzieren, jedoch mit Vereinfachungen, die den im Detail betrachteten höchst komplizierten Prozesses mit vernünftigem Aufwand berechenbar machen. Es ist auch notwendig den Prozess mit vorhandenen Mitteln zu beschreiben, welche die Möglichkeit bieten, die gewonnenen Erkenntnisse in späteren komplexen Brandsimulationen von Bauteilen einzubinden und dadurch Verbesserungen in der Simulation zu bekommen. Weiters können Ausgasungsprozesse direkt in die Brandsimulation eingebunden werden und somit ein gekoppeltes System berechnet werden. Hierfür eignet sich das Programm ANSYS. Das Fluent Tool des Programms bietet die Möglichkeit, mit im Programm implementierten Energie-/Impuls-/Massenerhaltungssätzen solche Simulationen durchzuführen. Zudem bietet es die Möglichkeit, mit Hilfe sogenannter User Defined Functions (UDF) mit gemessenen Stoffdaten von Gips aus unseren Experimenten zu implementieren. Beispiele hierfür sind die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität sowie der Masseverlust von Gips, welcher direkt als Quellterm für den Wasserdampf in der porösen Struktur verwendet werden kann. Der Phasenwechsel wird in diesem Code durch das Euler-/Euler-Mehrphasen-Modell berücksichtigt.

In dieser Arbeit wurde versucht, diesen Prozess näherungsweise zu modellieren. Hierfür wurden die Abweichungen von der detaillierten physikalischen Betrachtung ausgearbeitet und eingeschätzt. Danach wurden die berücksichtigten physikalischen Phänomene in der

Simulation mit empirisch gefundenen Parametern und den experimentell ermittelten Stoffdaten möglichst genau an das Experiment angepasst.

Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass der Wärmetransport durch Gips sehr gut mittels ANSYS Fluent modelliert werden kann. Im Gips kam es zu nahezu perfekter Übereinstimmung mit dem Experiment. Im Randbereich der Rechendomäne, beim Übergang vom Gips zur Umgebung und der Brennkammer, traten jedoch numerische Schwierigkeiten auf, die die Genauigkeit verringern. Hier besteht noch Verbesserungspotential. Auch könnte in den Randbereichen ein Strahlungsmodell angewandt werden, um die Strahlungsverluste mitzuberücksichtigen. Mit dieser Arbeit ist ein Grundstein für die Analyse des Wärmetransports in porösen Materialien, welche Wasser beinhalten, mit der Software ANSYS Fluent gelegt worden.

## Abstract

The IBS Institute for Fire Protection Technology and Safety Research Gesellschaft m.b.H. has been carrying out fire tests for a long time to examine the resistance of components in the event of fire. This is done by a standardized test with standardized boundary conditions. In these tests, the considered components are exposed in a test furnace to a specified temperature, the so-called ETK (standard temperature curve), and their resistance to thermal stress is examined. However, these tests are very costly. Therefore, the research project "Computing instead of measuring" was launched as a research collaboration between IBS and TU Graz. The institute for "Thermal Engineering" in Graz has started to simulate these experiments using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Finite Element Method (FEM). The simulations correspond very well with the real tests, but many physical phenomena that occur when materials are burned cannot be calculated satisfactorily. A special process that is of great importance for fire protection is the transport of heat through plaster, as this is an important material for improving the fire resistance of doors and many other products.

Gypsum consists to a large extent (approx. 20 percent by weight) of crystalline bound water. This water dissolves from the gypsum structure when it is heated and has a drastic effect on the heat transport in gypsum. There is a diffusion of steam and, due to the over-pressure in the furnace, a pressure gradient occurs which leads to the transport of the steam into cooler areas of the porous gypsum structure. This is where another physical phenomenon of water comes into play - the phase change from steam to water at temperatures around 100 °C. The condensation releases energy which heats the plaster structure locally. This process was investigated in an experiment by IBS in a small test furnace. Thermocouples were installed at different depths of the plasterboard and the temperatures were recorded during the firing with the ETK.

Now it is of great importance to reproduce this complex process in a simulation using simplifications making the process calculable with reasonable effort. It is also necessary to simulate the process with existing tools, so that it is possible to integrate the knowledge gained in this research thesis later in more complex fire simulations of components and thereby improving the simulation. Furthermore, outgasing processes can be integrated directly into the fire simulation and thus a coupled system can be simulated. The ANSYS program is suitable for this. The fluent tool of the program offers the possibility to carry out such simulations with existing energy / momentum / mass conservation laws implemented in the program. Furthermore, it offers the possibility to implement so-called User Defined Functions (UDF) with material data of gypsum obtained from further experiments. Examples of this are the temperature-dependent specific heat capacity and the loss of mass of gypsum, which can be used directly as a source term for the steam in the porous structure. The phase change is taken into account in this code by the Euler / Euler multiphase model.

In this thesis this process was approximated. For this purpose, the deviations from the detailed physical analysis were analyzed and assessed. The physical phenomena considered in the simulation were then fitted as precisely as possible to the experiment using empirically found parameters and the experimentally determined material data.

As a result it was shown that the heat transport through plaster can be modeled very well with ANSYS Fluent. In the plasterboards there was an almost perfect match with the experiment. However, numerical difficulties occur in the edge area of the computational domain at the transition from plaster to the environment and the plaster to the combustion

chamber. These difficulties reduce the accuracy of the simulation in this area. There is still room for improvements. For instance, a radiation model could be used in the edge areas taking the radiation losses into account. This thesis is groundwork for the analysis of the heat transmission in porous materials which contain water utilizing software ANSYS Fluent.



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Brandschutz und die Rolle feuerhemmender Bauteile

Das Buch "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" [1] ist ein Standardwerk im Bereich des Brandschutzes. Es behandelt die geschichtliche Entstehung des Brandschutzes und die grundlegenden Anforderungen und Richtlinien, die aktuell angewandt werden. Dieses Werk stellt die Grundlage der folgenden kurzen Einführung in das Themengebiet Brandschutz dar.

Im letzten Jahrhundert wuchs das Feld des Brandschutzes dramatisch. Ende des 19. Jahrhunderts waren noch keine Informationen über die Größe, den Trend oder das Muster von Feuerschäden vorhanden. Diese Informationen stehen nun aber zur Verfügung und es folgte ein sich ständig weiterentwickelnder Leitfadens zur Feuerprävention als eine Strategie zur Reduktion von Feuerschäden. Brandschutz definiert sich dadurch, neben einer Vielzahl an Möglichkeiten, das potentielle zeitliche Wachstum sowie die Schwere des Feuers zu verringern eine Reihe von Möglichkeiten gegen die Entstehung von Schadfeuer einzuschreiten.

- Erstens gibt es Möglichkeiten, das Feuer komplett zu verhindern, etwa durch Aufklärung über Feuergefahren oder durch Änderungen in Produkten zum Beispiel durch Isolierung der Wärmequellen oder Veränderung der Materialien.
- Zweitens besteht die Möglichkeit, das anfängliche Wachstum und die Ausbreitung des Feuers zu verlangsamen oder die Schwere des Feuers durch das Design, die Auswahl und die Handhabung der Materialien und Produkte zu reduzieren.
- Drittens gibt es Möglichkeiten, das Feuer frühzeitig zu entdecken, was es ermöglicht, effektiv einzugreifen, um den Schaden zu verhindern.
- Viertens gibt es Möglichkeiten, der automatischen und manuellen Unterdrückung.
- Fünftens existieren darüber hinaus Möglichkeiten, das Feuer räumlich durch Abgrenzungen und andere passive Brandschutzmethoden zu beschränken .
- Sechstens bestehen Alternativen, die Insassen an sichere Orte zu schaffen, um den Vorteil der vorherigen Schritte zu nutzen und Personen von Gefahrenzonen in sichere Zonen zu bringen oder sie dort zu schützen, wo sie sind.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der zweiten Möglichkeit. Der Aspekt von Brandschutz durch Auswahl von geeigneten Materialien und Optimierung von Bauteilen durch die

Kombination bestimmter Materialien. Daher wird im Folgenden diese Möglichkeit genauer betrachtet und die anderen Punkte wurden hier zur Schaffung eines Überblicks erwähnt [1].

### 1.1.1 Materialien Bauteile und Umgebungen

Wenn die Brandprävention fehlgeschlagen ist besteht die Möglichkeit, durch das Design von Materialien und Bauteilen und der Umgebungen den Feuerschaden zu reduzieren, so dass die Ausbreitung und das Wachstum des Feuers verlangsamt werden. Laut Studien (Basierend auf Erhebungsdaten des NFIRS: National Fire Incident Reporting System und der NFPA: National Environmental Policy Act) wächst das Feuer bei Gebäudebränden meistens nicht über den ersten Raum hinaus, in dem es entstand. Die meisten Todesopfer sowie Sachschäden treten jedoch bei den 29 Prozent der Brände auf, welche sich auf mehrere Räume ausbreiten. Daraus ist klar zu schließen, dass Feuer, welches im Wachstum so verlangsamt werden kann, dass es den Raum, in dem es entdeckt wurde, nicht verlässt, wahrscheinlich zu einem weit geringeren Schaden an Personen und Gegenständen führt. Die folgenden Brandschutzansätze können getroffen werden, um diese allgemeine Feuer-schutzstrategie zu verfolgen:

1. Einschränken der Materialien von Bauteilen und Einrichtungen.
  - Reduzierte Wärmefreisetzungsrate.
  - Reduzierte Rauchfreisetzungsrate.
  - Verhindern der Freisetzung von unüblich hohen toxischen Bestandteilen im freigesetzten Rauchgas.
2. Hinzufügen von Brandverzögerern zu Materialien verlangsamt das Wachstum der Wärmefreisetzungsrate
3. Verwendung von feuerresistenten Barrieren verlangsamt die Ausbreitung des Feuers zu großen sekundären Gegenständen.
4. Beschränkung der totalen Brennstofflast.
  - Beschränkung der Bestandteile basierend auf der Brennstofflast.
5. Beschränkung der Auskleidung von Räumen zur Vermeidung von rascher Flammenausbreitung.
  - Beschränkung von Wandverkleidungen.
  - Beschränkung von Deckenverkleidungen.
  - Beschränkung von Bodenbelägen.
6. Beschränkung von Materialien in verdeckten Gebieten.
  - Begrenzen von verborgenen brennbaren Stoffen.
  - Begrenzen von verborgenen Raumauskleidungen.
7. Forderung zur sicheren Handhabung von großen Mengen von potentiellen Brennstoffen.

Unüblich gefährliche Umgebungen, wie zum Beispiel sauerstoff-angereicherte Atmosphären, erhalten auch eine spezielle Aufmerksamkeit [1].

## 1.2 Anforderungen an feuerhemmende Bauteile und Materialien

Es wird zwischen Materialien und Bauteilen unterschieden. Bei Bauteilen handelt es sich um Baugruppen von Materialien. Die Abgrenzung erweist sich oft als unklar, da in vielen Fällen Materialien selbst Bauteile darstellen. Die Unterscheidung ist jedoch wichtig, da das Brandverhalten von Bauteilen oft ganz anders ist als das Verhalten der Materialien, aus denen sie zusammengestellt sind. Eine weitere nützliche Unterscheidung ist zwischen Materialien, welche einen aktiven Beitrag zur Feuergefahr leisten und jenen, die passiv, also feuerhemmend, wirken [1].

### 1.2.1 Verbrennung von Materialien

Verbrennung ist die chemische Reaktion von einem Material mit dem atmosphärischen Sauerstoff bei der Energie in Form von Wärme und Licht frei wird. Die Produkte, die aus einer Verbrennung entstehen, sind Oxide, welche Sauerstoff als Teil ihrer chemischen Bindung beinhalten. Wenn ein Material nur aus Oxiden besteht, ist es nicht brennbar. Eine Beschreibung der Feuergefahr ist die maximale Energiemenge in Wärme pro Gewichtseinheit, welche bei der Verbrennung eines Materials entsteht. Die freigesetzte Verbrennungswärme ist auch ein Maß für den Wert des Materials als Brennstoff. Die Wärme der Verbrennung wird fast ausschließlich durch die chemische Zusammensetzung des Materials bestimmt. Die Geschwindigkeit der Verbrennung wird jedoch von der physikalischen Form bestimmt. Zum Beispiel brennt Holzwolle schneller als ein fester Block aus Holz, obwohl dieselbe Menge Wärme, bezogen auf das Gewicht, von beiden produziert wird [1].

#### Brenngeschwindigkeit

Das Material, welches den Brennstoff bildet, kann gasförmig, flüssig oder fest sein, aber der Sauerstoff in der Luft ist gasförmig. Dass die notwendige chemische Reaktion stattfinden kann, muss der Brennstoff und der Sauerstoff auf molekularer Ebene in Kontakt kommen. Dies bedeutet wiederum, dass Brennen im Allgemeinen ein Gasphasenphänomen darstellt. Die Brenngeschwindigkeit ist abhängig von der Geschwindigkeit der chemischen Reaktion. In vorgemischten Flammen, solche die vor dem Entzünden schon vermischt wurden, ist die Brenngeschwindigkeit die materialabhängige Rate wie schnell sich die Substanzen kombinieren. Dieser Vorgang vollzieht sich im Allgemeinen sehr schnell; Die Flammenausbreitung unter vorgemischten Verbrennungsbedingungen erfolgt in mehr als einen Meter pro Sekunde.

Flüssigkeiten und Feststoffe brennen für gewöhnlich in diffusiven Flammen, wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist. Diffusive Flammen unterscheiden sich von vorgemischten Flammen dadurch, dass der gasförmige Brennstoff und die Luft sich durch Diffusion vermischen, wenn die Verbrennung eintritt, beziehungsweise davor. Daher ist die Verbrennungsrate durch die Rate bestimmt, bei der der knappste Bestandteil der Verbrennung, der entweder gasförmiger Brennstoff oder Sauerstoff ist, in die Verbrennungszone eintritt.

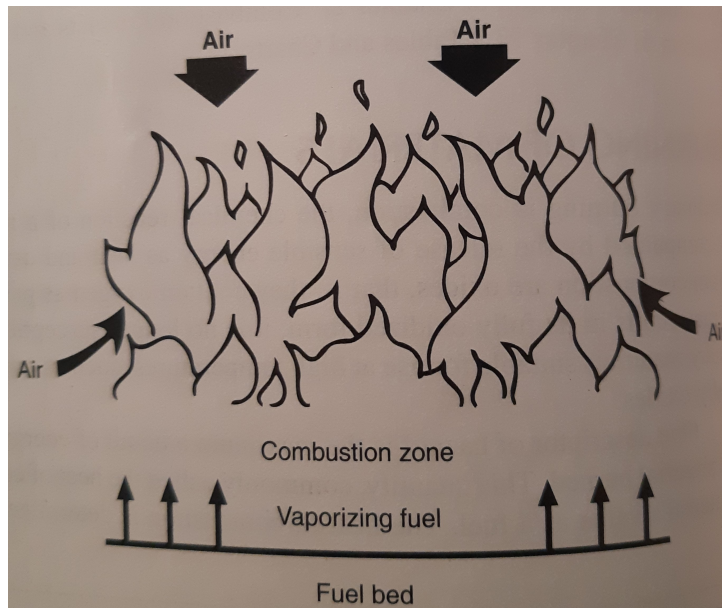


Abbildung 1.1: Schema einer brennenden Oberfläche [1]

Es wird Energie benötigt, um den Brennstoff von seiner ursprünglichen flüssigen oder festen Form in die Gasphase zu bringen. Dies hat einen wichtigen Einfluss auf die Intensität des Feuers. Die Rate der Wärmefreigabe eines Materials ist proportional zum Verhältnis seiner Verbrennungswärme zur Verdampfungswärme, dieser Parameter wird die Brennbarkeit genannt [1].

## 1.2.2 Feuergefahren von Materialien und die daraus resultierenden Anforderungen

Die erheblich unterschiedlichen Brandcharakteristiken von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen stellen verschiedene Feuergefahren dar. Bei der Feuergefahrenkontrolle erweist sich als zweckmäßig, als erstes die Wahrscheinlichkeit der Entzündung zu betrachten. Danach wird die Kontrolle der Brandausbreitung von Bedeutung und zum Schluss wird die Auswirkung des Feuers in den Fokus gerückt, wenn die ersten zwei Kriterien nicht verhindert werden können.

### Feuergefahren von Gasen und Staub

Brennbare Gase und Stäube brennen sehr schnell, wenn sie entzündet wurden, daher ist es von großer Bedeutung, die Entzündung zu verhindern. Die Verhinderung erfolgt in zwei Stufen: Erstens durch die Bestimmung der Entflammbarkeitsgrenzen. Das ist der Konzentrationsbereich, von einem bestimmten Gas oder Staub, in dem die Entzündung stattfindet. Und zweitens durch den Betrieb in der Weise, dass die Konzentration außerhalb von diesem Bereich liegt. Es ist auch möglich, die Wahrscheinlichkeit der Entzündung zu verringern, indem man chemische Inhaltsstoffe beimengt, die den unteren Entflammungspunkt erhöhen oder die Gase und Stäube in geschlossenen Umgebungen zu lagern und dort den Sauerstoffgehalt zu reduzieren und damit die Entflammbarkeitsgrenzen zu erhöhen.

### Feuergefahren von Flüssigkeiten

Da die Verbrennung in der Gasphase stattfindet, sind die gefährlichsten brennbaren Flüssigkeiten jene, die einen hohen Dampfdruck besitzen. Ein empirisches Maß, welches

die Flüchtigkeit mit der Wärmeerzeugungsfähigkeit des Dampfes verbindet, ist der Flammpunkt. Der Flammpunkt ist die Temperatur, bei der eine Flüssigkeit Dampf abgibt, welche unter spezifischen Laborbedingungen entzündbar ist. Die Flammpunktbestimmung gibt die Möglichkeit zu einer Gefahrenklassifizierung - die gefährlichsten Flüssigkeiten sind jene mit dem geringsten Flammpunkt. Wie im Fall von Gasen ist die prinzipielle Vorgehensweise bei der Kontrolle der Entzündung von brennbaren Flüssigkeiten der sichere Umgang damit und die Einführung von Sicherheitsvorkehrungen. Ausgearbeitete Verfahren existieren, um den Austritt von entflammbaren Dämpfen bei der Handhabung von flüchtigen Flüssigkeiten zu minimieren und damit Quellen für eine Entzündung zu reduzieren.

## Feuergefahren von Feststoffen

Wenn Feststoffe als Staub, Schaum oder in anderen Formen vorkommen, die eine große Oberfläche besitzen, dann sind die Feuergefahren gleich wie jene von Flüssigkeiten. Ist dies nicht der Fall, so zählen sie in Bezug auf die Feuergefahren zu den Feststoffen. Feststoffe werden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Elastische Materialien, wie Textilien und Pölster und strukturelle Materialien, hierunter fallen Stoffe von Stahl und Beton bis Holz und synthetischen Plastikschaum. Für beide dieser Klassen gibt es eine Vielfalt von Tests, um die Anfälligkeit für die Entzündung zu bestimmen. Da die Entzündung die Verdampfung eines Teils des Feststoffes erfordert, ist das Entzündungsverhalten stark von der Wärmemenge, die auf die Oberfläche angewandt wird, abhängig. Daher bringen verschiedene Entzündungstests, abhängig von der Größe der Entzündungsquelle, oft unterschiedliche Ergebnisse. Das gleiche Prinzip gilt für Tests, die angewendet werden, um die Flammenausbreitung über kleine Probekörper zu ermitteln. In vielen dieser Tests erfährt der Probekörper keine Strahlungswärme außer jener, die durch die eigene Verbrennung entsteht. Je größer die brennende Menge des Probekörpers ist, desto größer ist der Wärmetransport zu den nicht-brennenden Gebieten und ein großer Probekörper wird scheinbar eine größere Flammenausbreitungsrate haben als ein kleinerer. Die Feuergefahren durch nichtorganische Strukturmaterialien sind meistens passiv. Zum Beispiel kann Stahl bei der Aussetzung von hohen Temperaturen seine Festigkeit verlieren, Beton kann Risse bilden und abplatzen und Glas kann brechen oder schmelzen. Solche Materialien werden daher an deren Vermögen bemessen, negativen Effekten, die durch hohen Temperaturen ausgelöst werden, zu widerstehen [1].

### 1.2.3 Feuerwiderstand-Behandlungen

Verbesserungen im Zündverhalten der Materialien sind durch eine Entwicklung in der Feuerwiderstands-Behandlungen von natürlichen sowie synthetischen Materialien zustande gekommen. Eine Behandlung ist das Einfügen von Flammhemmern, welche meistens aus großen Mengen von Chlor, Bor oder Phosphor bestehen. Bei natürlichen Materialien, wie Holz oder Baumwolle, wird dies meist durch eine Druckbehandlung erreicht. Bei synthetischen Materialien werden die Zusatzstoffe häufig während des Polymerisationsprozesses hinzugefügt. Ein anderer Ansatz besteht darin, das Material mit Energie absorbierenden Füllstoffen zu versehen, wie zum Beispiel Kalzium-Karbonat oder Aluminium-Trihydrate. Die dritte Möglichkeit besteht in der Herstellung von Materialien mit einer sehr hohen Verdampfungswärme [1].

### 1.2.4 Gefahren durch Rauch

Rauch stellt in den meisten Fällen die primäre Lebensbedrohung dar. Daher kommt ihm eine große Aufmerksamkeit im Brandschutz zuteil. Historisch wurde Rauch über seine Fähigkeit,

Licht zu verdunkeln, definiert. Durch die Verwendung von synthetischen Materialien in Bauteilen und Gebäuden vergrößerte sich das Interesse an der Zusammensetzung von Verbrennungsprodukten immer mehr.

Drei Haupteffekte können definiert werden: Lichtabdunkelung, Toxizität und die Auswirkungen nach dem Brand. Die ersten zwei Eigenschaften sind eng miteinander verknüpft: Rauch reduziert die Sichtweite, dadurch wird die Flucht verlangsamt und zusätzlich schädigt er durch seine für den Menschen toxischen Eigenschaften. Der dritte Effekt ist die Ablagerung des Rauches auf Gegenständen und in Wänden[1].

## 1.3 Testverfahren für feuerhemmende Bauteile und Materialien

### 1.3.1 Einteilung der Feuertests

Brandprüfungen sind entwickelt worden, um fast jede Feuereigenschaft zu untersuchen. Üblicherweise sind die Prüfungen in zwei Typen, bezogen auf die Brandeigenschaften, zu unterteilen: Feuerresistenz und die Reaktionen auf das Feuer.

Feuerwiderstandsprüfungen sind vor allem zur Untersuchung von Bauteilkonstruktionen und Feuerbarrieren (Wände, Böden, Säulen etc.) sowie von Bauteilen wie Türen und Fenster, welche Öffnungen verschließen. Daher sind Feuerwiderstandsprüfungen so konzipiert, dass die zu prüfenden Bauteile für eine möglichst lange Zeit verhindern, dass Feuer vom Feuerursprungsort durch diese Bauteile in benachbarte Abteile vordringt.

Feuer-Reaktionsprüfungen dienen zur Messung von den Materialeigenschaften oder zur Überprüfung von Produkten, die möglicherweise Schäden verursachen. Materialien, die diesen Tests unterzogen werden, sind entwickelt worden um die Freisetzung von Wärme, Rauch und anderen Verbrennungsprodukten zu minimieren oder zu eliminieren oder die Ausbreitung von Flammen zu minimieren beziehungsweise zu verhindern [1].

### 1.3.2 Feuerwiderstandsprüfung

Feuerwiderstandsprüfungen basieren auf dem Konzept, dass bei Gebäuden, welche Schutz- und Abtrennungsrichtlinien von Brandschutzbestimmungen erfüllen müssen, die verschiedenen Konstruktionselemente einer bestimmten Feuerwiderstandsleistung standhalten müssen. Der Feuerwiderstand von Bauelementen unter Brandbedingungen ist eine wichtige Frage, um sicherzustellen, dass Gebäude möglichst sicher gebaut werden können. Die Richtlinien für die Anforderungen an Gebäude sind auf Basis von Einschätzungen der möglichen Brandexposition, abhängig von der Verwendung der Gebäude. Der Inhalt ist zum Beispiel die Fluchtmöglichkeit und andere Faktoren [1].

#### Einheitstemperaturkurve

Bei den meisten Feuerwiderstandsprüfungen ist das zu erfüllende Kriterium die Zeit, bezeichnet als die Feuerwiderstandsklasse, während der die Konstruktion der Standard Feuerexposition widersteht, bevor das erste kritische Ende der Prüfung beobachtet wird. In den Prüfungen werden die Bauelemente einem Feuer ausgesetzt, welches mit der Zeit an Stärke zunimmt, der Temperaturverlauf ist über die Einheitstemperaturkurve (ETK) bestimmt. Feuerwiderstandsklassen werden immer für die gesamte Baugruppe, welche getestet wird, vergeben und nicht für die individuellen Bestandteile [1]. Die Kriterien, die das Ende der Prüfung bestimmen sowie die genaue Form der Einheitstemperaturkurve

ist in den jeweiligen Prüfnormen festgehalten. In Europa wird vorwiegend die EN 1363-1 verwendet, welche noch detaillierter beschrieben wird.

### Feuerwiderstandsprüfung nach EN 1363-1

Ziel der Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer ist es, das Verhalten eines Probekörpers von einem Bauteil, das einer definierten Wärmebeanspruchung und definierten Druckbedingungen ausgesetzt ist, zu beurteilen. Das Verfahren ermöglicht eine Quantifizierung der Fähigkeit eines Bauteils hohen Temperaturen zu widerstehen, indem Kriterien aufgestellt werden, mit deren Hilfe unter anderem die Tragfähigkeit, der Raumabschluss und der Wärmedurchgangskoeffizient (die Wärmedämmung) beurteilt werden können.

Eine repräsentative Probe eines Bauteils wird einer festgelegten Brandbeanspruchung ausgesetzt und die Leistungsfähigkeit des Probekörpers wird anhand der in der Norm EN 1363-1 beschriebenen Kriterien überwacht. Die Feuerwiderstandsdauer des Probekörpers wird als die Zeit angegeben, innerhalb der das entsprechende Kriterium erfüllt wurde. Die auf diese Weise erzielten Zeiten sind ein Maß für die Brauchbarkeit der Konstruktion im Brandfall; sie haben jedoch keinen direkten Bezug zur Dauer eines natürlichen Brandes. Zur Durchführung der Prüfung wird ein speziell entwickelter Prüfofen zur Beanspruchung des Probekörpers, entsprechend den Prüfbedingungen, verwendet. Ein Prüfofen ist mit einer Steuerungseinrichtung, die die Regelung der Ofentemperatur nach der Gleichung (4.1) ermöglicht, ausgestattet sowie mit einer Einrichtung zur Regelung und Überwachung des Drucks der heißen Gase innerhalb des Prüfofens. Der Prüfofen muss so konstruiert sein, dass er mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben werden kann [2].

Das Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH (IBS) hat am Standort Linz mehrere Prüfofen. In Abbildung 1.2 ist ein mit Öl befeuerter Ofen dargestellt und in Abbildung 1.3 ein Ofen mit Gas als Brennstoff.



Abbildung 1.2: Ölbefeuerter Vertikalprüfofen nach EN 1363 mit einer beflamnten Fläche von max. 4050 x 3100 mm (BxH)

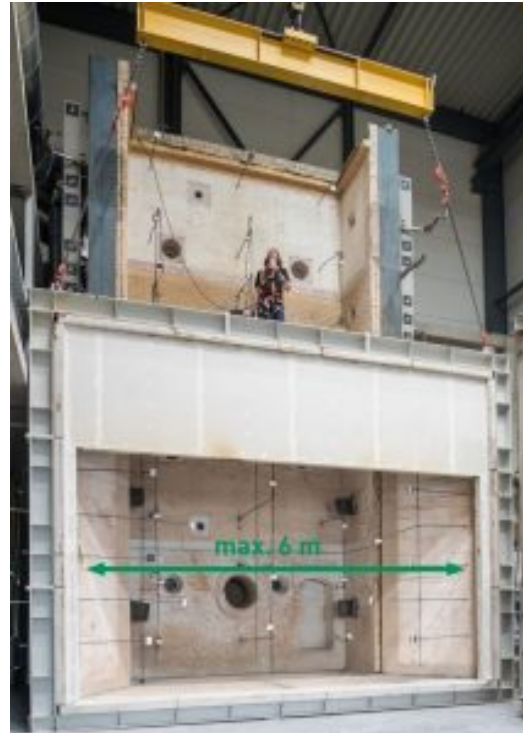
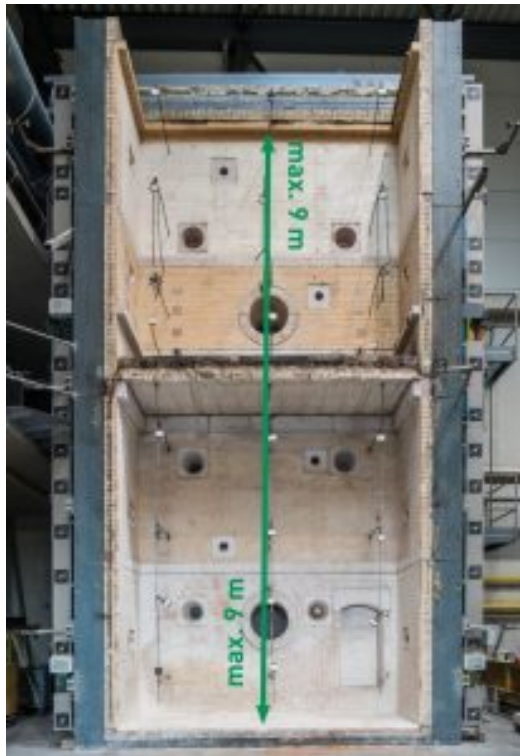


Abbildung 1.3: Gasbefeuerter Vertikalprüfofen nach EN 1363 mit einer beflamten Fläche bis max. 4000 x 9080 mm und 6000 x 4570 mm (BxH)

### 1.3.3 Feuer-Reaktionsprüfungen

Feuer-Reaktionsprüfungen dienen zur Bestimmung der Brandeigenschaften von Materialien. Die typischen Eigenschaften, die begutachtet werden, sind Zündfähigkeit, Löschbarkeit, Flammenausbreitung, Rauchfreisetzung, Wärmefreisetzung und die Freisetzung von giftigen Gasen [1].

#### Zündfähigkeit

Wenn sich ein Material nicht entzündet, entsteht auch kein Feuer. Daher erweist sich eine niedrige Zündfähigkeit auch als die erste Maßnahme zur Bekämpfung von Feuer. Alle brennbaren Materialien entzünden sich, aber je höher die Temperatur, die ein Material erreichen muss bevor es sich entzündet, desto sicherer ist es. Bei Messung der Entzündbarkeit gibt es drei zu bestimmende Eigenschaften:

1. Minimale Temperatur für die Entzündung (in Abwesenheit oder Anwesenheit einer Zündquelle)
2. Zeit bis zur Entzündung bei bestimmten thermischen Bedingungen (typisch ist ein Wärmestrom oder eine Flamme mit bestimmter Größe)
3. Minimaler (oder Kritischer) Wärmestrom, welcher für die Entzündung notwendig ist (da die Temperatur mit dem Wärmefluss über die Stefan-Boltzmann Konstante und der Schwarzkörper-Strahlung in Verbindung gebracht werden kann)

[1].



## Löschbarkeit

Die Löschbarkeit ist eine Feuereigenschaft, die interessant ist, nachdem sich ein Material entzündet hat. Je einfacher ein Material zu löschen ist, desto geringer ist die Feuergefahr von Produkten, welche aus diesem Material gefertigt sind [1].

## Flammenausbreitung

Ein kritischer Aspekt des Brandverhaltens ist die Einschätzung der Neigung eines Materials, eine Flamme von der Feuerquelle auszubreiten und fortzupflanzen. Es war davon auszugehen, dass dieses Wissen eine Schlüsselkomponente zum Verständnis potentieller Feuergefahr darstellt. Flammenausbreitungstests beziehen sich auf Materialien, Bauteile bis hin zu Produkten und Gebäuden [1].

## Rauchfreisetzung

Bei einem Feuer verursacht Rauch eine Beeinträchtigung der Sichtweite, was dazu führt, dass dem Brand ausgesetzte Personen es schwerer haben, zu entkommen oder gerettet zu werden. Daher sind viele Regulierungen notwendig, damit Materialien und Produkte eine geringere Menge an Rauch freisetzen [1].

## Wärmefreisetzung

Die Wärmefreisetzung gilt als wichtigste Eigenschaft bei einem Feuer. Der Peak der Wärmefreisetzungsrates gibt die Antwort auf die Schlüsselfrage im Brandschutz: Wie groß ist das Feuer? Wenn ein Produkt brennt, wird das Feuer nur auf naheliegende Gegenstände übergreifen, wenn es genug Hitze freigibt, um diese zu entzünden. Außerdem muss die Wärmefreisetzung schnell genug stattfinden, so dass die Wärme nicht verloren geht während sie durch die kalte Luft, welche die Produkte umgibt, die nicht brennen, transportiert wird. Daher dominiert die Rate der Wärmefreisetzung die Feuergefahr. Es gilt als Fakt, dass die Wärmefreisetzung bei der Kontrolle der verfügbaren Zeit für die Opfer von Brandszenarien viel wichtiger ist als andere Eigenschaften von Materialien [1].

## Freisetzung von giftigen Gasen

Das bereits für die Rauchfreisetzung (wie die Verdunkelung) Erwähnte ist auch gültig für die Freisetzung aller anderen Verbrennungsprodukte. Es wurde gezeigt, dass giftige Gase nicht den signifikantesten Aspekt der Feuergefahren darstellen. Aus Studien geht hervor, dass die meisten Feueropfer sterben, wenn sich das Feuer über seinen Ursprungsraum ausbreitet und die Feuertodesfälle können mit der Menge von Kohlenmonoxid, die freigesetzt wurde, in Verbindung gebracht werden. Dies erweist sich als eine wichtige Erkenntnis, da Kohlenmonoxid bei jedem Brennstoff entsteht. Daher ist die Brandgefahr von Bränden, bei denen Materialien mit besseren brandhemmenden Eigenschaften verbrannt werden, geringer, sogar wenn diese mehr giftige Gase pro verbrannte Masse freisetzen [1].

## 1.4 Gängige feuerhemmende Materialien

Es existieren brennbare und nicht brennbare Baumaterialien. Aus dem Blickwinkel des Verhaltens der Baumaterialien bei einem Brand können diese in die folgenden Gruppen unterteilt werden:

1. Gruppe L: Materialien, die hohe Belastungen aufnehmen können.

2. Gruppe L/I: Materialien, die moderate Belastungen aufnehmen können und zusätzlich thermischen Schutz für Materialien der Gruppe L bieten.
3. Gruppe I: Materialien, die nicht zum Tragen von Lasten geeignet sind, jedoch die Wärmeübertragung von Bauelementen verhindern oder minimieren. Sie bieten thermische Isolation für Materialien der Gruppe L und L/I. Bei dieser Gruppe sind nur die thermischen Eigenschaften von Bedeutung.
4. Gruppe L/I/F: Materialien der Gruppe L/I, die zu Brennstoff werden können, wenn sie einem Feuer ausgesetzt sind.
5. Gruppe I/F: Materialien der Gruppe I, die zu Brennstoff werden können, wenn sie einem Feuer ausgesetzt sind.

Die Zahl der Baumaterialien erhöhte sich in den letzten Jahrzehnten dramatisch. Hier wird kurz die Gruppe der Materialien und Baustoffe vorgestellt, der im Brandschutz die größte Bedeutung zukommt [3].

### 1.4.1 Gruppe I

#### Isolationsmaterialien

Isolationsmaterialien werden oft als Brandschutzmaterial für schwere Strukturmaterialien, wie Säulen und Balken sowie für leichte Auskleidungsmaterialien wie Böden und Wände, verwendet. Die Isolation hilft, die Temperaturanstiege an Strukturmaterialien zu verzögern und dadurch deren Feuerresistenz zu erhöhen. Es gibt viele Isolationsmaterialien auf dem Markt. Mineralwolle und Fiberglas sind die am meisten verwendeten Isolationsmaterialien in Wänden und Böden. Andere Beispiele für Isolationsmaterialien, welche im Brandschutz verwendet werden, sind Dämmplatten, Mineralfaser Sprays, Komprimierte Glasfaserplatten und intumeszierende Anstriche [3].

#### Gips

Gipsprodukte, wie Putz und Gipskartonplatten, sind exzellente Brandschutzmaterialien. Gips weist einen hohen Anteil an chemisch gebundenen Wasser auf. Die Verdampfung dieses Kristallwassers benötigt sehr große Wärmemengen. Das macht Gips zu einem günstigen feuerhemmenden Baumaterial [4].

# Kapitel 2

## Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

### 2.1 Motivation

In der Einleitung wurde klargestellt, welche Bedeutung der Brandschutz bei der Bekämpfung von Feuer hat. Einen der wichtigsten Aspekte des Brandschutzes stellt die sogenannte Feuerwiderstandsprüfung dar, die gewährleisten soll, dass bestimmte Bauelemente im Brandfall ihren Zweck erfüllen und nicht frühzeitig versagen, wodurch hoher Personen- und Sachschaden entstehen kann. Diese genormten Feuerwiderstandsprüfungen sind jedoch ständig zu verbessern und weiterzuentwickeln. Durch besseres Verständnis von den Abläufen in den Prüföfen können diese optimiert werden. Ein wichtiger Schritt besteht darin, die Vorgänge in den Materialien genau zu untersuchen und theoretisch zu verstehen, um Verbesserungen an ihnen entwickeln zu können. Damit kann der Aufbau und die Konstruktion von ganzen Bauteilen optimiert werden, indem man die ablaufenden Prozesse in den Bauteilen versteht. Als eine in den letzten Jahren entwickelte Möglichkeit, die enorme Fortschritte brachte, gilt die numerische Simulation von solchen Prozessen. Neben diesen technischen und physikalischen Entwicklungspotential einer Brandsimulation erweist sich ebenso der Aufwand einer Feuerwiderstandsprüfung als sehr hoch. Aufgrund dessen verfügt die numerische Simulation über ein enormes Potential, diesen Aufwand zu verringern.

#### 2.1.1 Projekt: Rechnen statt messen

Das IBS – Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH ist eine leistungsfähige Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstelle für Brandschutz in Österreich. Als akkreditierter und notifizierter Sicherheits-Service bietet es neben Brandversuchen für Materialprüfungen oder Untersuchungen und Erprobungen von Produkten auch Inspektionen, Überprüfungen, Begutachtungen sowie Rekonstruktionsversuche zur Brandursachenermittlung an. Die Brandversuche an Bauteilen werden zur Ermittlung der Feuerwiderstandsfähigkeit nach europäischen Prüfmethoden durchgeführt.

Das IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH bietet nachhaltiges Wissensmanagement und Kompetenzsicherung durch laufende Investition in F&E-Projekte. Eines dieser Forschungsprojekte ist "Rechnen statt messen", welches im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit des IBS und dem Institut für Thermal Engineering der TU Graz durchgeführt wird. Hierbei werden die Feuerwiderstandsprüfungen mit Computational Fluid Dynamics (CFD) und Finite-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Strömungsverhalten des Prüfofens ermittelt, um das

Verhalten des Ofens besser verstehen zu können und dadurch in der Lage sein zu können, den Prüföfen zu optimieren. Stromlinien der Strömung in der Brennkammer zeigten im Bereich der sichtbaren Flamme eine große Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Temperaturen in der Brennkammer konnten gut nachgebildet werden.

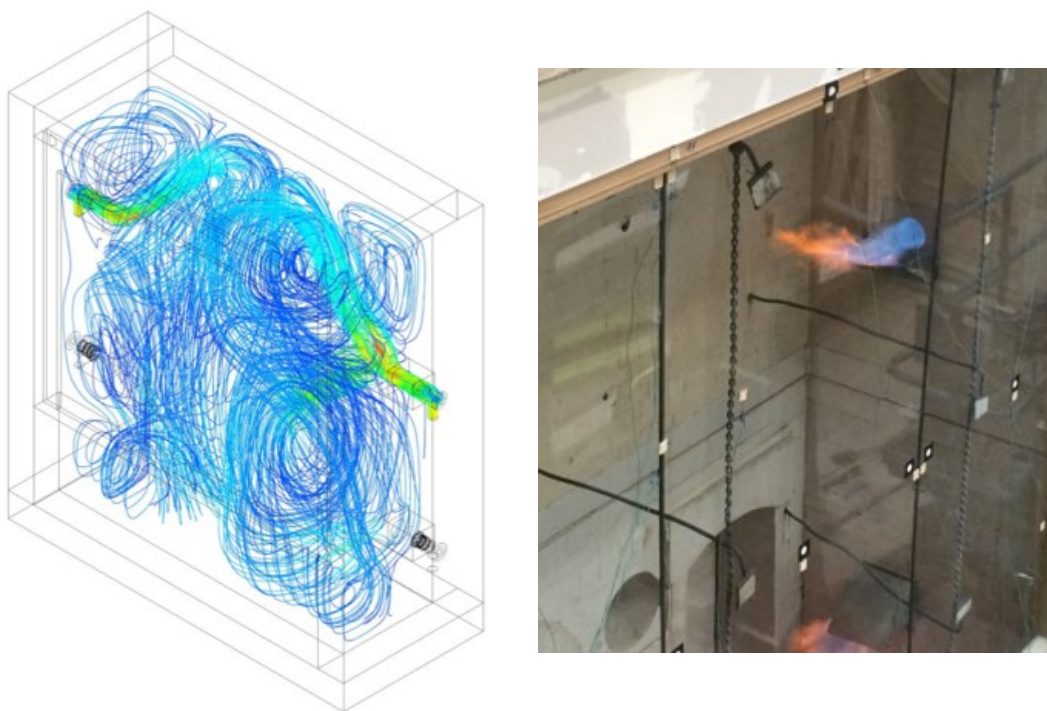


Abbildung 2.1: Simulation der Strömungen in der Brennkammer.

## 2.2 Gips als feuerhemmendes Material

Als nächster Schritt wurden einfache Türkonstruktionen getestet. Hierbei wurde schnell klar, dass Materialien, die viel Wasser in ihrer Struktur gebunden haben, eine genauere Untersuchung benötigen. Auf der linken Seite in Abbildung 2.2 sieht man die Abweichung der Simulation vom Experiment. In dieser Türkonstruktion war Gips als Wärmedämmstoff eingebaut. In Gips ist viel Wasser in seiner kristallinen Struktur gebunden. Dieses Wasser, im Speziellen der Phasenwechsel von Wasser zu Dampf, verursacht die starke Abweichung vom Experiment.

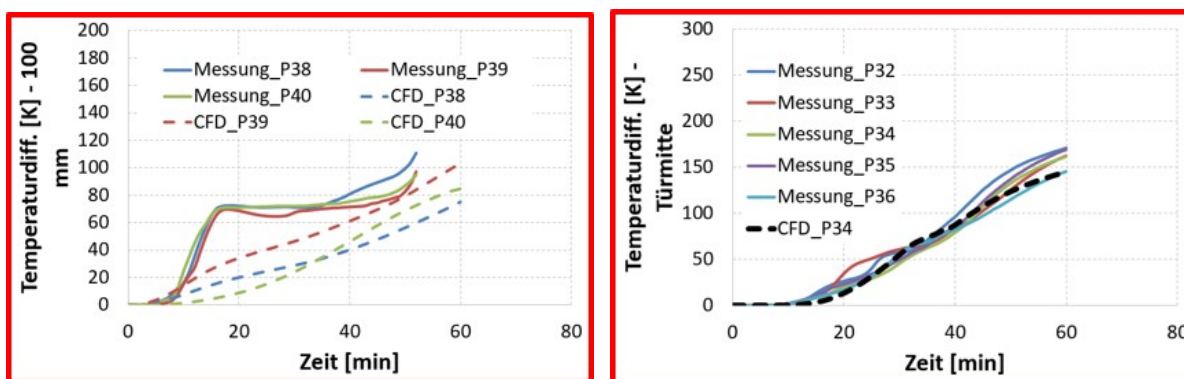


Abbildung 2.2: Temperaturverlauf von Simulationen von Brandschutztüren mit verschiedenen Bestandteilen

Aufgrund dieser schon bald ersichtlichen Diskrepanzen bei der Simulation von Bauteilen, die Gips oder allgemein Feststoffe, in denen Wasser gebunden ist, enthalten, entstand das Thema dieser Arbeit: Simulation des Wärmetransportes durch Gips. Es wurde ein Orientierungsversuch an dem Prüfofen, welcher in Abbildung 2.3 zu sehen ist, in der Prüfhalle der IBS in Linz durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es, die gemessenen Temperaturverläufe dieses Experiments möglichst exakt numerisch zu simulieren. Für die numerische Simulation wird das Programm ANSYS Fluent verwendet, das alle erforderlichen mathematischen Modelle zur Betrachtung dieses Problems implementiert hat. Für die Simulation wird Gips als poröse Struktur angenommen und ein Mehrphasenmodell zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusion im Gipsgefüge herangezogen. Zudem wird der Phasenwechsel zwischen Wasserdampf und Wasser mitberücksichtigt.



Abbildung 2.3: Gasbefeuert kombinierter Horizontal- und Vertikalprüfstand für orientierende als auch normative Versuche mit einer beflamte Fläche bis max. 1200 x 1200 mm (BxH)

Mit dieser Arbeit soll die Grundlage für Simulationen von Brandschutzbauteilen, welche Materialien beinhalten, in denen Wasser gebunden ist, erarbeitet werden. Dies ist, wie bereits in der Einführung erwähnt, von großer Bedeutung für die Weiterentwicklung von Brandschutzmaßnahmen.

# Kapitel 3

## Gips

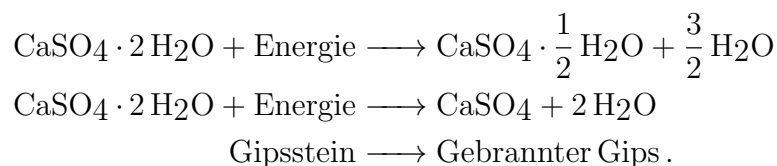
Gipsplatten, häufig auch als Gipskartonplatten bezeichnet, werden seit mehreren Jahrzehnten im Baubereich eingesetzt. Gipsbaustoffe bestehen im Wesentlichen aus dem Mineral Gips, chemisch als Calciumsulfat-Dihydrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) bezeichnet. Gips enthält folglich chemisch gebundenes Wasser, welches bei starker Erwärmung abgespalten wird und dadurch die angrenzenden Bauteile für eine begrenzte Zeit kühlen kann. Dieser Effekt hat eine große Bedeutung für den Brandschutz.

### 3.1 Vorkommen und Produktion

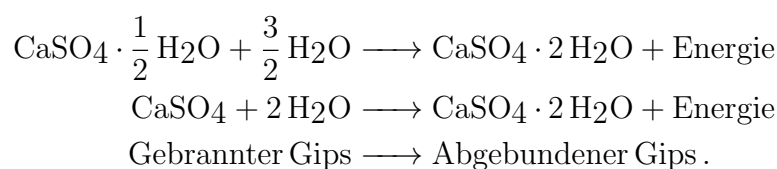
Gips ist Calciumsulfat, das in verschiedenen Hydratstufen vorliegen kann. Das in der Natur vorkommende Gipsgestein ist Calciumsulfat-Dihydrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); die in der Natur anstehende kristallwasserfreie Form des Calciumsulfats wird als Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) bezeichnet. Beide Minerale bildeten sich im Laufe geologischer Vorgänge weiträumig und in großer Menge; sie werden weltweit abgebaut und technisch genutzt. Außerdem fallen Gips und Anhydrit in großen Mengen als industrielles Nebenprodukt an.

Mit "Gips" werden im deutschen Sprachgebiet sowohl das in der Natur vorkommende Gipsgestein und das diesem entsprechenden Nebenprodukt aus industriellen Prozessen als auch die beim Brennen dieser Ausgangsstoffe entstehenden Erzeugnisse bezeichnet.

Gips kommt seit jeher als Bau- und Werkstoff zur Verwendung. Diese Verwendung ermöglicht die leichte Entwässerbarkeit (Dehydratation) des Calciumsulfat-Dihydrats – z.B. des Gipsgesteins. Dabei wird das an das  $\text{CaSO}_4$  gebundene Wasser teilweise oder vollständig ausgetrieben:



Durch den reversiblen Prozess der Bindung von Wasser erlangt der zuvor gebrannte – d.h. dehydratisierte – Gips unter Bildung eines kristallinen Gefüges eine mehr oder weniger große Festigkeit:



Sowohl vor als auch nach dem Brennprozess ist Gips eine ungiftige Substanz [5].

### 3.1.1 Naturgips und Naturanhydrit

Gips und Anhydrit finden sich häufig in ausgedehnten Ablagerungen in vielen Ländern der Erde. Sie entstanden durch Auskristallisation aus übersättigten wässrigen Lösungen seichter Meeresteile, dabei setzten sich zuerst Carbonate, dann Sulfate und zuletzt Chloride in der Folge ihrer Löslichkeit ab.

Bedingt durch die geologische Vorgeschichte unterscheiden sich die Gipsgesteine in ihrem Reinheitsgrad sowie in ihrer Farbe und in ihrem Gefüge.

Zu den natürlichen Beimengungen zählen jene Sedimente, die während der Abscheidung des Gipses aus ehemaligen Meeren niedergeschlagen wurden, wie z.B. Kalkstein, Mergel, Ton und gelegentlich auch Sand, Bitumen oder verschiedene Salze [5].

### 3.1.2 Gips aus technischen Prozessen

In bestimmten technischen Prozessen entsteht Calciumsulfat als Nebenprodukt. Es bildet sich meist durch Umsetzung von Calcium Verbindungen - im Allgemeinen Calciumcarbonat oder Calciumdihydroxid – mit Schwefelsäure oder – wie bei der Rauchgasentschwefelung – mit dem Schwefeldioxid der Rauchgase [5].

#### Rauchgasentschwefelungsanlagen-Gips (REA-Gips)

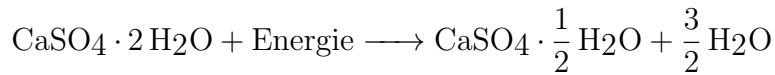
Rauchgasentschwefelungsanlagen-Gips (REA-Gips) entsteht bei der Entschwefelung der Rauchgase von Kraftwerken, die mit fossilen Brennstoffen befeuert werden. Er wird bei der nassen Rauchgasentschwefelung mit Kalk(stein)-waschverfahren nach Oxidation mit Luft, Abtrennung der Gipskristalle, Waschen und Filtrieren gezielt als Nebenprodukt gewonnen. Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA-Gips) ist das feuchte, feinteilige kristalline Calciumsulfat-Dihydrat –  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – mit hoher Reinheit. Dieser REA-Gips ist ein direkt verwendbarer Rohstoff mit großer Bedeutung zur Versorgung der Gipsindustrie mit Rohstoffen [5].

#### Anhydrit und Gips aus chemischen Prozessen

Fluoroanhydrit entsteht bei der Flusssäure-Herstellung durch Reaktion von Flussspat mit konzentrierter Schwefelsäure. Fluoroanhydrit wird auch synthetischer Anhydrit genannt und hat Bedeutung als Abbinderegler für Zement und als Rohstoff für Estriche. Bei einigen Herstellungsverfahren der chemischen Industrie entstehen aus der Neutralisation von Schwefelsäure mit Kalkprodukten ebenfalls Gipse. Neben dem Phosphorgips sind dies Gipse aus der Herstellung organischer Fruchtsäuren (z.B. Weinsäure, Zitronensäure und Oxalsäure), die sich teilweise durch sehr hohe Weißgrade auszeichnen, oder der Aufbereitung von Dünnsäure aus der Titandioxid-Herstellung. Insgesamt stehen die Mengen von Anhydrit und Gips aus chemischen Prozessen deutlich hinter denen der natürlichen Rohstoffe und REA-Gips zurück [5].

## 3.2 Chemische und physikalische Eigenschaften

Der Massenanteil des kristallin gebundenen Wassers ( $\text{H}_2\text{O}$ ) im Gips beträgt 20.92%. Calciumsulfat-Dihydrat ist nur unterhalb von 40 °C stabil. Bei Temperaturen über 40 °C geht Calciumsulfat-Dihydrat in  $\beta$ -Halbhydrat über. Diese Umwandlung erfolgt im Bereich von wenig über 40 °C so langsam, dass sie technisch bedeutungslos ist. Erst durch weiteres Erhitzen bei Temperaturen bis etwa 180 °C entsteht Halbhydrat. Der größte Anteil wird bei Temperaturen zwischen 120-180 °C umgewandelt.



Für diesen Prozess, welcher als "Brennen" bezeichnet wird, wird eine Energie von 100 kJ/kg benötigt. Der gebundene Wassergehalt sinkt bei dieser endothermen Reaktion auf 6.21 Ma%, was etwa  $\frac{2}{3}$  des Wassergehaltes entspricht.

Ab etwa 100 °C entsteht bereits  $\beta$ -Anhydrit III und über 200 °C Anhydrit II wobei für  $\beta$ -A III das Meiste bei etwa 290 °C umgewandelt wird und Anhydrit II vorwiegend bei Temperaturen von 300-900 °C entsteht.



Diese Reaktion nimmt eine Energie von 50 kJ/kg in Anspruch. Das Ergebnis dieser beiden Reaktionen ist Calciumsulfat ohne Kristallwasser [6],[5].

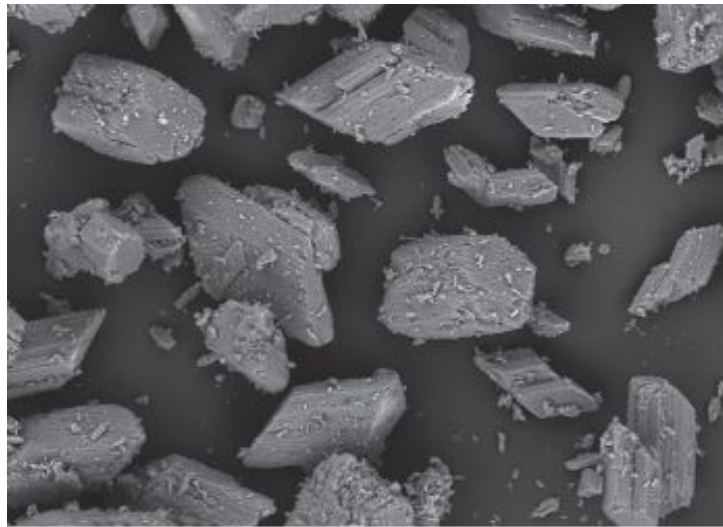
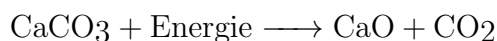


Abbildung 3.1: REM-Foto von  $\beta$ -Calciumsulfat-Halbhydrat [5]

Das Wasser, welches nach der Dehydratation die Struktur verlässt, ist dampfförmig. Die Verdampfungsenthalpie, die aufzuwenden ist, um das Wasser von der flüssigen Phase in die dampfförmige zu bringen, ist in der von der chemischen Reaktion verbrauchten Wärme von 150 kJ/kg Gips nicht enthalten. Zur Umwandlung unter atmosphärischen Bedingungen von 100 °C warmem Wasser in 100 °C warmen Dampf werden 2257 kJ/kg benötigt. Da Gips einen Wasseranteil von 21 % hat, wird bei 1 kg 0.21 kg Wasser frei. Daher beträgt die anzuwendende Verdampfungsenthalpie des Wassers bezogen auf 1 kg Gips 475 kJ/kg. Der gesamte Prozess benötigt also 625 kJ/kg Wärme, was sich stark auf den Widerstand von Gips gegen Brände auswirkt [6].

Gips besteht jedoch nicht aus reinem  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , sondern Calcium bindet sich auch mit Kohlenstoff und Sauerstoff zu  $\text{CaCO}_3$ , dessen massebezogener Anteil in etwa bei 10% liegt. Diese Verbindung zerfällt auch bei der Erhitzung von Gips bei Temperaturen zwischen ca. 600 bis 800 °C und führt zur Ausgasung von Kohlenstoffdioxid.



Die benötigte Energie für diese chemische Reaktion beträgt 2000 kJ/kg, was sich aufgrund des Massenanteils von 10% auf etwa 200 kJ/kg Gips reduziert [7].

Die Dichte von Gips ist für die verschiedenen Phasen von Gips bekannt [5].

Bezeichnung	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4$ III	$\text{CaSO}_4$ II
Dichte g/cm <sup>3</sup>	2.310	2.619	2.580	2.930



### 3.2.1 Ermittlung der Stoffdaten

Gipsprodukte werden häufig in der Bauindustrie in der Form von Gipskartonplatten verwendet. Der Kern der Platten wird aus Gips hergestellt indem zur Eigenschaftskontrolle andere Zusatzstoffe beigefügt werden. Gipskartonplatten werden, basierend auf ihrer Zusammensetzung und Ausführung, in verschiedene Klassen unterteilt, wie zum Beispiel reguläre Gipsplatten, Type X Gipsplatten und verbesserte Type X Gipsplatten. Das X steht hier für verschiedene Buchstaben, welche verschiedene Gipsplatten mit unterschiedlichen Eigenschaften bezeichnen. Im Gips Datenbuch [5] sind die Eigenschaften sowie Zusammensetzungen der verschiedenen Typen zusammengestellt. Gipsplatten, die einen natürlichen Feuerwiderstand durch den Gips im Kern haben, sind reguläre Gipsplatten. Wenn Additive beigefügt werden, die den natürlichen Feuerwiderstand verbessern, so handelt es sich um Type X oder verbesserte Type X Gipsplatten. Es gibt daher signifikante Unterschiede im Brandverhalten von Gipsplatten, die auf der Zusammensetzung des Kerns basieren, welche von einer Fabrik zur anderen stark variiert.

Die thermischen Eigenschaften von Gipsplatten variieren abhängig von deren Zusammensetzung des Gipskerns. Die Variation der massebezogenen spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur von einem Type X Gips ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Entwässerung von Gips sieht man in der ersten Spitze in der spezifischen Wärmekapazität bei den Temperaturen um 100 °C. Bei der Spitze um 650 °C ist die Ausgasung von Kohlenstoffdioxid ersichtlich. Die Werte der Spitzen sind leicht unterschiedlich in verschiedenen Messungen, dies ist auf die Variation der Zusammensetzung des Gips zurückzuführen.

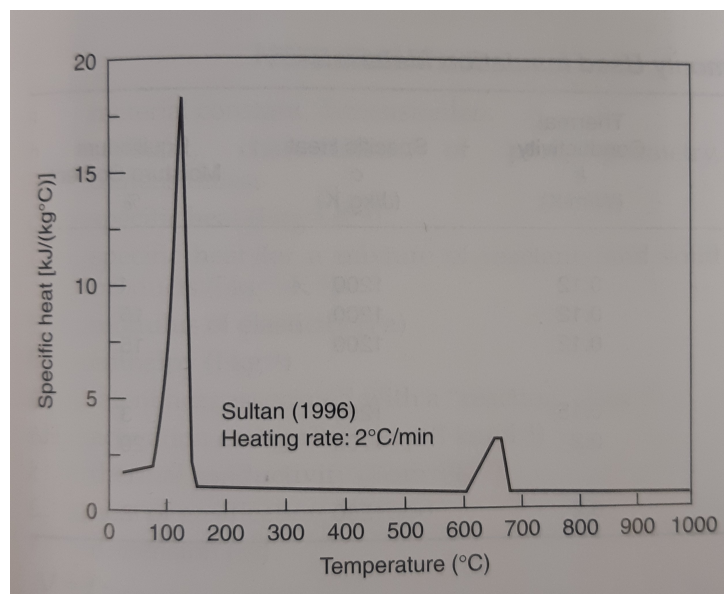


Abbildung 3.2: Spezifische Wärme eines Type X Gipsplatte Kerns als funktion der Temperatur [3].

Die thermische Leitfähigkeit von Gips ist schwierig festzulegen, dies ist zurückzuführen auf die große Variation in der Porosität von verschiedenen Gips Typen und die Natur der Aggregatzustände, welche das darin befindliche Wasser annehmen kann. Ein typischer Wert für Gipsplatten mit einer Dichte von  $700 \text{ kg m}^{-3}$  ist  $0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Die Abbildung 3.3 zeigt den typischen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit einer Type X Gipsplatte in Abhängigkeit der Temperatur.

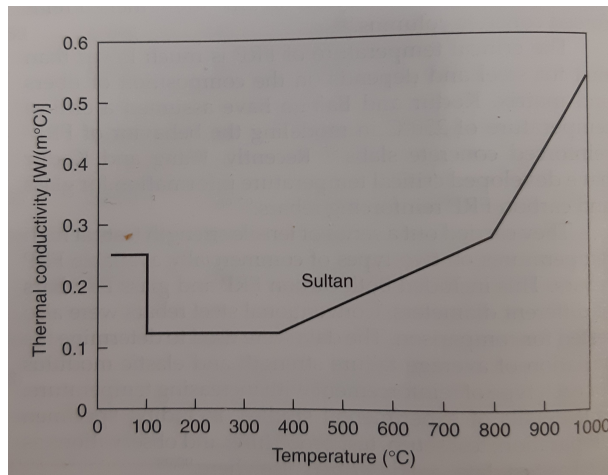


Abbildung 3.3: Thermische Leitfähigkeit eines Type X Gipsplattenkerns als Funktion der Temperatur [3].

Die thermische Ausdehnung von Gips Produkten variieren zwischen  $11 \times 10^{-6}$  and  $17 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bei Raumtemperatur, abhängig von der Zusammensetzung. Die dilatometrischen und gravimetrischen Kurven einer sogenannten feuerresistenten Gipsplatte mit einer Dichte von  $678 \text{ kg m}^{-3}$  sind in Abbildung 3.4 über die Temperatur aufgetragen [3].

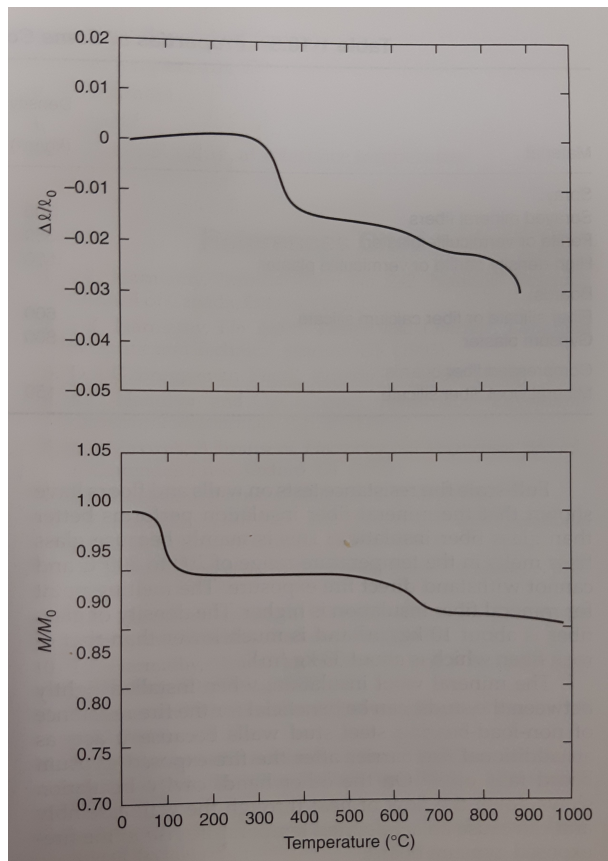


Abbildung 3.4: Dilatometrische und thermogravimetrische Kurven einer Gipsplatte mit der dichte von  $678 \text{ kg m}^{-3}$  [3].

Für eine detaillierte Simulation der Prozesse im Gips sind die temperaturabhängigen Stoffdaten zu ermitteln, welche in der Literatur stark variieren und daher speziell für die vorliegenden Bedingungen genau gemessen wurden. Des Weiteren gibt es, wie bereits erwähnt, unterschiedliche Typen von Gips, die verschiedene Materialeigenschaften

aufweisen. Daher ist es notwendig, dass die Stoffwerte, die für die Simulation verwendet werden, aus einer Messung an einem Probekörper stammen, dessen gleichwertiges Material in dem Versuch zur Validierung der Simulation verwendet wird. Zur Erhebung der temperaturabhängigen Stoffdaten wurde das ÖGI - Österreichisches Gießerei-Institut beauftragt.

## ÖGI Messungen

Das ÖGI - Österreichisches Gießerei-Institut ist ein außeruniversitäres Forschungsinstitut und bietet anwendungsnahe FE-Dienstleistung sowie akkreditierte Materialprüfungen nach EN-17025 an.

Das ÖGI verfügt neben vielen anderen Prüflaboratorien über ein thermophysikalisches Labor. Im thermophysikalischen Labor können Materialkennwerte wie Wärmeleitung, Wärmeausdehnung, Wärmekapazität bis zu sehr hohen Temperaturen ermittelt werden. Diese Daten sind bei jeder Werkstoffentwicklung von großer Bedeutung und als Eingangsparameter für Computersimulationen notwendig. Für die Ermittlung der Stoffdaten der verwendeten Gipskartonplatten im Valedierungsversuch wurde das ÖGI herangezogen. Die Aufheizgeschwindigkeiten wurden bei den Messungen gering gehalten, um eine homogene Temperaturverteilung in der Probe zu gewährleisten. Eine zu hohe Aufheizgeschwindigkeit würde eine Verfälschung der Messwerte zur Folge haben, da im Randbereich mit einer höheren Temperatur zu rechnen ist. Es wurden sehr kleine Proben verwendet, um sicherzustellen, dass der durch die Dehydratation entstehende Wasserdampf sofort aus der Probe entweichen kann. Somit kann eine Verfälschung der ermittelten Stoffdaten von Gips ausgeschlossen werden.

**Spezifische Wärmekapazität** Für die Ermittlung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität wurde die Methode der dynamische Differenzkalorimetrie (englisch differential scanning calorimetry, DSC) verwendet. Als Messgerät kam der "DSC 404 F1 Pegasus® – Hochtemperatur-DSC" zum Einsatz. Eine DSC-Messzelle besteht aus einem Ofen und einem integrierten Sensor mit entsprechenden Stellflächen für Probe- und Referenztiegel. Die Sensorflächen sind mit Thermoelementen verbunden bzw. sogar selbst Teil der Thermoelemente. Damit ist es möglich, sowohl die Temperaturdifferenz zwischen Probe- und Referenzseite (DSC-Signal) als auch die Absolut-Temperatur der Proben- bzw. Referenzseite zu erfassen.

Aufgrund der Wärmekapazität  $c_p$  der Probe erwärmt sich beim Aufheizen einer DSC-Messzelle die Referenzseite (meist leerer Tiegel) in der Regel schneller als die Probenseite, d.h. die Referenztemperatur ( $T_R$ , grün), wie in Abbildung 3.5 dargestellt, steigt etwas schneller an als die Proben-temperatur ( $T_P$ , rot). Beide Kurven verhalten sich beim Aufheizen mit einer konstanten Heizgeschwindigkeit parallel zueinander - bis eine Probenreaktion eintritt. Im vorliegenden Fall beginnt die Probe bei  $t_1$  zu schmelzen. Während des Schmelzvorgangs ändert sich die Temperatur in der Probe nicht; die Temperatur der Referenzseite bleibt davon jedoch unbeeinflusst und steigt weiterhin linear an. Nach Beendigung des Schmelzens nimmt auch die Proben-temperatur wieder zu und weist ab dem Zeitpunkt  $t_2$  erneut eine lineare Steigung auf.

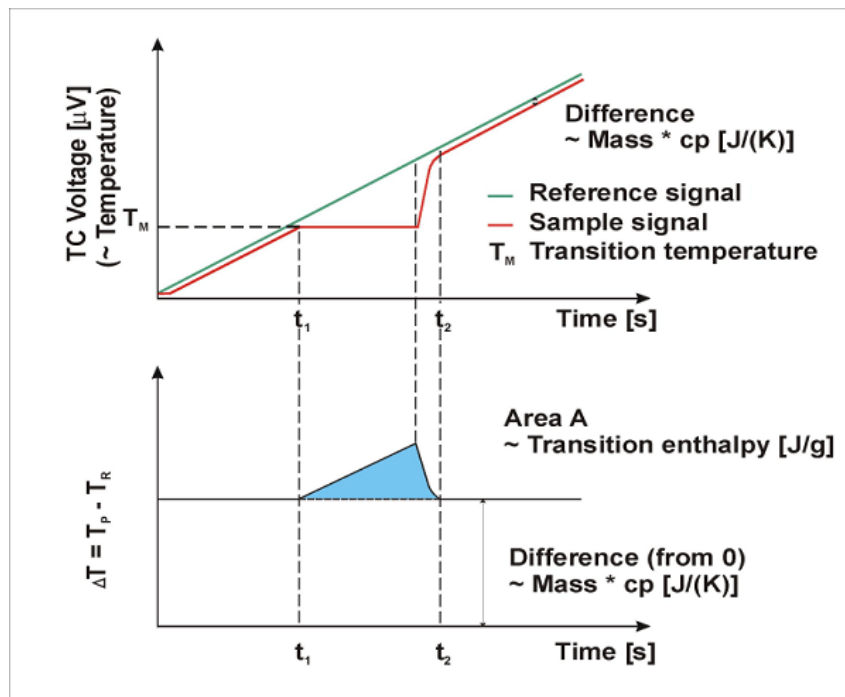


Abbildung 3.5: Signalerzeugung in einer Wärmestrom-DSC [8]

Das Differenzsignal ( $\Delta T$ ) der beiden Temperaturkurven ist in der unteren Bildhälfte dargestellt. Im mittleren Bereich der Kurve entsteht durch die Differenzbildung ein Peak (blau), der den endothermen Schmelzvorgang repräsentiert. Die Fläche des Peaks steht mit dem Wärmehalt der Umwandlung (Enthalpie in J/g) in Zusammenhang [8]. Die Masse der Probe nimmt im Laufe des Versuches ab, daher wird sie auch gemessen. Es kam eine Analysewaage "Sartorius ED224S" zum Einsatz. Die Wärmekapazität wird auf die Masse in kg bezogen, deshalb ist es möglich, sie auf die Ausgangsmasse oder auf die wahre Masse, welche die Probe zum jeweiligen Zeitpunkt hat, zu beziehen.

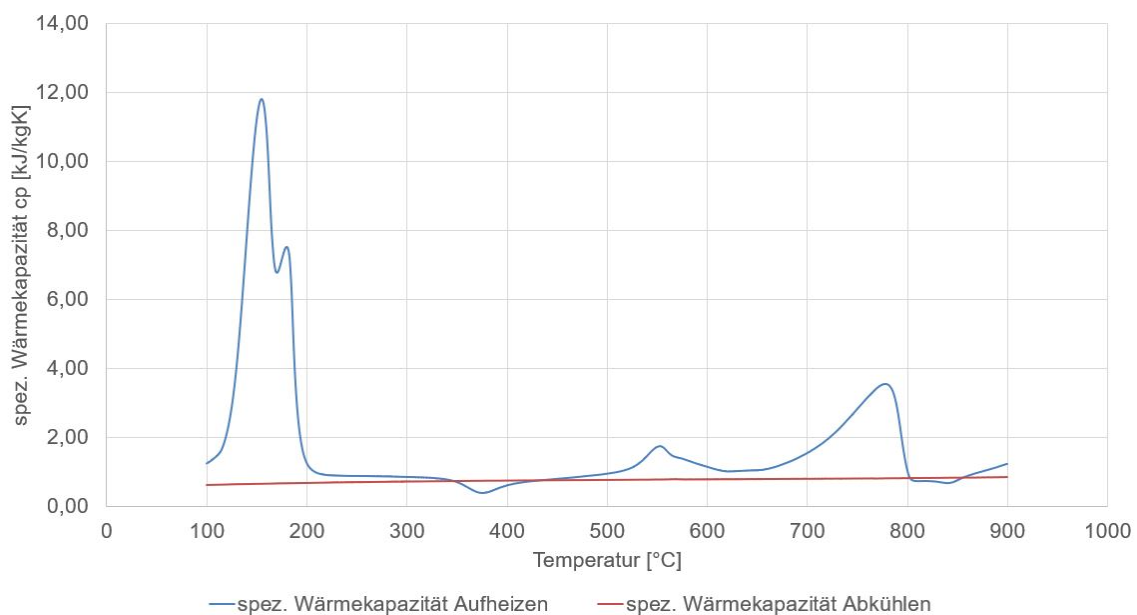


Abbildung 3.6: Gemessene spezifische Wärmekapazität bezogen auf die Ausgangsmasse.

In der Abbildung 3.6 ist der gemessene Verlauf der spez. Wärmekapazität bezogen auf die Ausgangsmasse dargestellt. Die Werte, bezogen auf die wahre Masse, sind etwas höher

aufgrund des Masseverlustes durch die Dehydration sowie das Ausgasen des Kohlenstoffs. Die Messung wurde in 1 K Schritten durchgeführt. Im Bereich zwischen 100 °C und 200 °C ist der hohe Energieaufwand für die Dehydration sowie die Verdampfung von Wasser zu sehen. Die beiden Teilreaktionen der Dehydration sind für die beiden Spitzen verantwortlich. Zwischen 650 °C und 800 °C ist die endotherme chemische Reaktion zu erkennen, wodurch es zur Ausgasung von Kohlendioxid kommt. Die anderen Krümmungen im Verlauf können nicht bestimmt werden und rühren von anderen Stoffen, welche die spez. Wärmekapazität beeinflussen [9].

Die spez. Wärmekapazität bei der Abkühlung von Gips ist in Rot dargestellt. Sie ändert sich kaum im vermessenen Temperaturbereich. Der Gips hat sich in gebrannten Gips  $\text{CaSO}_4$  (Anhydrit II) umgewandelt, welcher im Temperaturbereich von 40-1180 °C stabil ist [5].

**Masse** Die Masse wurde, wie bereits erwähnt, bei der Messung der spez. Wärmekapazität parallel mit einer Analysewaage mitgemessen. Die Abbildung 3.7 zeigt zwei Stufen; die erste bei etwa 150 °C und die zweite um 750 °C. Die erste Masseverlustphase ist wieder auf die Dehydration zurückzuführen. In der ersten Ableitung sieht man auch wieder die zwei Peaks der unterschiedlichen chem. Prozesse. Die zweite Stufe resultiert abermals aus der Ausgasung von Kohlenstoffdioxid. Der kleine Masseverlust bei rund 550 °C ist von anderen Bestandteilen des Baustoffes [7].

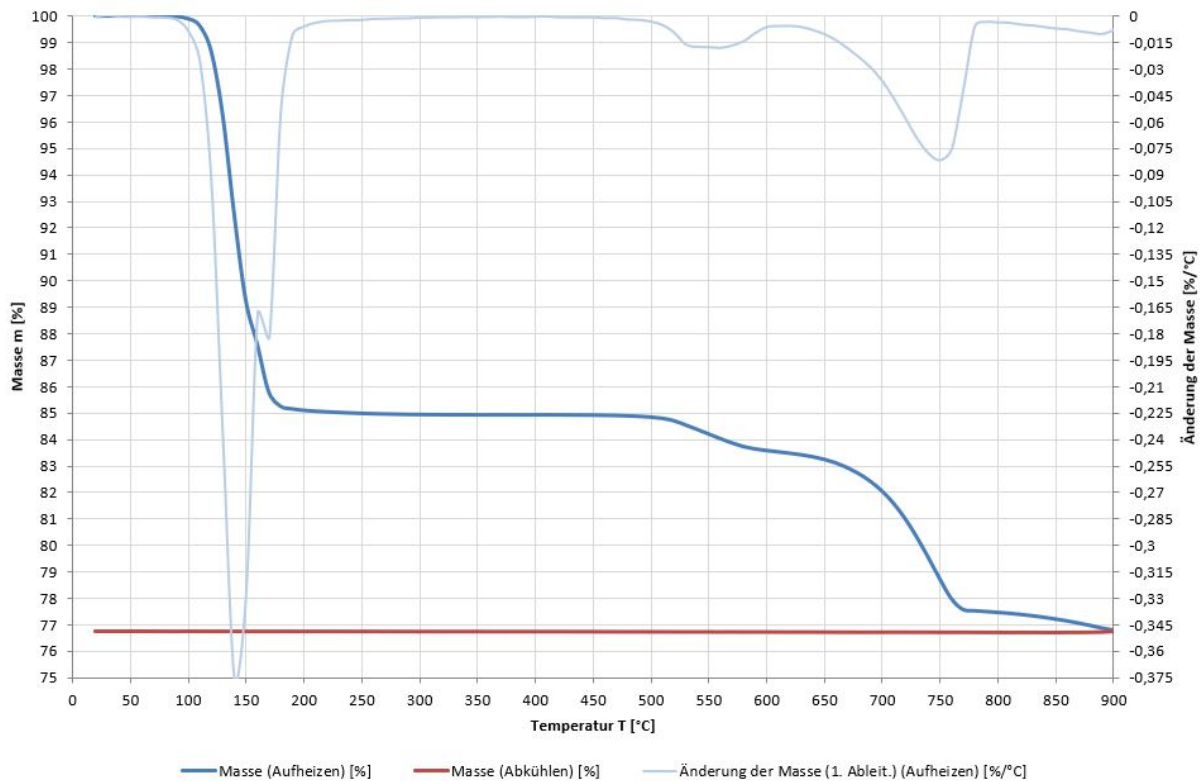


Abbildung 3.7: Kurven des Masseverlustes von Gips und dessen Ableitung als Funktion der Temperatur.

**Wärmedehnung** Zur Untersuchung der Wärmedehnung wurde das "NETZSCH DIL 402 E Dilatometer", wie es in Abbildung 3.8 dargestellt ist, verwendet.. Dehnt sich eine Probe während einer Messung aus, bewegen sich alle grünen Komponenten in der Grafik durch Linearführung (blau) nach hinten. Der optische Encoder bestimmt die zugehörige Längenänderung direkt auf der entsprechenden Skala [10].

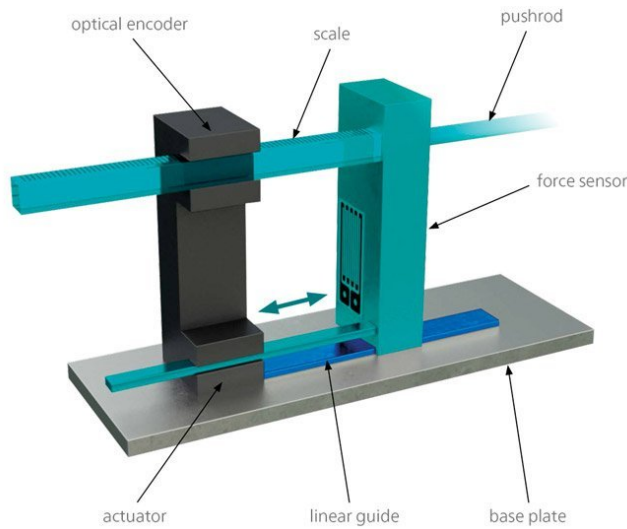


Abbildung 3.8: Funktionsprinzip eines Dilatometers [10].

Im Verlauf der Wärmedehnung in Abbildung 3.9 sieht man eine Ausdehnung aufgrund der Erwärmung zu Beginn des Aufheizvorgangs bis ca. 120 °C. Danach verlassen die H<sub>2</sub>O Moleküle das Kristallgitter, was zu einem Schwund der Probe führt. Der Schwund endet bereits bei etwa 140 °C. Danach bleibt die Dehnung ziemlich konstant bis etwa 300 °C. Ab einer Temperatur von etwa 300 °C setzt erneut ein Schwund der Probe ein, welcher bis etwa 400 °C anhält. Dies ist auf eine Gefügeveränderung im Gips zurückzuführen, welche einen Schwund ohne Masseverlust ermöglicht. Der leichte Schwund nach 400 °C bis etwa 650 °C ist auf die Verschmelzung der Mikro-Struktur von Gips zurückzuführen. Ab 650 °C bis 780 °C ist die Ausgasung von CO<sub>2</sub> zu erkennen. Der weitere steile Verlauf der Kurve in Abbildung 3.9 ist jedoch nicht auf den Masseverlust zurückzuführen und resultiert vermutlich aus einer starken Verschmelzung der Mikro-Struktur im Gips. Beim Abkühlen verändert sich das Gefüge nicht mehr. Der Schwund wird durch die Abkühlung des Materials verursacht.

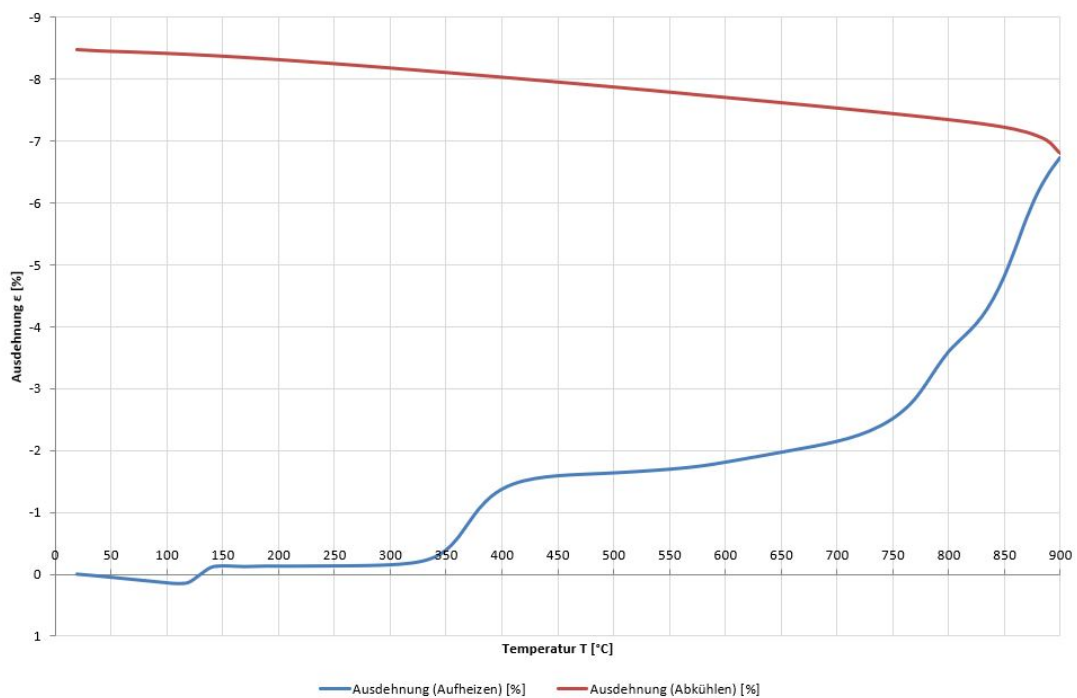


Abbildung 3.9: Gemessene Wärmedehnung.

**Dichte** Der Verlauf der Dichte wurde mit dem Verlauf der Masse, welcher, wie bereits erwähnt, mittels einer Analysenwaage während der Messung der spez. Wärmekapazität mitgemessen wurde, sowie der Dehnung und der Ausgangsdichte für den gemessenen Temperaturbereich, berechnet. Die Dichte weist ähnliches Verhalten wie die Wärmedehnung in einer etwas abgeschwächten Form auf. Dies kann man gut aus dem Vergleich der Abbildung 3.9 und der Abbildung 3.10 erkennen.

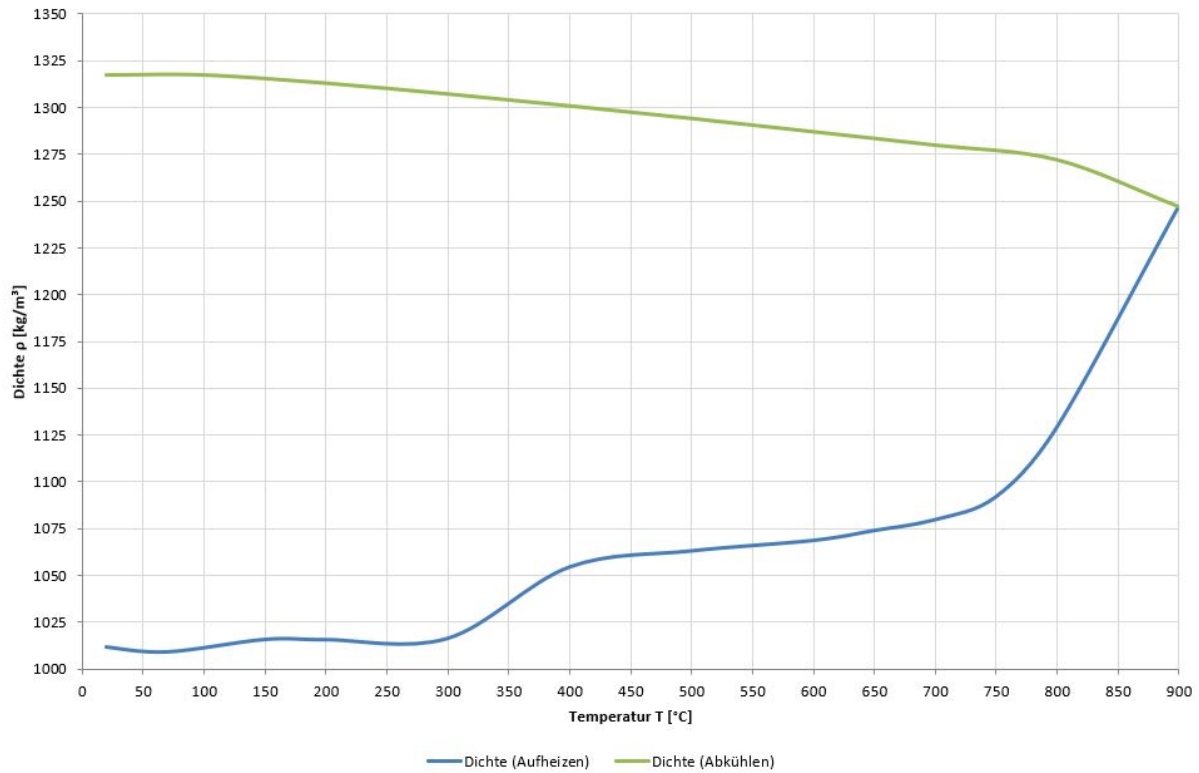


Abbildung 3.10: Dichte berechnet aus dem Verlauf der Dehnung und der Masse.

## Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wird als Produkt der Dichte, der spez. Wärmekapazität und der Temperaturleitfähigkeit berechnet.

Zur Messung der Temperaturleitfähigkeit kam die Laserflash-Anlage NETZSCH LFA 427 zum Einsatz. Die Laser oder Light Flash-Methode geht auf Arbeiten von Parker et al. aus dem Jahre 1961 zurück [11].

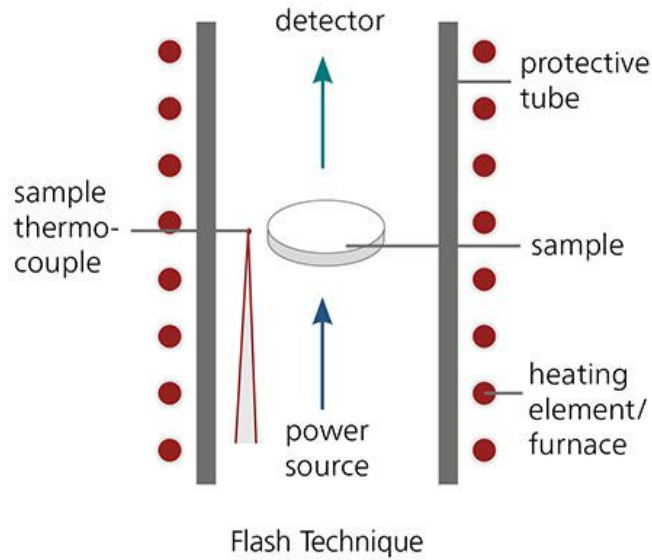


Abbildung 3.11: Funktionsprinzip der Laser Flash-Methode [12].

Während einer Messung wird die Unterseite einer plan-parallelen Probe, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, zunächst durch einen kurzen Energieimpuls aufgeheizt. Die daraus resultierende Temperaturänderung auf der Probenoberseite wird von einem Infrarot-Detektor gemessen. Einen typischen Signalverlauf zeigt Abbildung 3.12. Je höher die Temperaturleitfähigkeit des Probenmaterials ist, desto steiler verläuft der Signalanstieg.

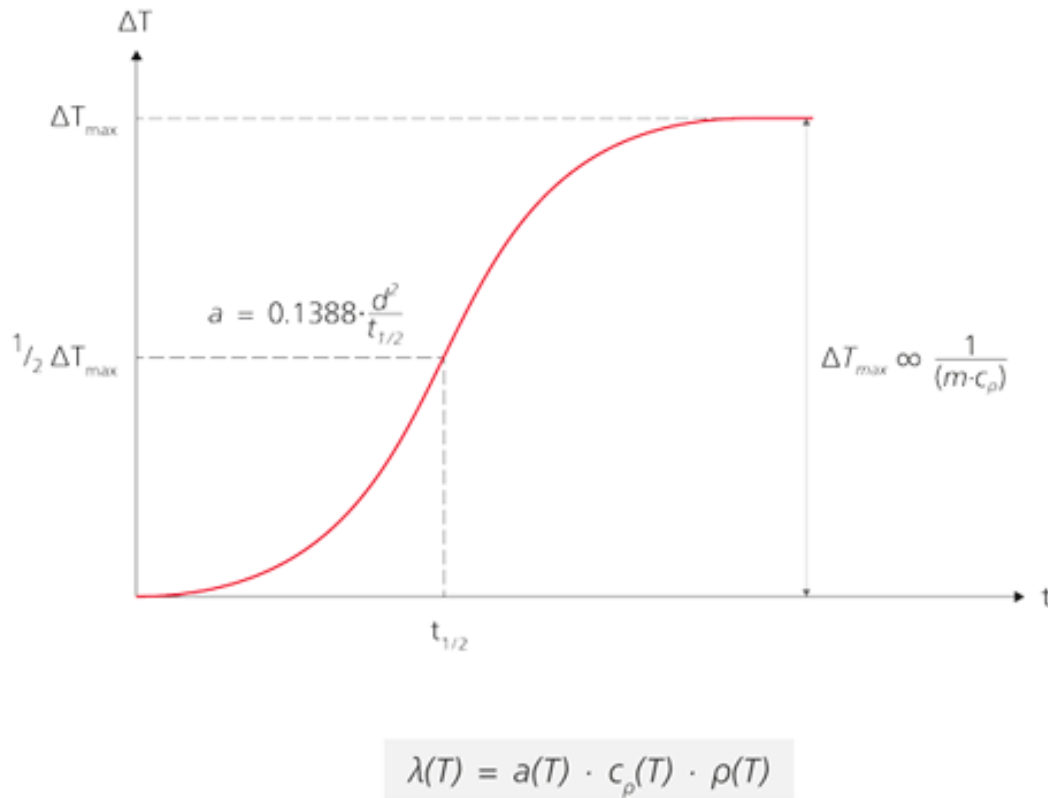


Abbildung 3.12: Typischer Signalverlauf der Laser Flash-Methode [12].

a: Temperaturleitfähigkeit



$\rho$ : Dichte

$c_p$ : Spezifische Wärmekapazität

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit

T: Temperatur

Aus der Halbzeit ( $t_{\frac{1}{2}}$ , Zeitwert auf halber Signalhöhe) und der Probendicke (d) lässt sich über die in Abbildung 3.12 angegebene Formel die Temperaturleitfähigkeit (a) und daraus schließlich die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) berechnen [12].

Der Verlauf der berechneten Wärmeleitfähigkeit der Probe in W/mK ist in Abhängigkeit der Temperatur in Abbildung 3.13 dargestellt. In der Wärmeleitfähigkeit ist ein genereller Anstieg zu beobachten, jedoch nimmt dieser im Bereich von 70-150 °C stark ab. Diese Abnahme lässt sich auf die Dehydratation zurückzuführen [9].

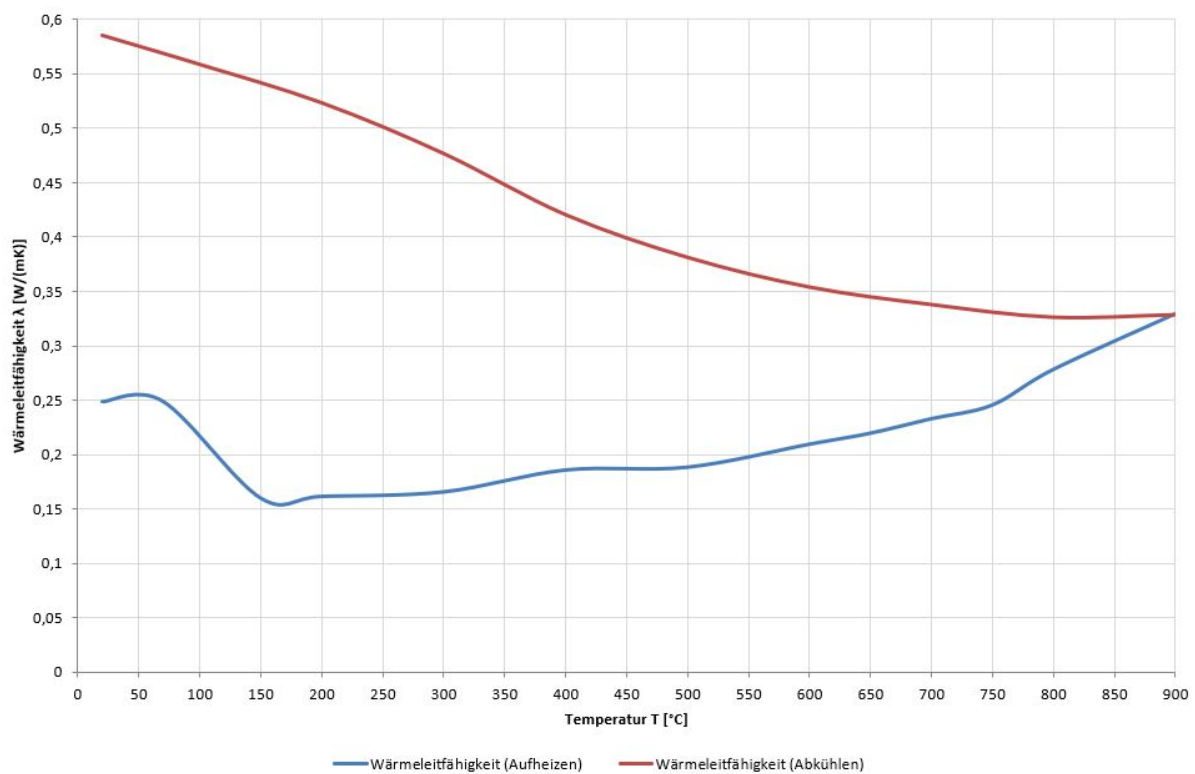


Abbildung 3.13: Verlauf der aus den gemessenen Werten von spezifischen Wärme, Dichte, und Temperaturleitfähigkeit berechneten Wärmeleitfähigkeit der Probe.

Die Mikro-Struktur von Gips besteht aus großen Poren von etwa 40-100 $\mu$ m, welche in einen Netz aus offenen porösen mikrokristallinen Nadeln gehüllt sind. Die Abbildung 3.14 zeigt die Struktur in verschiedenen Größen aufgelöst. Diese großen Poren ändern sich nicht unter thermischer Belastung. Jedoch ist in dem hochauflösenden 5  $\mu$ m Bildern eindeutig zu erkennen, wie die feinen Nadeln zu schmelzen beginnen. Es findet eine Verschmelzung der Kleinstruktur statt, ähnlich wie es vom Sintern von Keramik bekannt ist. Dieses Verhalten ist der Grund für die steigende Wärmeleitfähigkeit, da sich der Kontakt zwischen den einzelnen kristallinen Nadeln mit steigender Temperatur erhöht [9].

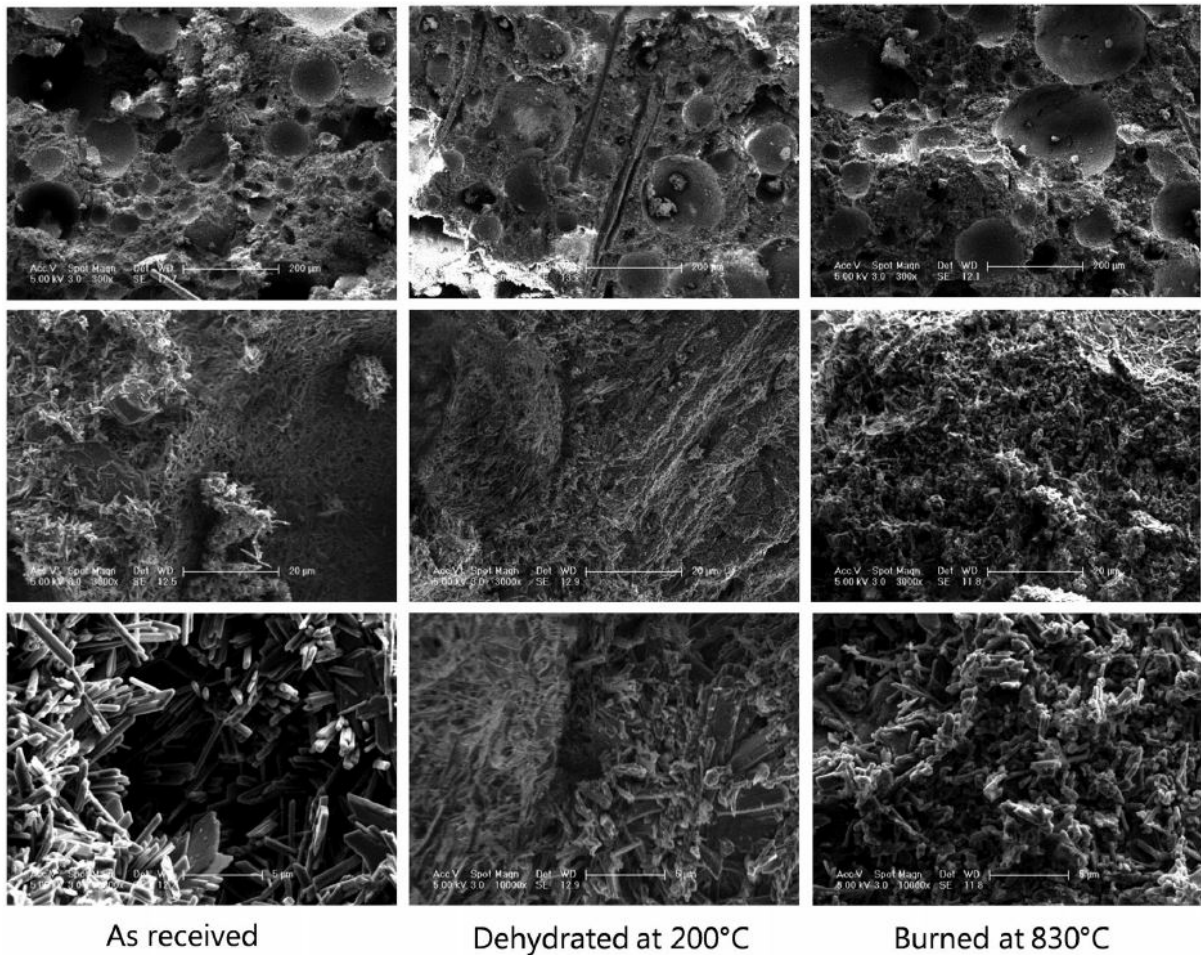


Abbildung 3.14: Bilder einer SEM (scanning electron microscopy) in verschiedener Auflösung (200, 20 and  $5\mu m$  von oben nach unten) und bei unterschiedlichen Temperaturen [9].

Der Verlauf beim Abkühlen der Probe zeigt eine steigende Wärmeleitfähigkeit, dies ist auf die geringer werdende Wärmedehnung zurückzuführen, welche die Struktur nochmals verdichtet. Die Wärmeleitfähigkeit hat sich durch das Aufheizen und das anschließende Abkühlen mehr als verdoppelt. Grund dafür sind Veränderungen im kristallinen Gefüge des Materials.

### 3.3 Gips als Baustoff

Seit Jahrhunderten wird Gips als einfach zu beherrschendes, wirtschaftliches und kreatives Baumaterial eingesetzt. Gips ist heute also nicht von ungefähr der Leitwerkstoff für Wände, Decken und Böden im modernen Innenausbau. Mit Gips und Gipsprodukten verbunden sind die Einführung rationeller Trockenbauweisen und die zeitgemäße Funktionstrennung von tragendem Rohbau und leichtem Ausbau. Hochwertige, funktionale Putz- und Spachtelsysteme sowie schnell abbindende, selbstnivellierende Calciumsulfat-Fließestriche sind weitere Beispiele für das Innovationspotenzial des Minerals Gips [5]. Ein wichtiges Bauprodukt aus Gips stellen Vollgipsdielen dar, welche auch für diese Masterarbeit zur genaueren Untersuchung herangezogen wurden.

### 3.3.1 Vollgipsdielen

Die Herstellung von Gips-Wandbauplatten erfolgt in automatisierten Produktionsanlagen. In Dosier- und Mischaggregaten wird aus Stuckgips und Wasser eine homogene, fließfähige Masse hergestellt, die in Edelstahlformkästen schnell abbindet. Die Platten werden danach getrocknet und verpackt [5].

Gipsplatten bieten im Hinblick auf ihre geringe Dicke ausgezeichneten Feuerschutz. Das ist darin begründet, dass der Gips etwa 20 % Kristallwasser enthält, welches bei Brandeinwirkung verdampft und dabei durch Umwandlung Energie verzehrt. Die Temperatur auf der dem Feuer abgewandten Seite bleibt über längere Zeit in Abhängigkeit von der Plattendicke bei etwa 110°C konstant. Die dann entstehende entwässerte Gipsschicht bietet eine erhöhte Wärmedämmung [5].

# Kapitel 4

## Experimente und Ergebnisse

Der Brandversuch mit Gipsdielen wurde am 20.02.2018 am Ofen PS4 in der Prüfhalle des IBS durchgeführt. Er dient als experimentelle Referenz zu der Simulation mit ANSYS-Fluent, die im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeitet wird.

### 4.1 Aufbau

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, wird während einer Feuerwiderstandsprüfung der Probekörper einer vorher definierten Brandlast ausgesetzt. Dies geschieht in einem genormten Prüfofen. In der Abbildung 4.1 ist der Ofen PS4 ohne Probekörper dargestellt. Der Ofen wird mit Heizöl (extraleicht) befeuert. Beim Brenner handelt es sich um einen Drallbrenner, der das Öl nicht vorgemischt verbrennt. Die Abmessungen des Brennraums sind  $1,2 \times 1,85 \times 1,2$  m. Die Wände des Ofens bestehen im unteren Teil und im Bereich des Rauchgasaustrittes aus Beton. Im oberen Teil bestehen die Wände aus Mineralwolle mit einer Dicke von 20 cm, wobei die Mineralwolle an der Decke eine Dicke von 15 cm aufweist. Die Öffnungen für die Ölbrenner sind im unteren Teil zu erkennen und der Rauchgasaustritt befindet sich zentral an der Rückwand. Der Probekörper wird an der Vorderfront angebracht, welche eine Abmessung von  $1,2 \times 1,2$  m aufweist. Der gesamte Ofen ist in einen Korpus aus Stahlblech integriert.



Abbildung 4.1: Ofen PS4 ohne Probekörper.

Messtechnisch wird die Einhaltung der Einheitstemperaturkurve (ETK) durch die 4 Thermoelemente im Vordergrund bewerkstelligt. Bei der ETK handelt es sich um eine Aufheizkurve. Die mittlere Ofentemperatur, die mit Thermoelementen gemessen wird, muss so überwacht werden, dass sie folgender Beziehung im Rahmen festgelegter Toleranzen

entspricht:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (4.1)$$

wobei T die mittlere Ofentemperatur in Grad Celsius und t die Zeit in Minuten ist. Die Thermoelemente befinden sich 10 cm vom Probekörper entfernt. Die genaue Position der Thermoelemente ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

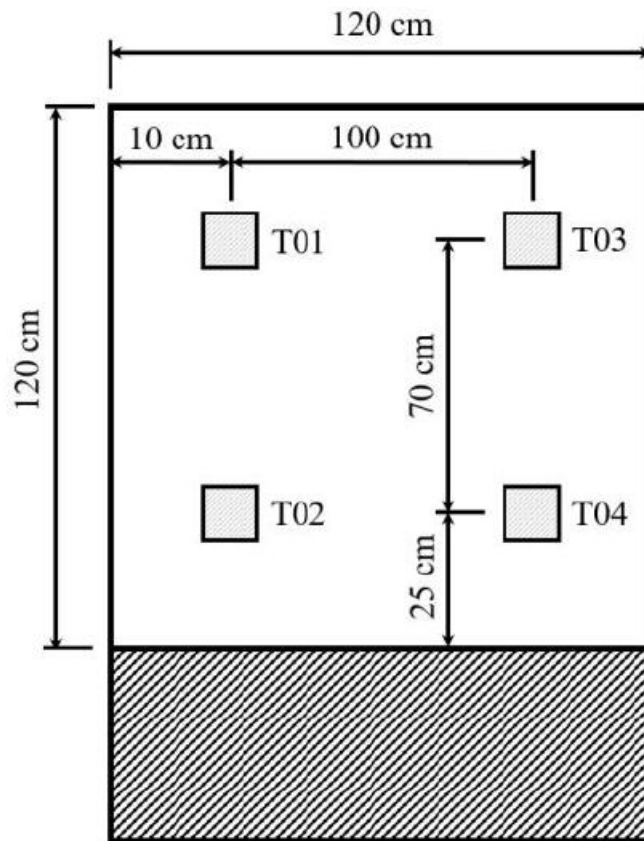


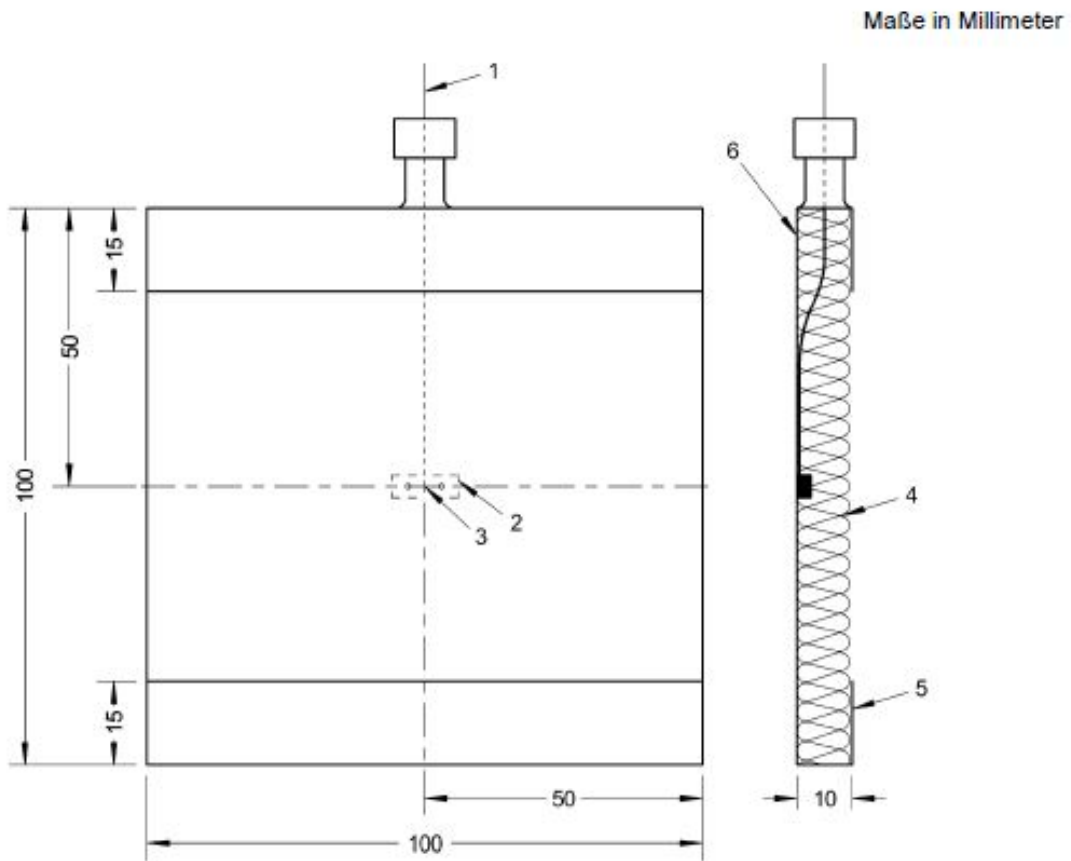
Abbildung 4.2: Position der Thermoelemente im Ofen.

Der Versuch wurde genau nach den Richtlinien der Feuerwiderstandsprüfungen nach EN-1363 durchgeführt, genauere Details über die Prüfung können der Norm entnommen werden [2]. Die wichtigsten Auszüge, wie die Beschreibung der Thermoelemente und Sensoren und deren Verwendung, werden in dieser Arbeit kurz erläutert.

### Ofen-Thermoelemente nach EN-1363

Als Ofen-Thermoelemente sind Platten-Thermoelemente zu verwenden, die aus einer gefalteten Platte aus einer Nickellegierung, einem an dieser Platte befestigten Thermoelement und einer Wärmedämmung zusammengebaut sind.

Die gefaltete Metallplatte muss aus einem Streifen austenitischer Superlegierung auf Nickelbasis, die verzunderungsbeständig ist, mit einer Länge von  $(150 \pm 1)$  mm, einer Breite von  $(100 \pm 1)$  mm und einer Dicke von  $(0,7 \pm 0,1)$  mm konstruiert sein und entsprechend dem Entwurf von Abbildung 4.3 gefaltet werden.



#### Legende

- 1 ummanteltes Thermoelement mit wärmedämmter Messstelle
- 2 punktgeschweißter oder geschraubter Metallstreifen
- 3 Messstelle des Thermoelementes
- 4 Wärmedämmstoff (zum Probekörper ausgerichtet)
- 5 Blechstreifen mit Dicke von  $(0,7 \pm 0,1)$  mm aus einer Nickel-Stahllegierung
- 6 Fläche „A“

**Bild 1 — Aufbau des Platten-Thermometers**

Abbildung 4.3: Ofenthermoelemente laut [2]

Die Messstelle muss aus Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium-Draht (Typ K), wie in [13] festgelegt, bestehen, der in einer Ummantelung aus hitzebeständigem legiertem Stahl mit einem Nenndurchmesser im Bereich von 1 mm bis 3 mm in einer mineralischen Wärmedämmung eingebettet ist, wobei die Messstellen von der Ummantelung elektrisch isoliert sind. Die Messstelle des Thermoelements ist am geometrischen Mittelpunkt der Platte an der in Abbildung 4.3 dargestellten Stelle mit einem schmalen Streifen aus dem gleichen Werkstoff wie die Platte zu befestigen. Der Streifen kann an die Platte geschweißt oder er darf geschraubt werden, um den Austausch des Thermoelements zu erleichtern. Der Streifen muss ein Maß von ungefähr  $(18 \times 6)$  mm aufweisen, wenn er an die Platte punktgeschweißt wird und ein Nennmaß von  $(25 \times 6)$  mm, wenn er an die Platte geschraubt wird. Der Durchmesser der Schrauben muss 2 mm betragen.

Der Zusammenbau von Platte und Thermoelement muss mit einer Abdeckung aus anorganischem Wärmedämmstoff mit dem Nennmaß  $(97 \pm 1)$  mm  $\times$   $(97 \pm 1)$  mm  $\times$   $(10 \pm 1)$  mm und einer Dichte von  $(280 \pm 30)$  kg/m<sup>3</sup> versehen sein.

Vor der ersten Verwendung des Platten-Thermometers ist der gefaltete Plattenteil 1 h lang in einem auf 1 000 °C vorgeheizten Ofen zu konditionieren oder in einem Ofen für die Feuerwiderstandsprüfung 90 min bei einer Prüfung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve zu beanspruchen.

Wenn ein Platten-Thermoelement mehr als einmal verwendet wird, ist ein Protokoll über seine Verwendung zu führen, in dem für jede Anwendung die durchgeführten Überprüfungen und die Verwendungsdauer angegeben sind. Das Thermoelement und die Wärmedämmstoff-Abdeckung sind nach 50 Stunden der Verwendung im Prüfofen auszutauschen [2].

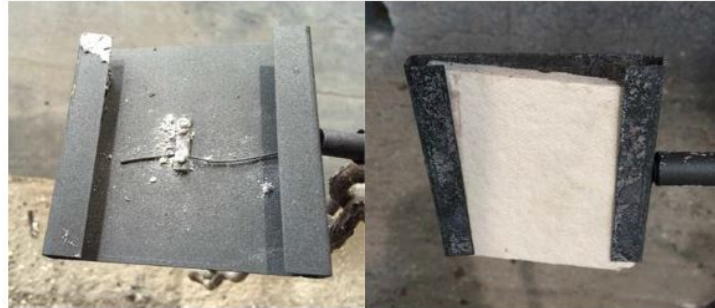


Abbildung 4.4: Die Platten-Thermoelemente im Prüfofen nach der Norm EN-1363 [14].

Der arithmetische Mittelwert dieser vier Messstellen ist die Eingangsgröße für die Temperaturregelung des Ofens. Der Ofen wird so geregelt, dass die ETK möglichst genau erreicht wird. Die Toleranz der Temperaturabweichung ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Messdaten werden auch aufgezeichnet und stehen für die Weiterverarbeitung zur Verfügung.

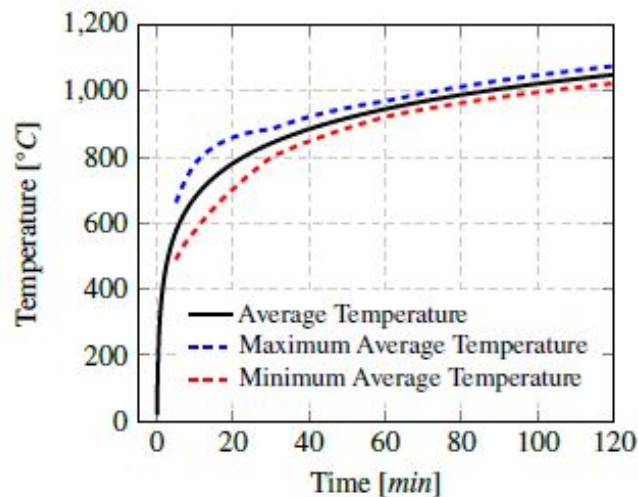
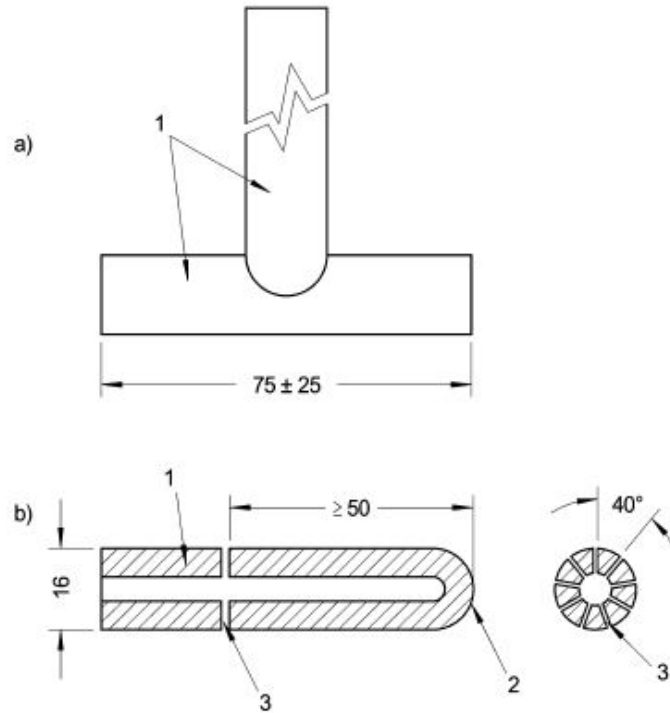


Abbildung 4.5: Die ETK und die maximale Abweichung während der Prüfung laut EN-1363 [15]

Neben der Temperaturmessung ist der Ofen mit einem Drucksensor ausgestattet, welcher den Ofendruck überwacht. Dieser ist am hinteren Ende des Ofens angebracht und befindet sich etwa mittig 100 mm unterhalb der Decke.

### Druckmessung nach EN-1363

Der Ofendruck ist mit einer der in Abbildung 4.6 dargestellten Ausführungen von Druckmessköpfen zu messen [2].



#### Legende

a) „T“-förmiger Druckmesskopf

1 Rohr aus nichtrostendem Stahl (Innendurchmesser  $(7,5 \pm 2,5)$  mm)

b) rohrförmiger Druckmesskopf

1 Rohr aus nichtrostendem Stahl

2 verschweißtes Ende

3 Bohrungen von 1,2 mm Durchmesser

Abbildung 4.6: Aufbau der Druckmessköpfe nach [2]

Der Probekörper wurde in einen genormten Rahmen aus Stahlbeton eingebaut. Der Betonrahmen wird mittels Klemmen an die Vorderfront des Prüfofens befestigt und wird zusätzlich von einem Kran während des gesamten Versuchs getragen.

## 4.2 Gipsdielen für die Untersuchungen (Proben)

Es wurden Vollgipsdielen der Firma Rigips mit einer Dicke von 10 cm verwendet. Die Gipsdielen wurden werksmäßig aus Calciumsulfat und Wasser hergestellt und beinhalten Fasern und Zuschlagstoffe. Die wichtigsten Parameter des Produktdatenblatt der Alba® Vollgipsplatten (nach SN EN 12859) sind in den Abbildungen 4.7 und 4.8 dargestellt.



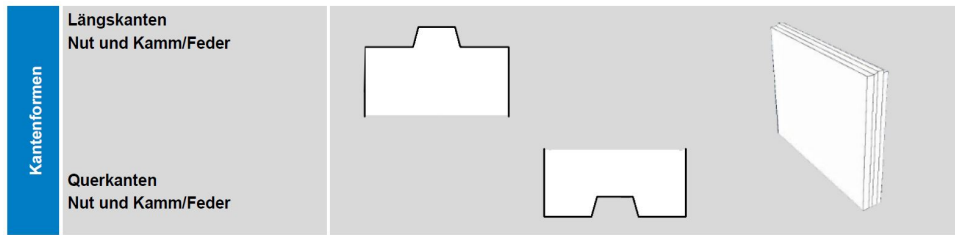


Abbildung 4.7: Kantenformen aus den Datenblatt

<b>Gewicht</b>	<b>Rohdichte</b>		ca. 1000	kg/m <sup>3</sup>
	<b>Flächengewicht</b>		ca. 100	kg/m <sup>2</sup>
<b>Sonstiges</b>	<b>Kristallin gebundenes Wasser im Gipskern</b>		14 - 18	Massen -%
	<b>Grenzbelastung durch Wärme (Langzeitbelastung)</b>		max. 50	°C
	<b>pH-Wert</b>		6.5 - 10.5	-
<b>Mechanische Eigenschaften</b>	<b>Oberflächenhärte</b>	nach Shore	ca. 60	
	<b>Druckfestigkeit</b>		8.4 - 9.0	N/mm <sup>2</sup>
	<b>Scherfestigkeit</b>		1.3 - 1.4	N/mm <sup>2</sup>
<b>Wärme</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></b>	nach EN ISO 10456	ca. 0.34	W/(m·K)
	<b>Dampfdiffusionswiderstand</b>	nach EN 12524	5 - 10	$\mu$

Abbildung 4.8: Vom Hersteller angegebene technische Daten

Der Probekörper wurde an der Front des PS4 Ofens angebracht, wie in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Abmessungen des Probekörpers betragen 1,2 x 1,2 m. Gehalten wird der Probekörper von einem Betonrahmen, welcher mit Klemmen am Ofen befestigt ist. Der montierte Probekörper vor Versuchsbeginn ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Der Abstand vom Probekörper zu den Ofenthermoelementen ist laut Prüfnorm 10 cm.

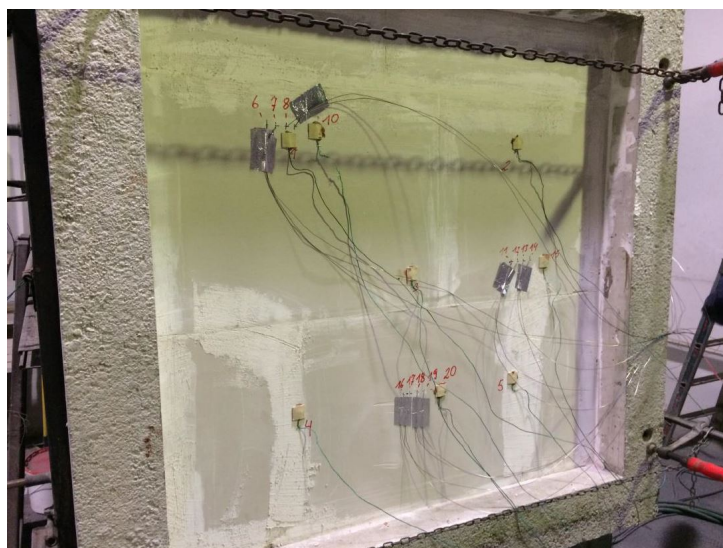


Abbildung 4.9: Probekörper bestehend aus Vollgipsdielen mit 10 cm Dicke.

## Thermoelemente auf der unbeflammten Seite nach EN-1363

Die Temperatur auf der unbeflammten Seite des Probekörpers muss mit Scheiben- Thermoelementen des in Abbildung 4.10 dargestellten Typs gemessen werden. Damit sich ein guter thermischer Kontakt ergibt, sind die Drähte des Thermoelements vom Typ K, wie in EN 60584-1 [13] festgelegt, mit einem Durchmesser von 0,5 mm (mit in EN 60584-2 festgelegten Grenzabweichungen) auf eine Kupferscheibe mit einer Dicke von 0,2 mm und einem Durchmesser von 12 mm aufzulöten. Es ist auch zulässig, Thermoelemente zu verwenden, deren Enden verdreht und anschließend auf die Kupferscheibe aufgelötet wurden.

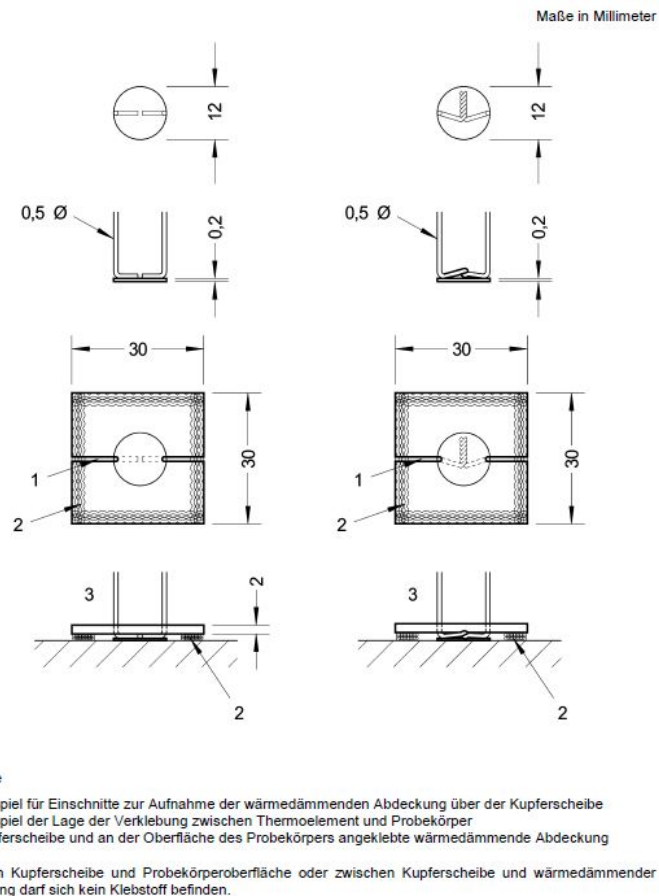


Abbildung 4.10: Beispiele für Messstellen eines Scheiben-Thermoelemente und eine wärmedämmende Abdeckung [2].

Jedes Thermoelement muss mit einer wärmedämmenden Abdeckung auf Silikatfaserbasis, die der Klasse A1 oder A2 nach EN 13501-1 [16] entspricht, mit den Maßen  $(30 \pm 2)$  mm  $\times$   $(30 \pm 2)$  mm  $\times$   $(2,0 \pm 0,5)$  mm bedeckt sein. Der Werkstoff der Abdeckung muss eine Dichte von  $(900 \pm 100)$  kg/m<sup>3</sup> aufweisen, sofern es in den einschlägigen Prüfnormen nicht anders festgelegt ist. Die wärmedämmenden Abdeckungen müssen zur Anpassung an die Drähte des Thermoelements eingeschnitten werden. Werden die Drähte des Thermoelements, wie in Abbildung 4.10 dargestellt, einzeln an die Scheibe angelötet, dürfen die Einschnitte von den gegenüberliegenden Ecken der wärmedämmenden Abdeckung oder von der Mitte der gegenüberliegenden Kanten ausgehen [2].

## Thermoelemente im inneren der Gipsdielen nach EN-1363

Falls Angaben über die Innentemperatur eines Probekörpers oder eines bestimmten Teils des Probekörpers benötigt werden, müssen sie mit Thermoelementen erzielt werden, die Kennwerte haben, die dem zu messenden Temperaturbereich angemessen und für die Baustoffarten im Probekörper geeignet sind.

Thermoelemente für die Messung von Temperaturen in Hohlräumen von Probekörpern oder der Temperaturen innerhalb von Baustoffen wie Beton, Stahl, Holz usw. sollten aus doppelt mit Glasfaser isoliertem blanken Draht mit einem Drahtdurchmesser von 0,5 mm und einer als Quetsch- oder Schweißverbindung ausgeführten Messstelle bestehen. Die Drähte sollten möglichst bis in die Nähe der Messstelle isoliert sein. Alle blanken Drähte sollten voneinander möglichst großen Abstand haben, um elektrolytische Wirkungen auf ein Minimum zu beschränken. Sie sollten nur einmal verwendet werden. Falls es unwahrscheinlich ist, dass die zu messenden Innentemperaturen 400 °C übersteigen, dürfen Kupfer-/Konstantan-Messstellen verwendet werden; falls höhere Temperaturen erwartet werden, sollten Messstellen vom Typ K (Chromel/Alumel) verwendet werden [2].

## Thermoelemente zur Messung der Umgebungstemperatur nach EN-1363

Zur Messung der Umgebungstemperatur innerhalb des Prüflaboratoriums, unweit des Probekörpers, ist ein Thermoelement zu benutzen, das die Temperatur vor und während der Prüfung misst. Dieses Thermoelement muss eine Nenndicke von 3 mm haben, eine mineralische Wärmedämmung und eine rostfreie Stahlmantelung des Typs K nach EN 60584-1 mit Grenzabweichungen nach EN 60584-2 aufweisen. Die Messstelle muss mit einer Vorrichtung wie in Abbildung 4.11 dargestellt vor Strahlungswärme und Zugluft geschützt werden [2].

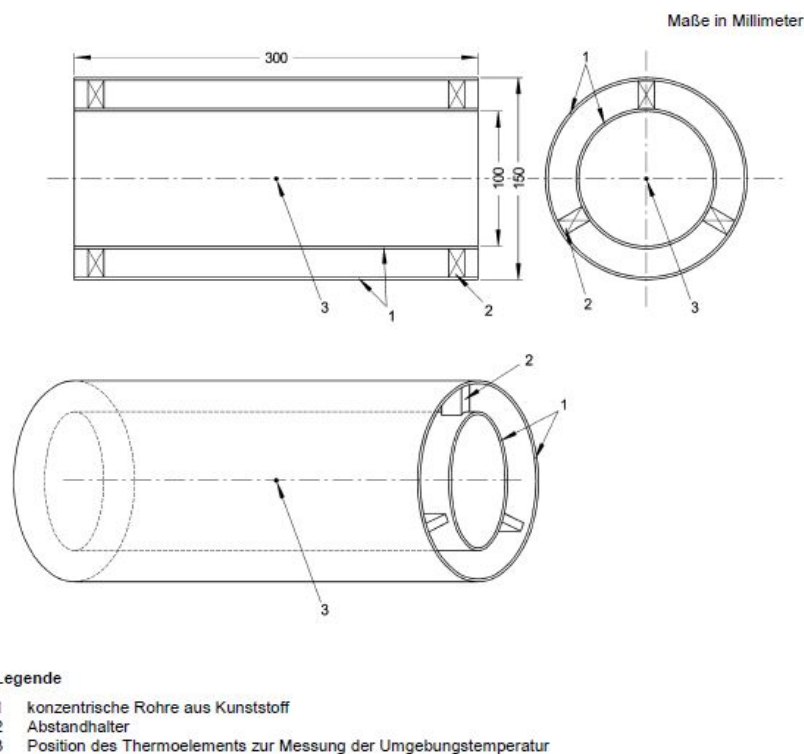


Abbildung 4.11: Messvorrichtung für die Umgebungstemperatur [2]

In den Probekörper wurden Thermoelemente in verschiedenen Tiefen eingebohrt sowie

auf die Außenwand aufgeklebt. Die Bohrungen für die Messsonden wurden in einem Abstand von jeweils 2 cm gebohrt. In Abbildung 4.12 ist die Position der Thermoelemente am Probekörper dargestellt. An der Außenwand wurden 8 Thermoelemente angebracht (P01-P05, P10, P15, P20). Die Thermoelemente in unterschiedlichen Tiefen im Gips sind an jeweils drei Stellen angeordnet. Bei 8 cm handelt es sich um die Thermoelemente (P06, P11, P16), bei 6 cm (P07, P12, P17), bei 4 cm (P08, P13, P18) und bei 2 cm um (P09, P14, P19).

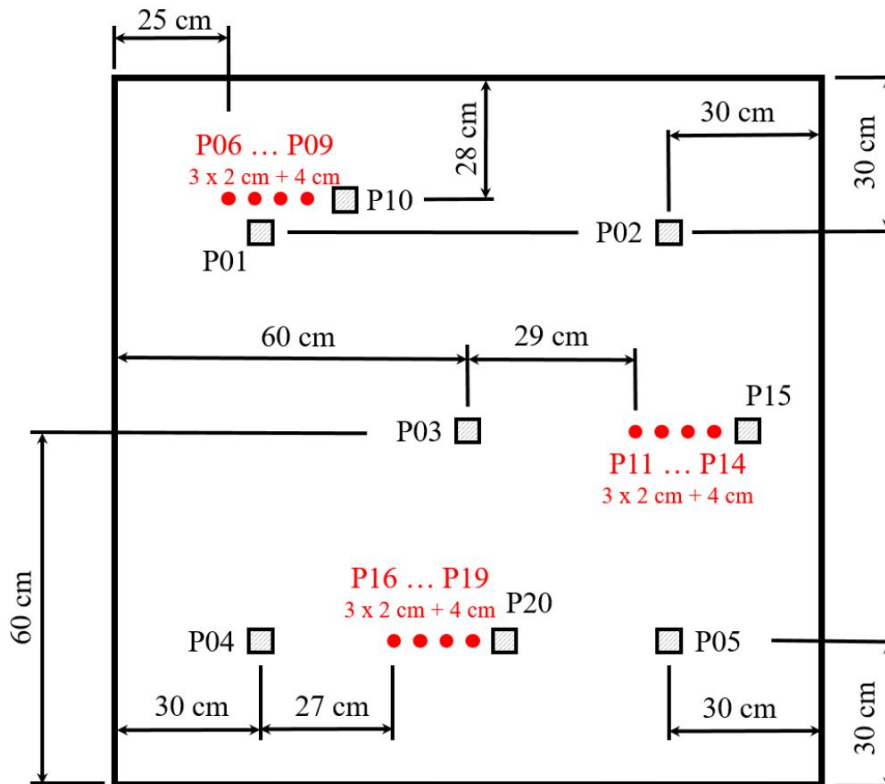


Abbildung 4.12: Hier ist die Position der Thermoelemente dargestellt. Die drei Thermoelemente in 2 cm, 4 cm, 6 cm und 8 cm Tiefe sind in rot dargestellt [14].

Die Auswertelektronik konnte von den Standard Prüfungen, die in der Prüfhalle täglich durchgeführt werden übernommen werden. Somit ist sie sehr bewährt und die Fehleranfälligkeit wird minimiert.

## 4.3 Ergebnisse und Interpretation

### 4.3.1 Versuchsablauf

Der Versuch beginnt mit dem Starten der Brenner und dem damit verbundenen Aufheizvorgang. Die Regelung der Temperatur ist automatisch und folgt dem Verlauf der ETK.

Die zugeführte Menge an flüssigem Brennstoff (Öl) wurde mittels Klappenstellung geregelt. Dabei entspricht die Klappenstellung von 0 % einem Durchsatz von 10 kg/h Brennstoff pro Brenner. Eine Klappenstellung von 100 % bedeutet einen Durchsatz von ca. 20 kg/h pro Brenner. Es kann ein linearer Verlauf angenommen werden. Daraus kann auf den Durchsatz an Brennstoff während des Versuchs geschlossen werden. Dabei ist zu erwähnen, dass ab Minute 14 die Klappenstellung leicht reduziert wurde, da eine Schiefelage der

Temperatur festgestellt wurde. Des Weiteren wurde ab Minute 54 die Klappenstellung des linken Brenners leicht erhöht.

Zeit [min]	Stellung Klappe [%]	Durchsatz [kg/h]
0-12	0	10
12-14	25	12,5
14-120	50	15

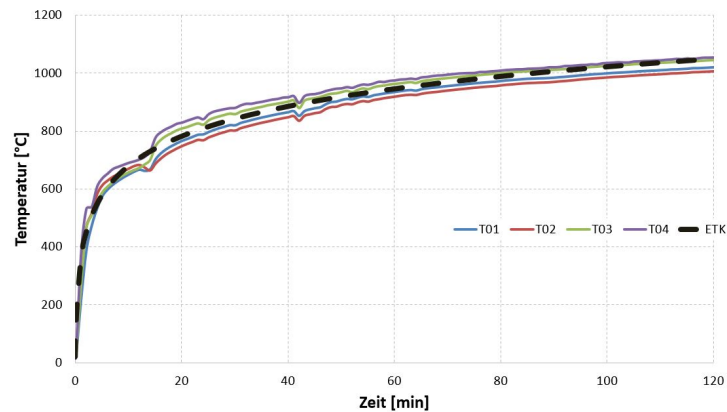


Abbildung 4.13: Gemessene Temperaturen im Ofen und die zu erreichende ETK.

Der Überdruck im Ofen soll laut Norm an der Messstelle etwa 20 Pa betragen und wird über die Rauchgasabsaugung gesteuert. Der Versuch dauert 7200 s. Nach der Prüfung wird der Probekörper vom Ofen abgenommen und neben diesem zur Abkühlung abgestellt. Die zeitliche Auflösung der Messdaten beträgt 60 s.

### 4.3.2 Messergebnisse und Interpretation

Wie bereits erwähnt wurde, setzt Gips bei der Erwärmung das im Gips gebundene Kristallwasser frei. Hat sich das Wasser aus dem Gitter herausgelöst und ist verdampft, kann es sich in der Struktur bewegen. Der Widerstand, den der poröse Werkstoff der Fluidbewegung entgegensetzt, muss überwunden werden. Da im Ofen ein Überdruck gegenüber der Umgebung herrscht, wird durch Diffusion Wasserdampf an die Oberfläche transportiert. An undichten Stellen tritt eine größere Menge an Wasserdampf aus. Abbildung 4.14 veranschaulicht, wie der freigewordene Dampf aus der Fuge zwischen den Gipsdielen und der Grenzfläche zum Rahmen austritt. Die dunkleren Stellen am Rahmen weisen auf eine Kondensation des Dampfes nach dem Austritt hin.



Abbildung 4.14: Dampfaustritt aus dem Probekörper in die Umgebung

In Abbildung 4.15 ist die Innenseite des Probekörpers nach dem abgeschlossenen Versuch dargestellt. Der etwas dunklere Teil im unteren Bereich ist der Rahmen, die helleren Flächen gehören zum Probekörper aus Gips, wo eine Vielzahl an Rissen zu erkennen ist. Der Grund dafür ist das bereits erwähnte Schrumpfen des Werkstoffes, der aus den Dichtemessungen kleiner Gipsproben schon ersichtlich wurde. Die Abnahme des Volumens passiert nur in den Zonen, die bereits eine bestimmte Temperatur erreicht haben, in diesem Fall an der Innenseite. Etwas tiefer in der Platte bleibt das Volumen vorübergehend gleich und wirkt dem Schrumpfen der wärmeren Schichten entgegen. Dieser Vorgang erzeugt Spannungen im Werkstoff und führt in weiterer Folge zu Rissen. Die Abspaltung und anschließende Verdampfung des Wassers führt auch zu einem Druckanstieg in den Poren, da das Volumen beim Verdampfen stark zunimmt. So kommt es zu einer Rissbildung und das Gefüge wird lokal gesprengt. Diese Risse öffnen die Struktur. Dem durch die Dehydration frei gewordenen Wasserdampf wird die Bewegung in diesem Bereich erleichtert. Er kann austreten und Wechselwirkungen mit der Gasphase (z.B. Abkühlung) im Brennraum hervorrufen. Die zerklüftete Oberfläche bietet mehr Fläche für die Wärmeübertragung und ermöglicht ein Eindringen des Rauchgases in tiefer gelegene Zonen. Der Wärmeübergang an der Platteninnenseite wird dadurch wesentlich verbessert, wodurch sich der Wärmestrom in den Probekörper vergrößert. Schon aufgrund der zu beobachtenden Veränderungen in der Struktur wird klar, dass bei der Simulation des Wärmetransportes einige Annahmen getroffen werden müssen, die die reale Situation vereinfachen.



Abbildung 4.15: Risse an der Probekörper-Innenseite.

Der Aufheizvorgang macht sich bei ca. 120 s in 8 cm Tiefe, wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist, bemerkbar. Dieser ist anfänglich sehr steil, danach werden die Temperaturkurven bei ca. 480 s flacher. Auffällig sind hier zwei Bereiche mit annähernd linearem Kurvenverlauf, aber unterschiedlicher Steigung. Der erste Bereich beginnt ca. bei 780 s und reicht bis ca. 1560 s. Der zweite schließt an den ersten an und endet bei ca. 2280 s. Die unterschiedlichen Steigungen deuten auf die beiden Teilreaktionen hin, die bei der Dehydratation ablaufen. Danach steigen die Kurven wieder steil an und flachen ab 3600 s leicht ab. Es treten keine weiteren Auffälligkeiten ein. Die Verläufe in 6 cm Tiefe wirken ähnlich wie jene in 8 cm Tiefe. Die Temperaturgradienten sind in 6 cm Tiefe kleiner und die Kurven sind zeitlich gestreckt, d.h. der Bereich von 0 bis 7200 s ist der Zeitspanne von 0 bis ca. 2600 s in 8 cm Tiefe ähnlich. Die zwei zuvor erwähnten Bereiche sind bei diesen Messdaten besser zu erkennen. Auch die Messdaten in 4 cm Tiefe weisen eine Ähnlichkeit zu denen in 8 cm und vor allem zu denen in 6 cm Tiefe auf, jedoch sind wieder geringere Gradienten in der Temperatur und ein deutlich stärker zeitlich gestreckter Verlauf zu erkennen. Der Temperaturbereich von 0 bis 7200 s korreliert bezüglich der Kurvenform mit dem Bereich von 0 bis 3600 s in der Tiefe von 6 cm. Am Ende der Versuchszeit ist die Temperatur annähernd konstant, es gibt also keinen Temperaturanstieg mehr. In den Tiefen 2 und 0 cm (0 cm = Außenseite des Probekörpers) ergibt sich wieder dieselbe Kurvenform wie in den anderen Tiefen mit dem Unterschied, dass die Temperaturanstiege und die Temperaturniveaus am Ende der Versuchszeit geringer sind.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Messdaten in unterschiedlichen Tiefen ähnliche Kurvenformen und Tendenzen zeigen. Die physikalischen Effekte, die dieses Verhalten von Gips hervorrufen, kommen in allen Tiefen zum Tragen. In geringeren Tiefen führen sie zu zeitlich gestreckten Verläufen. Aus den gemessenen Temperaturen des Gips-Probekörpers geht hervor, dass das Verhalten von Gips maßgeblich durch dessen Wasseranteil bestimmt ist, da dieser zu einem Dampftransport sowie zum Phasenwechsel von Wasser führt. Man kann in Abbildung 4.16 deutlich erkennen, dass es jeweils bei 100 Grad Celsius absolute Temperatur (um die Raumtemperatur von etwa 22 °C erhöhte Temperatur) eine Haltelinie gibt. Dies ist auf die Verdampfung von Wasser zurückzuführen. Weiters sieht man, dass es zu einer sehr raschen Erwärmung kommt, vor allem in den dem Feuer zugewandten Bereich des Gipses. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der entstehende Wasserdampf bei der Erhitzung von Gips in kühlere Gebiete diffundiert und dort die Struktur lokal erhitzt. Bei den Messstellen an der Umgebungsseite sieht man, dass die 100 °C nicht ganz erreicht werden aufgrund des Wärmeverlustes an die Umgebung. Dieses Verhalten sollte nun in

einer Simulation nachgebildet werden.

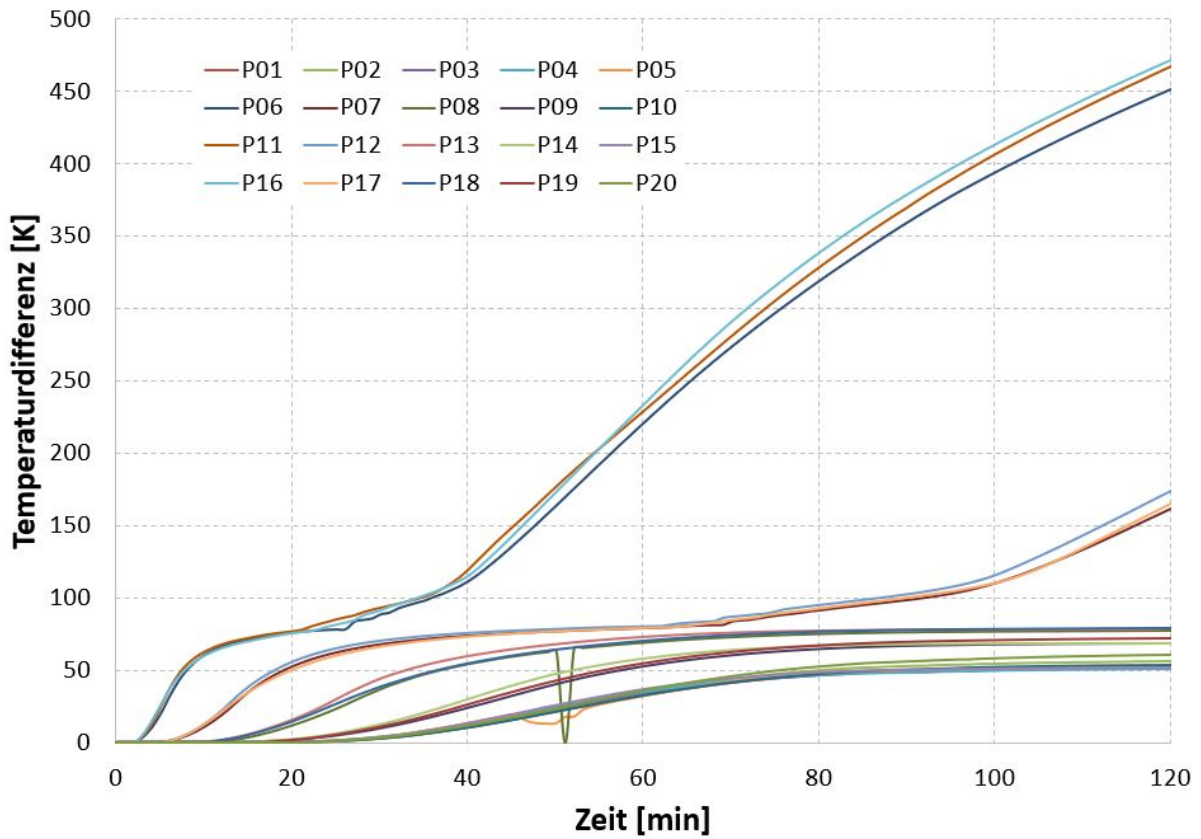


Abbildung 4.16: Gemessene Temperaturen im Probekörper in den verschiedenen Tiefen. In jeder Tiefe sind vier Temperatursonden. Von links nach rechts sieht man die Temperaturverläufe in 8/6/4/2/0 cm Tiefe von der umgebungsseitigen Oberfläche aus betrachtet.



# Kapitel 5

## Computational Fluid Dynamics (CFD)

Die numerische Strömungsmechanik, allgemein bekannt unter der Abkürzung CFD (computational fluid dynamics), wächst sehr schnell. Es gibt auf dem Markt einige Software-Pakete zur Lösung von Strömungsproblemen. In dieser Masterarbeit wurde das Programm ANSYS-Fluent für alle Simulationen verwendet. Dieses Programm sowie die meisten CFD Solver basieren auf der Finite Volume Methode (FVM) [17] [18].

### 5.1 Grundlagen

Fluide sind Substanzen, deren Molekularstruktur der Wirkung äußerer Scherkräfte keinen statischen Widerstand leisten: auch die kleinste Kraft bewirkt eine Deformation des Fluids. Obwohl große Unterschiede zwischen Flüssigkeiten und Gasen bestehen, unterliegen beide Fluidarten ähnlichen Bewegungsgesetzen. Für die meisten praktischen Anwendungen kann ein Fluid als Kontinuum angenommen werden, also eine hypothetische, kontinuierliche Substanz.

Die Bewegung des Fluids (Strömung) wird durch die Wirkung äußerer Kräfte verursacht. Die üblichen Ursachen der Strömung sind: Druckunterschiede, Gravitation, Scherung, Rotation und Oberflächenspannungen.

Während sich alle Fluide unter der Einwirkung von Kräften ähnlich verhalten, unterscheiden sich ihre makroskopischen Eigenschaften erheblich. Fluideigenschaften sind Funktionen anderer thermodynamischer Größen (z. B. Temperatur und Druck), welche für gewöhnlich auf experimentelle Weise bestimmt werden.

Die Geschwindigkeit einer Strömung beeinflusst deren Eigenschaften auf vielfältige Weise. Bei ausreichend niedrigen Geschwindigkeiten haben alle Fluidteilchen noch geordnete Bahnen und die Strömung wird als laminar bezeichnet. Dies trifft auf unseren Fall zu, daher werden wir hier nicht weiter auf die turbulenten Strömungen eingehen. Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt die Mach-Zahl dar, welche das Verhältnis zwischen Strömungsgeschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit im Fluid angibt. Die Mach-Zahl entscheidet, ob der Austausch zwischen der kinetischen Energie der Bewegung und der internen Freiheitsgrade berücksichtigt werden muss. Für unseren Fall befinden wir uns im Bereich von kleinen Mach-Zahlen, für welche die Strömung als inkompressibel angenommen werden kann.

Viele andere Phänomene beeinflussen die Strömung von Fluiden. Temperatur- und Konzentrationsunterschiede können die Strömung ganz wesentlich beeinflussen oder sogar die eigentliche Ursache der Strömung sein. Phasenübergänge (Sieden, Kondensation, Schmelzen und Erstarren) führen, wenn sie auftreten, immer zu wichtigen Veränderungen der

Strömung und rufen Mehrphasenströmungen hervor [17].

## 5.2 Erhaltungsprinzipien

Die Erhaltungssätze können hergeleitet werden, indem man eine gegebene Menge Materie (Kontrollmasse) und ihre extensiven Eigenschaften, wie Masse, Impuls und Energie, betrachtet. Bei einer Fluidströmung ist es jedoch schwierig, eine festgelegte Fluidmenge zu verfolgen. Es ist leichter, die Strömung in einem vorgegebenen Raum (Kontrollvolumen) zu untersuchen. Dabei werden die intensiven Eigenschaften als Grundvariablen verwendet, wie zum Beispiel die Dichte  $\rho$  und die Geschwindigkeit  $\vec{v}$ .

Wenn  $\phi$  eine beliebige intensive Erhaltungseigenschaft darstellt (für die Massenerhaltung:  $\phi = 1$ ; für die Impulserhaltung:  $\phi = \vec{v}$ ), dann kann die entsprechende extensive Eigenschaft  $\Phi$  folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\Phi = \int_{V_{KM}} \rho \phi dV, \quad (5.1)$$

wobei  $V_{KM}$  für das Volumen steht, welches die Kontrollmasse einnimmt. Mit dieser Definition kann die linke Seite einer jeden Erhaltungsgleichung für ein Kontrollvolumen so geschrieben werden:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{KM}} \rho \phi dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_{KV}} \rho \phi dV + \int_{S_{KV}} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS, \quad (5.2)$$

wobei  $V_{KV}$  das KV-Volumen ist,  $S_{KV}$  ist die Oberfläche des KV,  $\vec{n}$  ist der nach außen gerichtete Einheitsvektor senkrecht auf  $S_{KV}$  und  $\vec{v}$  ist die Fluidgeschwindigkeit. Diese Gleichung besagt: Die Änderungsrate der Menge der extensiven Eigenschaften in der Kontrollmasse  $\Phi$  ist gleich der Änderungsrate der Menge dieser Eigenschaften im Kontrollvolumen plus ihrem Nettofluss durch die KV-Oberfläche, hervorgerufen durch die Fluidbewegung relativ zu KV-Oberfläche. Der letzte Term wird normalerweise als konvektiver Fluss von  $\phi$  durch die KV-Oberfläche bezeichnet [17].

## 5.3 Erhaltungsgleichung für skalare Größen

Die Integralform der Gleichung, welche die Erhaltung einer skalaren Größe  $\phi$  beschreibt lautet:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_{KV}} \rho \phi dV + \int_{S_{KV}} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \sum f_\phi, \quad (5.3)$$

wobei  $f_\phi$  der Transport von  $\phi$  durch alle Mechanismen außer Konvektion sowie jegliche Quellen oder Senken des Skalars darstellt. Diffusiver Transport ist immer vorhanden (auch in ruhenden Fluiden) und wird meistens mit der Gradienten-Approximation beschrieben, wie z. B. dem Fourier-Gesetz zur Wärmediffusion bzw. dem Fick-Gesetz zu Massendiffusion:

$$f_\phi^d = \int_{S_{KV}} \Gamma \nabla \rho \phi \cdot \vec{n} dS, \quad (5.4)$$

wobei  $\Gamma$  den Diffusionskoeffizienten für die Größe  $\phi$  darstellt. Nun definieren wir eine allgemein gültige Form der Erhaltungsgleichung. Die Integralform der generischen Erhaltungsgleichung folgt unmittelbar aus (5.3) und (5.4):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_{KV}} \rho \phi dV + \int_{S_{KV}} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_{S_{KV}} \Gamma \nabla \rho \phi \cdot \vec{n} dS + \int_{S_{KV}} q_\phi dV, \quad (5.5)$$

wobei  $q_\phi$  Quellen oder Senken von  $\phi$  bezeichnet [17].

## 5.4 Komponenten einer numerischen Lösungsmethode

Hier wird ein grober Überblick über die wichtigsten Bestandteile einer numerischen Lösungsmethode präsentiert. Die Anwendung auf unser Problem wird in dem folgenden Kapitel gegeben [17].

### 5.4.1 Mathematisches Modell

Der Anfangspunkt einer jeden numerischen Methode ist das mathematische Modell, d. h. ein System von partiellen Differential- oder Integro-Differentialgleichungen und die dazugehörigen Randbedingungen. Man erstellt ein passendes Modell für den vorliegenden Fall (inkompressible, nicht-viskos, usw.) [17].

### 5.4.2 Diskretisierungsmethode

Nach Auswahl des mathematischen Modells muss man eine geeignete Diskretisierungsmethode wählen, d. h. eine Methode zur Approximation der Differentialgleichungen durch ein System algebraischer Gleichungen für die Variablen an einem Satz von diskreten Stellen in Raum und Zeit [17].

### 5.4.3 Numerisches Gitter

Die diskreten Punkte, in denen die Variablen berechnet werden sollen, werden durch ein numerisches Gitter definiert, das im Wesentlichen eine diskrete Darstellung des geometrischen Gebietes ist, in dem das Problem gelöst werden soll. Es unterteilt das Lösungsgebiet in eine finite Anzahl kleiner Teilgebiete (Kontrollvolumina bei FV-Methode) [17].

### 5.4.4 Finite Approximation

In der Finite-Volume-Methode müssen Approximationen für Flächen- und Volumsintegrale, Gradienten und Interpolationen zwischen den Stützstellen ausgesucht werden [17].

### 5.4.5 Lösungsmethode

Die Diskretisierung gibt ein großes, nichtlineares algebraisches Gleichungssystem. Die Lösungsmethode hängt vom Problem ab. Für instationäre Strömungen benutzt man Verfahren, die auf Methoden für Anfangswertprobleme bei den gewöhnlichen Differentialgleichungen (Fortschreiten in der Zeit) basieren. Diese Methoden verwenden eine sukzessive Linearisierung der Gleichungen und das daraus resultierende lineare Gleichungssystem wird fast immer mit iterativen Techniken gelöst. Die Wahl des Lösers hängt vom Gittertyp und der Knotenanzahl, die jede algebraische Gleichung umfasst, ab [17].

### 5.4.6 Konvergenzkriterium

Schließlich müssen die Konvergenzkriterien für die iterativen Methoden festgelegt werden. Normalerweise gibt es zwei Iterationsebenen: innere Iterationen, in denen die linearen Gleichungssysteme gelöst werden, und äußere Iterationen, mit denen die Nichtlinearität und die Kopplung der Gleichungen erfasst werden. Die Entscheidung, wann der Iterationsprozess auf jeder Ebene gestoppt werden soll, ist sowohl hinsichtlich der Genauigkeit als auch der Effizienz wichtig [17].

## 5.5 Finite-Volumen-Methode

Die Diskretisierungsmethode, welche verwendet wurde, ist die Finite-Volume-Methode (FV-Methode). Sie verwendet die Integralform der Erhaltungsgleichungen als Ausgangspunkt so wie wir sie im vorherigen Abschnitt gesehen haben (5.5). Das Lösungsgebiet wird in eine finite Anzahl nicht überlappender Kontrollvolumina (KVs) unterteilt und die Erhaltungsgleichungen werden auf jedes KV angewendet. Im Schwerpunkt eines jeden KV liegt der Rechenknoten, in dem die Variablenwerte berechnet werden. Interpolation wird verwendet, um die Variablenwerte auf die KV-Oberfläche mittels der Knotenwerte (KV-Zentrum) auszudrücken. Oberflächen- und Volumsintegrale werden unter Verwendung passender Quadraturformeln approximiert. Als Ergebnis erhält man für jedes KV eine algebraische Gleichung, in der die Variablenwerte aus dem eigenen Rechenknoten sowie aus einigen Nachbar-KVs vorkommen.

Die FV-Methode kann bei jedem Gittertyp angewendet werden, weshalb sie auch für komplexe Geometrien geeignet ist. Das Gitter bestimmt nur die Oberflächen der KVs und muss nicht auf das Koordinatensystem bezogen werden [17].

### 5.5.1 Approximation von Flächenintegralen

Der Nettofluss durch den KV-Rand ist gleich der Summe der Integrale über die KV-Seiten:

$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS, \quad (5.6)$$

wobei  $f$  die Komponenten des konvektiven ( $\rho\phi\vec{v}\cdot\vec{n}$ ) oder des diffusiven ( $\Gamma\nabla\phi\cdot\vec{n}$ ) Flussvektors in Richtung normal zur KV-Seite bezeichnen.

Um das Flächenintegral in (5.6) exakt berechnen zu können, müsste man den Integranden  $f$  überall auf der Oberflächen  $S_i$  kennen. Jedoch wird nur der Knotenwert berechnet, weshalb Approximationen notwendig sind. Zu diesem Zweck werden üblicherweise Approximationen auf drei Ebenen eingeführt.

- Das Integral über die KV-Seite wird als Funktion der Variablen an einer oder mehreren Stellen innerhalb der KV-Seite - den sog. Integrationspunkten - approximiert.
- Die Variablenwerte in den Integrationspunkten an einer KV-Seite werden als Funktion der Knotenwerte approximiert, d. h. durch Interpolation.
- Die Ableitung der Variablen in den Integrationspunkten werden durch finite Differenzen approximiert.

Die einfachste Approximation des Integrals ist durch die Mittelpunktsregel gegeben: das Integral wird als Produkt aus dem Integranden im Schwerpunkt der KV-Seite  $f_e$  und der Fläche der KV-Seite approximiert:

$$F_e = \int_{S_e} f dS \approx f_e S_e. \quad (5.7)$$



Der Punkt P und seine Nachbarpunkte formen den sog. Rechenstern 5.2. Die Koeffizienten  $A_i$  hängen von den geometrischen Größen, den Fluideigenschaften und, bei nichtlinearen Gleichungen, von den Variablenwerten selbst ab.  $Q_P$  beinhaltet alle Terme, die keine unbekannt Variablenwerte beinhalten und wird als bekannt angenommen.

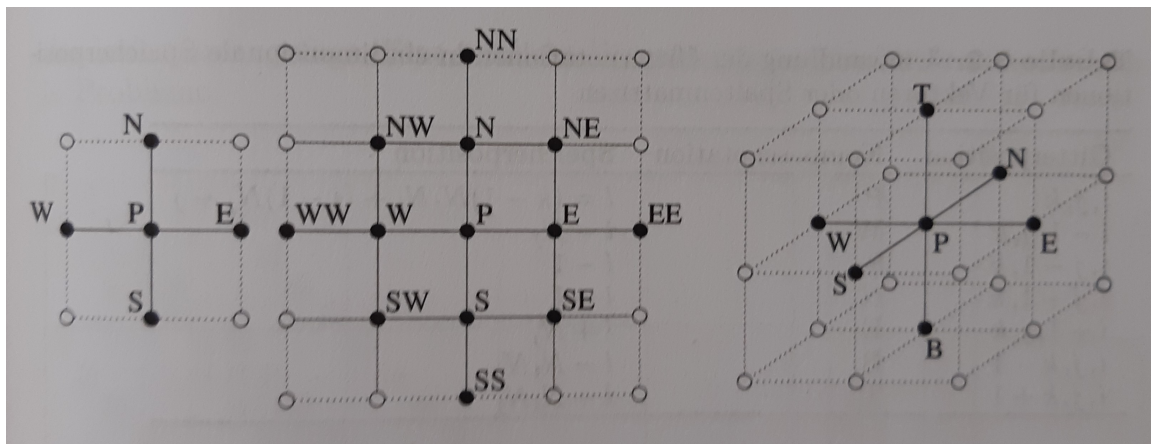


Abbildung 5.2: Beispiele für Rechensterne in 2D und 3D [17].

Die Anzahl der Gleichungen und Unbekannten muss gleich sein, d. h. es muss für jeden Gitterpunkt eine Gleichung geben. Damit hat man einen großen Satz linearer algebraischer Gleichungen, der numerisch gelöst werden muss. Das System kann folgendermaßen in Matrix-Notation geschrieben werden:

$$\mathbf{A}\vec{\phi} = \vec{Q}. \quad (5.10)$$

Hier ist  $\mathbf{A}$  eine dünn besetzte, quadratische Koeffizientenmatrix,  $\vec{\phi}$  ist ein Vektor mit den Variablenwerten in den Gitterpunkten, und  $\vec{Q}$  ist der Vektor, der die Terme auf der rechten Seite von Gleichung (5.2) enthält [17].

### 5.5.4 Lösung linearer Gleichungssysteme

Das Ergebnis des Diskretisierungsprozesses ist ein System algebraischer Gleichungen, die entsprechend der Natur der partiellen Differentialgleichungen, von denen sie abgeleitet wurden, linear oder nichtlinear sind. Im nichtlinearen Fall müssen die Diskretisierungsgleichungen mit einer iterativen Technik gelöst werden, die eine Abschätzung der Lösung, Linearisierung der Gleichungen um diese Lösung und Verbesserung der Lösung umfasst; der gesamte Prozess wird wiederholt, bis ein konvergiertes Ergebnis erhalten wird. Auch für lineare Gleichungssysteme werden oft iterative Verfahren verwendet, da sie geringere Rechenkosten aufweisen als zum Beispiel das Gauß-Eliminationsverfahren [17].

#### Iterative Methode

Bei einer iterativen Methode startet man mit einer abgeschätzten Lösung und nutzt die Gleichung, um die Lösung systematisch zu verbessern. Ist jede Iteration billig und deren Anzahl gering, kann man eine ausreichend genaue Lösung mit einem geringeren Aufwand erhalten, als bei der Verwendung einer direkten Lösungsmethode. Es wird das durch Gleichung (5.10) gegebene Matrixproblem betrachtet, dass sich aus einer FD- oder FV-Approximation eines Strömungsproblems ergibt. Nach  $n$  Iterationen hat man eine Näherungslösung  $\phi^n$ , die diese Gleichung nicht exakt erfüllt. Stattdessen gibt es einen Rest  $\rho^n$ , der ungleich null ist:

$$\mathbf{A}\vec{\phi}^n = \vec{Q} - \vec{\rho}^n. \quad (5.11)$$

Subtrahiert man diese Gleichung von Gl. (5.10), erhält man eine Beziehung zwischen dem Iterationsfehler, der wie folgt definiert ist

$$\vec{\epsilon}^n = \vec{\phi} - \vec{\phi}^n, \quad (5.12)$$

und dem Residuum

$$\mathbf{A}\vec{\epsilon}^n = \vec{\rho}^n. \quad (5.13)$$

Hier stellt  $\phi$  die exakte Lösung des Gleichungssystems dar. Der Sinn des Iterationsprozess ist, das Residuum gegen null zu treiben; in diesem Prozess wird  $\epsilon$  ebenfalls gleich null werden [17].

# Kapitel 6

## Modellierung von Gips als poröse Struktur mit Berücksichtigung des Phasenwechsels des ausgasenden Wasserdampfes

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein CFD-Modell des Probekörpers erstellt, um die im Gips auftretenden physikalischen Effekte zu untersuchen. Der Probekörper (Wand aus Gipsdielen) wird als 10 cm dicke Platte dargestellt, welche als poröses Medium modelliert wurde. Dadurch ist es möglich, im Feststoff den freigesetzten Wasserdampf sowie die Diffusion und den Phasenwechsel des Wasserdampfes zu berücksichtigen. Der Phasenwechsel wird mit Hilfe eines Mehrphasenmodells simuliert. In diesem Kapitel wird das verwendete Programm ANSYS Fluent und die Gleichungen, auf denen es beruht, für unser Anwendungsgebiet erläutert. Danach werden die "User Defined Functions" (UDF) beschrieben, welche die speziellen Stoffparameter sowie die Randbedingungen definieren. Am Ende des Kapitels wird das zur Berechnung verwendete Gitter beschrieben sowie die genauen Lösungseinstellungen für dieses Strömungsproblem zusammengefasst.

### 6.1 Allgemeine Erhaltungsgleichungen

Für alle Strömungsprobleme löst ANSYS Fluent die Massenerhaltungsgleichung sowie die Impulserhaltungsgleichung. Wenn der Wärmeübergang oder die Kompressibilität beteiligt ist, wird zusätzlich noch einer Energieerhaltungsgleichung gelöst. Für Strömungen, die Mischungen verschiedener Spezies oder Reaktionen enthalten, werden zusätzlich Spezieserhaltungsgleichungen gelöst. Auch werden für turbulente Strömungen zusätzliche Transportgleichungen angewandt. Hier werden kurz die Erhaltungsgleichungen der Masse, Impuls und Energie für laminare Strömungen im Ruhesystem präsentieren, da diese für die Problemstellung von Bedeutung sind [18].

#### 6.1.1 Massenerhaltung

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, wird die Massenerhaltung aus der allgemeinen Erhaltungsgleichung für skalare Größen (5.5) durch Ersetzen des allgemeinen Skalars  $\phi$  mit 1 gewonnen. Die Massenerhaltung, auch Kontinuitätsgleichung genannt, kann dadurch wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m. \quad (6.1)$$



Diese Gleichung ist die allgemeine Form und kann für inkompressible sowie kompressible Ströme verwendet werden.  $S_m$  ist eine Massenquelle, die zur kontinuierlichen oder dispersiven Phase addiert wird, wie zum Beispiel aus einer Sekundären Phase bei Mehrphasenproblemen oder aus einer "User Defined Source", also einem manuell hinzugefügten Massenquellterm. Der erste Term auf der linken Seite der Gleichung entspricht der zeitlichen Änderung der Masse im Kontrollvolumen. Der zweite Term ist der Konvektive Term und entspricht dem Massentransport über die KV Oberfläche [18].

### 6.1.2 Impulserhaltung

Die Impulserhaltungsgleichung im Inertialsystem ist gegeben durch

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (6.2)$$

wobei  $p$  der statische Druck und  $\bar{\tau}$  der Spannungstensor ist. Auf der linken Seite der Gleichung entspricht der erste Term der zeitlichen Änderung des Impulses im KV, der zweite Term ist der Impulstransport über die KV Oberfläche. Auf der rechten Seite ist der erste Term der lokale Druckgradient, der zweite Term beinhaltet die Reibungskräfte, der dritte Term entspricht der Gravitationskraft und der letzte Term entspricht äußeren Kräften, die auf das KV wirken.  $\vec{F}$  beinhaltet auch modell-basierte Quellterme, die zum Beispiel bei porösen Medien vorkommen.

Der Spannungstensor ist gegeben durch

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right], \quad (6.3)$$

wobei  $\mu$  die Molekulare Viskosität und  $I$  die Einheitsmatrix ist [18].

### 6.1.3 Energieerhaltung

Der Fluss von Wärmeenergie von einer mit Materie besetzten Region im Raum zu einer anderen Region im Raum ist bekannt als Wärmetransport. Die Hauptursachen von Wärmetransport sind drei Phänomene: Leitung, Konvektion und Strahlung. Physikalische Modelle, die Wärmeleitung und Konvektion enthalten, sind die einfachsten, während natürliche Konvektion und Strahlungsmodelle viel komplexer sind. In unseren Fall verwenden wir das einfachste Modell der Wärmeleitung und des konvektiven Wärmetransports [18].

#### Modellierung von Wärmetransport

ANSYS Fluent erlaubt es, Wärmetransport in flüssigen sowie festen Regionen zu modellieren. Wenn im Modell Wärmetransport berücksichtigt wird, müssen auch die relevanten physikalischen Modelle, die thermischen Randbedingungen sowie die Materialeigenschaften, die den Wärmetransport bestimmen und oft von der Temperatur abhängig sind, eingebunden werden.

ANSYS Fluent löst folgende Energieerhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \vec{v}) \right) + S_h, \quad (6.4)$$

wobei  $k_{eff}$  die effektive Leitfähigkeit ( $k + k_t$ , wo  $k_t$  die turbulente thermische Leitfähigkeit ist und durch das Turbulenzmodell bestimmt wird) und  $\vec{J}_j$  ist der Diffusionsstrom für

die verschiedenen Spezies  $j$ . Der erste Term auf der linken Seite entspricht der zeitlichen Änderung der Energie, der zweite ist mit dem konvektiven Energietransport in Verbindung zu bringen. Auf der rechten Seite befindet sich der Term, der die Wärmeleitung beschreibt sowie ein Stoffdiffusionsterm. Im vorletzten Term wird die Reibungsenergie berücksichtigt und der letzte Term ist ein Quellterm für Energie.

In der Gleichung (6.4)

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \quad (6.5)$$

wobei die Enthalpie für ideale Gase gegeben ist durch

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (6.6)$$

und für inkompressible Ströme durch

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}. \quad (6.7)$$

In den Gleichungen (6.6) und (6.7) ist  $Y_j$  der Massenanteil der Spezies  $j$  und die speziesbezogene Enthalpie ist gegeben durch

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT, \quad (6.8)$$

wobei für Druck-basierende Löser ist  $T_{ref} = 289.15K$  [18].

## 6.2 Mehrphasen-Probleme

Eine Vielzahl von Strömungsproblemen in der Natur und der Technik bestehen aus einer Mischung mehrerer Phasen. Physikalische Phasen von Materie sind gasförmig, flüssig oder fest. Es gibt mehrere Kategorien von Mehrphasenströmungen, wir beschränken uns hier auf Dreiphasenströmungen. Es existieren zwei Ansätze, die in ANSYS FLuent implementiert sind; der "Euler-Lagrange Ansatz" und der "Euler-Euler Ansatz". Hier wird der verwendete Euler-Euler Ansatz präsentiert [18].

### 6.2.1 Der Euler-Euler Ansatz

Im Euler-Euler Ansatz werden die verschiedenen Phasen mathematisch als durchdringendes Kontinuum behandelt. Da das Volumen einer Phase nicht von dem Volumen der anderen Phasen besetzt werden kann, wird hier das Konzept des Phasenvolumenanteils eingeführt. Die Volumenbruchteile werden als kontinuierliche Funktionen in Raum und Zeit angenommen und die Summe über alle Phasen ist Eins. Die Erhaltungssätze werden für jede Phase berechnet, wodurch man eine Reihe an Gleichungen erhält, welche dieselbe Struktur für alle Phasen aufweisen. Diese Gruppen von Gleichungen werden durch empirische Informationen in Beziehung gesetzt. Es gibt drei Modelle, die diese Gleichungen in Verbindung bringen. Wir verwenden das Euler Modell [18].

#### Das Euler Modell

Das Euler Modell (Eularian Model) ist das komplexeste aller Mehrphasenmodelle in ANSYS Fluent. Es löst ein Set von  $n$  Impuls- und Kontinuitätsgleichungen für jede Phase. Die Kopplung wird erreicht durch einen Druck und Phasenaustausch-Koeffizienten.

## Zeit Schemata in Mehrphasenströmungen

In vielen Mehrphasen Problemen kann das Phänomen räumlich sowie zeitlich variieren. Aus diesem Grund müssen zur Verbesserung der Genauigkeit von Mehrphasenströmungen, sowohl bei der räumlichen als auch bei der zeitlichen Diskretisierung, höhere Ordnungen angewandt werden. Daher sind zusätzlich zur ersten Ordnung in der transienten Formulierung höhere Ordnungen in Mischungs- sowie Euler Mehrphasenmodellen verfügbar. Das zweite Ordnung Zeitschema ist in allen Transportgleichungen, wie die Impulserhaltung der Phasen, Energieerhaltung, Spezies Transport Gleichungen, Phasen Volumsanteilsgleichungen und Druckkorrekturen, implementiert. In Mehrphasenströmungen sieht eine allgemeine Transportgleichung wie folgt aus

$$\frac{\partial(\alpha\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\vec{V}\phi) = \nabla \cdot \bar{\tau} + S_\phi, \quad (6.9)$$

wobei  $\phi$  eine Phasen Variable,  $\alpha$  der Volumsanteil der Phase,  $\rho$  die Dichte der Phase,  $\vec{V}$  die Geschwindigkeit der Phase,  $\bar{\tau}$  der Diffusionsterm und  $S_\phi$  ein möglicher Quellterm ist. Das präzise zweite Ordnung Zeitschema ist rein implizit und erreicht seine Genauigkeit in ANSYS Fluent durch Verwendung einer Euler Rückwärts Approximation in der Zeit. Die Allgemeine Transportgleichung schreibt sich darin wie folgt

$$\frac{3(\alpha_p\rho_p\phi_p Vol)^{n+1} - 4(\alpha_p\rho_p\phi_p Vol)^n + (\alpha_p\rho_p\phi_p)^{n-1}}{2\Delta t} = \sum [A_{nb}(\phi_{nb} - \phi_p)]^{n+1} + S_U^{n+1} - S_p^{n+1}\phi_p^{n+1}, \quad (6.10)$$

wobei  $n$  für den aktuellen Zeitschritt steht. Diese Gleichung kann in einer einfacheren Form wie folgt geschrieben werden:

$$A_p\phi_p = \sum A_{nb}\phi_{nb} + S_\phi, \quad (6.11)$$

wobei

$$A_p = \sum A_{nb}^{n+1} + S_p^{n+1} + \frac{1.5(\alpha_p\rho_p Vol)^{n+1}}{\Delta t}$$

und

$$S_\phi = S_U^{n+1} + \frac{2(\alpha_p\rho_p\phi_p Vol)^n - 0.5(\alpha_p\rho_p\phi_p Vol)^{n-1}}{\Delta t}$$

ist. Diese Methode ist bedingt stabil, der negative Koeffizient beim Zeitschritt  $t_{n-1}$  von dieser drei Zeitschritt Methode kann Oszillationen produzieren, wenn die Zeit-Schritte zu groß sind [18].

## Stabilität und Konvergenz

Der Prozess zur Lösung von Mehrphasensystemen ist von Natur aus schwer und daher kommt es möglicherweise zu Stabilitäts- oder Konvergenzproblemen.

Für zeitabhängige Lösungen, so wie wir sie verwenden, gibt es folgende Empfehlungen, um die Stabilität der Lösung zu verbessern: Ein gutes Initialisierungsfeld ist erforderlich, um Instabilitäten zu vermeiden, welche meistens von schlechten Initialisierungsbedingungen folgen. Wenn die CPU Zeit ausschlaggebend ist, dann ist die Beste Option "Phase Coupled SIMPLE". Es wird auch empfohlen mit kleinen Zeitschritten zu starten, die vergrößert werden können, wenn nach einigen Zeitschritten eine gute Approximation des Druckfeldes erreicht wurde.

Bei der Berechnung von turbulenten Strömungen kann es helfen, die Option "Non-Iterative Time Advancement" zu verwenden. ANSYS Fluent bietet auch die Möglichkeit eine "Full Multiphase Coupled" Löser zu verwenden, dieser ist jedoch in der momentanen Version noch nicht so robust wie die SIMPLE Version [18].

## 6.2.2 Euler Modell Theorie

Die ANSYS Fluent Lösung für das Euler-Mehrphasenmodell basiert auf folgenden Annahmen, die für uns von Bedeutung sind:

- Alle Phasen teilen sich einen Druck.
- Impulserhaltung sowie Kontinuitätsgleichungen werden für jede Phase gelöst.
- Mehrere Koeffizienten für die Interaktion zwischen den Phasen wie zum Beispiel das Mitziehen einer anderen Phase können auf das zu lösende Problem angepasst werden.

Es gibt noch andere Punkte die sich jedoch zum Beispiel auf Turbulenz Modelle beziehen, die hier nicht angeführt wurden [18].

### Volumensanteils-Gleichung

Die Beschreibung von Mehrphasenströmungen als sich durchdringende Kontinua enthält das Konzept des Phasenvolumensanteils, hier als  $\alpha_q$  bezeichnet. Die Volumensanteil ist der Raum, welcher von jeder Phase besetzt wird. Alle Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls werden von jeder Phase individuell erfüllt.

Das Volumen  $V_q$  einer Phase  $q$  ist gegeben durch

$$V_q = \int_V \alpha_q dV, \quad (6.12)$$

wobei

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (6.13)$$

ist. Die effektive Dichte der Phase  $q$  ist

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q, \quad (6.14)$$

wobei  $\rho_q$  die physikalische Dichte der Phase  $q$  ist. Die Volumensanteilgleichung wird entweder durch implizite oder explizite Zeitdiskretisierung gelöst [18].

### Erhaltungsgleichungen

Die generellen Erhaltungsgleichungen, aus denen die Gleichungen hergeleitet wurden, die von ANSYS Fluent gelöst werden, werden hier präsentiert, gefolgt von denen die gelöst werden.

### Die Gleichungen in ihrer generellen Form

**Massenerhaltung** Die Kontinuitätsgleichung für eine Phase  $q$  ist

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^3 (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q, \quad (6.15)$$

wobei  $\vec{v}_q$  die Geschwindigkeit der Phase  $q$  ist und  $\dot{m}_{pq}$  den Massentransfer von der  $p$ ten zur  $q$ ten Phase charakterisiert beziehungsweise  $\dot{m}_{qp}$  den Massentransfer in die gegengesetzte Richtung. Es ist möglich diese Mechanismen separat zu bestimmen.

Standardmäßig ist der Quellterm  $S_q$  auf der rechten Seite der Gleichung null, aber er kann auch konstant oder über eine UDF für jede Phase definiert werden [18].

**Impulserhaltung** Das Impulsgleichgewicht für die Phase  $q$  ergibt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n \left( \vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) \\ & + \left( \vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{dt,q} \right), \end{aligned} \quad (6.16)$$

wobei  $\bar{\tau}_q$  der Spannungstensor der  $q$ ten Phase ist

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I}. \quad (6.17)$$

In den Gleichungen ist  $\mu_q$  und  $\lambda_q$  die Scher- und Volumviskosität der Phase  $q$ ,  $\vec{F}_q$  sind die äußeren Kräfte,  $\vec{F}_{lift,q}$  sind die Auftriebskräfte,  $\vec{F}_{wl,q}$  sind die Wandbenetzungskräfte,  $\vec{F}_{vm,q}$  virtuellen Massenkräfte und  $\vec{F}_{dt,q}$  turbulenten Dispersionskräfte.  $\vec{R}_{pq}$  sind die Wechselwirkungskräfte zwischen den Phasen und  $p$  ist der Druck, welcher bei allen Phasen gleich ist.

$\vec{v}_{pq}$  ist die Grenzschichtgeschwindigkeit, die wie folgt definiert ist. Wenn  $\dot{m}_{pq} > 0$  (das heißt, dass von der Phase  $p$  Masse zur Phase  $q$  transportiert wird), dann ist  $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$ ; Wenn  $\dot{m}_{pq} < 0$ , dann ist  $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$ . Gleichermaßen gilt für  $\dot{m}_{qp} > 0$ , dass  $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_q$  und  $\dot{m}_{qp} < 0$ , dass  $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p$ .

Die Gleichung (6.16) muss mit passenden Ausdrücken für die Kräfte zwischen den Phasen  $\vec{R}_{pq}$  geschlossen werden. Dies Kräfte hängen von Reibung, Druck, Kohäsion sowie anderen Effekten ab und sind den Bedingungen  $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ ,  $\vec{R}_{qq} = 0$  unterworfen.

ANSYS Fluent verwendet einen einfachen Wechselwirkungsterm

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q), \quad (6.18)$$

wobei  $K_{pq}$  der Impulsaustauschkoeffizient zwischen den Phasen ist und  $\vec{v}_p$ ,  $\vec{v}_q$  die Geschwindigkeiten der jeweiligen Phasen sind [18].

**Energieerhaltung** Um die Energieerhaltung in den Euler-Mehrphasen Anwendungen zu beschreiben wird eine separate Enthalpie Gleichung für jede Phase eingeführt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = & \alpha_q \frac{dp_q}{dt} + \bar{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q \\ & + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}), \end{aligned} \quad (6.19)$$

wobei  $h_q$  die spezifische Enthalpie der  $q$ ten Phase ist,  $\vec{q}_q$  der Wärmestrom,  $S_q$  ein Quellterm, welcher eine mögliche Quelle für die Enthalpie darstellt,  $Q_{pq}$  ist die Intensität des Wärmeaustauschen zwischen den Phasen  $p$  und  $q$  und  $h_{pq}$  ist die Zwischenphasenenthalpie (Zum Beispiel die Enthalpie von Dampf bei der Temperatur der Tropfenbildung während einer Verdampfung). Der Wärmeaustausch zwischen den Phasen muss die lokale Energiebilanz  $Q_{pq} = -Q_{qp}$ ,  $Q_{qq} = 0$  erfüllen [18].

**Die Gleichungen die von ANSYS gelöst werden** Die Gleichungen für Fluid-Fluid Mehrphasenströmungen, wie sie von ANSYS Fluent gelöst werden, sind hier für den generellen Fall von  $n$ -Phasenströmungen präsentiert.

**Kontinuitätsgleichung** Der Volumsanteil jeder Phase wird von der Kontinuitätsgleichung berechnet

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left( \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right), \quad (6.20)$$

wobei  $\rho_{rq}$  Phasenreferenzdichte oder die Volumsdurchschnittsdichte der  $q$ ten Phase in der Lösungsdomain ist.

Die Lösung dieser Gleichung für jede sekundäre Phase, neben der Bedingung das die Summe über die Volumsanteile gleich eins ist, erlaubt die Berechnung des Volumsanteils der primären Phase [18].

**Impulsgleichung** Die Impulserhaltung für die Flüssigkeitsphase  $q$  ist

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + \left( \vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{dt,q} \right). \end{aligned} \quad (6.21)$$

Hier ist  $\vec{g}$  die Erdbeschleunigung und die anderen Parameter sind definiert wie in Gleichung (6.2) [18].

**Energieerhaltung** Die Energieerhaltungsgleichung die von ANSYS gelöst wird ist die Gleichung (6.19) [18].

### Grenzflächenkonzentration

Die Grenzflächenkonzentration ist definiert als die Grenzfläche zwischen zwei Phasen pro Mischungsvolumen. Dies ist ein wichtiger Parameter für die Vorhersage von Massen, Impuls und Energietransfer durch die Grenzfläche zwischen den Phasen. Als Standard verwendet ANSYS Fluent für das Euler-Euler Modell das sogenannte Symmetrische Modell

$$A_i = \frac{6\alpha_p (1 - \alpha_p)}{d_p}. \quad (6.22)$$

Hier ist  $\alpha_p$  der Volumsanteil der Phase  $p$  und  $d_p$  ist der Blasen- oder Tropfendurchmesser. Für unsere Berechnung wurde das Standard Modell sowie der Standard Tropfendurchmesser verwendet [18].

### Austauschkoeffizient zwischen den Phasen

In der Gleichung (6.21) kann man sehen, dass der Impulsaustausch zwischen den Phasen auf dem Fluid-Fluid Austauschoeffizienten  $K_{pq}$  basiert. Alle Modelle in ANSYS Fluent, die für Austauschoeffizienten zwischen den Phasen verfügbar sind, basieren auf empirischen Funktionen. Es gibt keine allgemeine Formulierung in der Literatur und die Software-Entwickler widmen den Konfigurationen aus Gas/Flüssigkeit und Feststoff sowie den poröse Medien und Temperatur Variationen in der Domain besondere Aufmerksamkeit. Von diesen Konfigurationen wird momentan von den Software-Entwicklern abgeraten. Daher wurde der Austauschoeffizient in unserer Betrachtung zwischen Wasser und Wasserdampf sowie Wasser und Luft Null gesetzt. Dies bedeutet in ANSYS Fluent, dass die Fluss-Felder für

die Fluide unabhängig voneinander berechnet werden. Die einzigen Wechselwirkungen sind die komplementären Volumsanteile der anderen Phasen in der berechneten Zelle [18].

Dies ist auch im Sinne der Betrachtung von Gips, da davon ausgegangen werden kann, dass die Diffusion von Dampf und Wasser durch die Domain hauptsächlich von der Feinstruktur des Gips abhängt und nicht von der Wechselwirkung zwischen den Phasen. Die Wechselwirkung mit der Gipsstruktur wird durch Widerstandswerte berücksichtigt auf die in der nächsten Sektion "Poröse Medien" genauer eingegangen wird.

Zwischen Wasserdampf und Luft wurde der Austauschkoefizient jedoch nicht null gesetzt. Dies ist auf die Stabilität der Simulation zurückzuführen. Es stellte sich heraus, dass ein Austauschkoefizient zwischen Luft und Wasserdampf dazu führt, dass die Simulation stabiler läuft und nicht vorzeitig abbricht. Dies kann man darauf zurückführen, dass zwischen diesen beiden Gasphasen ein Impulsaustausch stattfindet, welchen man nicht vernachlässigen kann. Auch werden beiden Phasen, wie später noch genauer erläutert, als ideales Gas behandelt, wodurch sich die Dichte aus Temperatur und Druck ergibt und der Druck auch über die Wechselwirkung dieser Phasen bestimmt wird. Es wurde ein symmetrisches Austauschmodell verwendet, da dieses zu den besten Ergebnissen führte und auch laut [18] für den Fall, dass die sekundäre Phase die primäre als dominierende ablöst, wie es in unserem Fall zutrifft, die empfohlene Einstellung ist. Hier wird kurz das verwendete empirische Modell von ANSYS erläutert.

**Fluid-Fluid Austauschkoefizient** In Fluid-Fluid Strömungen wird angenommen, dass jede sekundäre Phase Tropfen oder Blasen bildet. Dies bedeutet, dass es einen Einfluss hat welche Phase als primär beziehungsweise sekundär definiert wird. Im Normalfall sollte laut [18] die dominierende Phase als die Primäre definiert werden, da das weniger vorhandene Fluid eher Tropfen bildet. Der Austauschkoefizient für diesen Typ von Bläschen Strömungen kann wie folgt geschrieben werden:

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6\tau_p} d_p A_i, \quad (6.23)$$

wobei  $A_i$  Grenzflächenkonzentration,  $f$  die "Zug-Funktion" darstellt, die jedoch abhängig von dem verwendeten Austauschkoefizient-Modell ist, und  $\tau_p$  die "Partikel Relaxationszeit" ist welche definiert ist als

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q}, \quad (6.24)$$

wobei  $d_p$  der Tropfendurchmesser ist. Alle "Drag" Modelle basieren auf einem "Drag Koeffizient" welcher auf der relativen Reynoldszahl basiert. Bei allen Modellen wird der Austauschkoefizient (6.23) null falls die primäre Phase in diesen Gebiet nicht mehr präsent ist. Dies wird dadurch gesichert, dass die "Drag Funktion" immer mit dem Volumsanteil der primären Phase multipliziert wird wie man in Gleichung (6.23) sieht [18].

**Symmetrisches Modell** Es wurde das symmetrische Modell für den Austauschkoefizient verwendet, da in [18] dieses Modell empfohlen wird falls die sekundäre Phase in einer Region der Domain zu der primären Phase wird. Dies trifft auf unseren Fall zu da der Wasserdampf komplett die Luft in den Poren verdrängt. Beim symmetrischen Modell wird die Dichte und die Viskosität über die Eigenschaften im Volumsmittel laut [18] wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \rho_{pq} &= \alpha_p \rho_p + \alpha_q \rho_q \\ \mu_{pq} &= \alpha_p \mu_p + \alpha_q \mu_q \end{aligned} \quad (6.25)$$

und der Durchmesser ist definiert als

$$d_{pq} = \frac{1}{2} (d_p + d_q), \quad (6.26)$$

daraus folgt

$$K_{pq} = \frac{\rho_{pq} f}{6\tau_{pq}} d_p A_i \quad (6.27)$$

$$\tau_{pq} = \frac{\rho_{pq} (d_{pq})^2}{18\mu_{pq}} \quad (6.28)$$

$$Re = \frac{\rho_{pq} |v_p - v_q| d_{pq}}{\mu_{pq}} \quad (6.29)$$

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (6.30)$$

und  $C_D$  ist definiert als

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (6.31)$$

### Virtuelle Massenkraft

ANSYS Fluent bietet auch die Implementierung eines "virtuellen Massen Effektes" welcher dadurch verursacht wird, wenn sich die sekundäre Phase  $p$  relativ zur primären Phase beschleunigt. Diese Option wurde in unserer Betrachtung deaktiviert [18].

### Beschreibung des Wärmetransportes

Die innere Energiebilanz für eine Phase  $q$  kann durch die Phasenthalpie ausgedrückt werden, die definiert ist durch

$$H_q = \int c_{p,q} dT_q, \quad (6.32)$$

wobei  $c_{p,q}$  die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  $p$  der Phase  $q$  ist [18].

**Der Wärmeaustauschkoeffizient** Der volumsbezogene Energietransport zwischen den Phasen  $Q_{pq}$  wird als Funktion der Temperaturdifferenz und der Grenzflächenkonzentration  $A_i$  angenommen:

$$Q_{pq} = h_{pq} A_i (T_p - T_q), \quad (6.33)$$

wobei  $h_{pq} = h_{qp}$  der volumenbezogene Wärmetransportkoeffizient ist. Der Wärmetransportkoeffizient ist auf die Nusselt-Zahl  $Nu_p$  der Phase  $p$  bezogen, gegeben durch

$$h_{pq} = \frac{\kappa_q Nu_p}{d_p}. \quad (6.34)$$

Hier ist  $\kappa_q$  die thermische Leitfähigkeit der Phase  $q$  und  $d_p$  der Tropfendurchmesser.

Beim Euler Mehrphasenmodell werden einige Methoden für die Berechnung des Volumsbezogenen Wärmetransports bereitgestellt [18].

**Ranz-Marshall Modell** Die Korrelation von Ranz und Marshall berechnet die Nusselt Zahl wie folgt:

$$Nu_p = 2.0 + 0.6Re_p^{1/2} Pr^{1/2}, \quad (6.35)$$

wobei  $Re_p$  die Relative Reynoldszahl basierend auf dem Durchmesser der  $p^{th}$  und der relativen Geschwindigkeit  $|\vec{u}_p \vec{u}_q|$  ist und  $Pr$  die Randzahl der  $q^{th}$  Phase darstellt:

$$Pr = \frac{c_{p,q} \mu_q}{\kappa_q} \quad (6.36)$$

[18].



### 6.2.3 Verdampfungs- und Kondensationsmodell

In ANSYS Fluent sind zwei Modelle für den Massentransfer zwischen den Phasen durch Verdampfung und Kondensation implementiert. Hier wurde das Lee Modell angewandt [18].

### 6.2.4 Lee Modell

Das Lee-Modell ist ein mechanistisches Modell auf physikalischer Basis. Im Lee-Modell wird der Flüssigkeits-Dampf Massentransfer (Verdampfung und Kondensation) durch die Dampftransportgleichung bestimmt:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl}, \quad (6.37)$$

wobei

$v$  = Dampfphase

$\alpha_v$  = Volmsanteil von Dampf

$\rho_v$  = Dampfdichte

$\vec{V}_v$  = Dampf Geschwindigkeit

$\dot{m}_{lv}, \dot{m}_{vl}$  = Massentransferrate durch Verdampfung und Kondensation. Die Einheit ist  $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$ .

Wie man auf der rechten Seite der Gleichung (6.37) sieht, ist ein positiver Massentransport definiert als der Übergang von der flüssigen Phase zur gasförmigen für Verdampfungs- und Kondensationsprobleme. Wenn  $T_l > T_{sat}$  (Verdampfung), dann ist

$$\dot{m}_{lv} = \text{coeff} \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}}. \quad (6.38)$$

Wenn  $T_v < T_{sat}$  (Kondensation), dann ist

$$\dot{m}_{vl} = \text{coeff} \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}}. \quad (6.39)$$

$\text{coeff}$  ist ein Koeffizient, der fein abgestimmt werden muss und als Relaxationszeit interpretiert werden kann.  $\alpha$  und  $\rho$  stehen für Volmsanteil der Phase und deren Dichte. Der Quellterm für die Energieerhaltungsgleichung ist durch das Produkt des Massentransports mit der latenten Wärme gegeben.

Betrachtet man die Hertz-Knudsen-Formel, welche den Verdampfungs- und Kondensations Fluss basierend auf der kinetischen Theorie für eine flache Grenzfläche angibt:

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi R T_{sat}}} (P^* - P_{sat}). \quad (6.40)$$

Der Fluss hat die Einheit  $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ,  $M$  ist die molare Masse,  $P$  ist der Druck,  $T$  die Temperatur und  $R$  ist die universelle Gaskonstante. Der Koeffizient  $\beta$  ist der sogenannte Akkomodationskoeffizient, der den Anteil der Dampfmoleküle angibt, welche in die flüssige Oberfläche gehen und von dieser Oberfläche adsorbiert werden.  $P^*$  repräsentiert den Partialdruck von Dampf in der Grenzschicht auf der Dampfseite.  $P_{sat}$  entspricht dem Sättigungsdruck. Die Clausius-Clapeyron-Gleichung bezieht den Druck auf die Temperatur

für die Sättigungsbedingung. (Es wird durch Gleichsetzen der chemischen Potentiale von Dampf und Flüssigkeit erhalten):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_v - v_l)}, \quad (6.41)$$

wobei  $v_v$  und  $v_l$  die inverse Dichte von Dampf bzw. der Flüssigkeit ist (Das Volumen bezogen auf eine Masseneinheit),  $L$  entspricht der latenten Wärme in  $\text{J kg}^{-1}$ .

Basierend auf diesem differentiellen Ausdruck (6.41) erhält man in der Nähe der Sättigungsbedingung eine Variation der Temperatur mit einer Variation des Drucks.

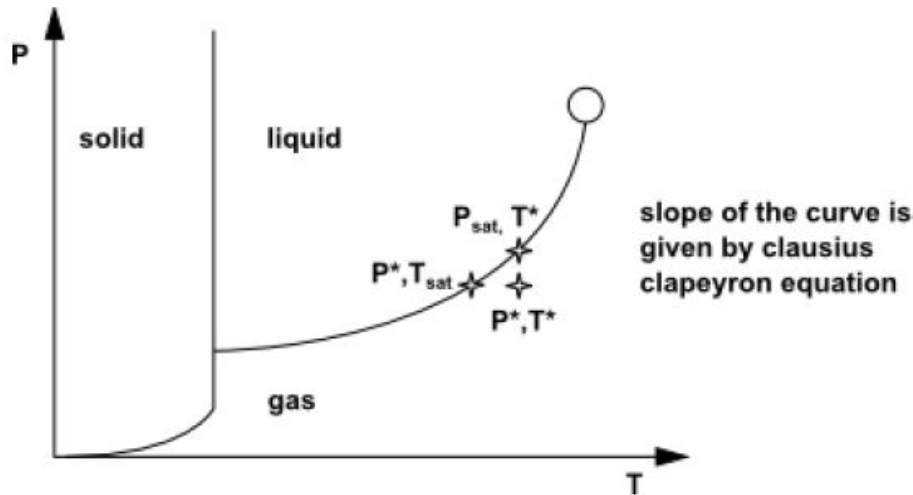


Abbildung 6.1: Das Phasendiagramm[18].

Die Clausius-Clapeyron-Gleichung (6.41) ergibt die folgende Formel, solange  $P^*$  und  $T^*$  nahe an der Sättigungsbedingung liegen:

$$(P^* - P_{sat}) = -\frac{L}{T(v_v - v_l)} (T^* - T_{sat}) . \quad (6.42)$$

Mit der Herz-Knudson-Gleichung (6.40) führt dies zu

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L \left( \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{(T^* - T_{sat})}{T_{sat}} . \quad (6.43)$$

Der Faktor  $\beta$  wird definiert durch den Akkomodationskoeffizienten und der physikalischen Eigenschaften von Dampf.  $\beta$  nähert sich an 1.0 an bei nahezu Gleichgewichtsbedingungen. In den Euler'schen und gemischten Mehrphasenmodellen wird angenommen, dass die Strömungsregime verteilt sind. Wenn wir beispielsweise annehmen, dass alle Dampfblasen den gleichen Durchmesser haben, wird die Grenzflächendichte nach folgender Formel bestimmt:

$$A_i = \frac{6\alpha_v \alpha_l}{d_p}, \quad (6.44)$$

wobei  $d_p$  der Tropfendurchmesser in m ist. Damit wird der Phasenquellterm zu:

$$F A_i = \frac{6}{d_p} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L \left( \frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right) \left[ \alpha_l \rho_l \frac{(T^* - T_{sat})}{T_{sat}} \right] . \quad (6.45)$$

Aus der obigen Gleichung wird der Koeffizient  $coeff$ , welcher der inverse Relaxationszeit  $[s^{-1}]$  entspricht definiert als:

$$coeff = \frac{6}{d_p} \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L \left( \frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right). \quad (6.46)$$

Dies führt schlussendlich zu den finalen Ausdrücken für den Massentransfer im Verdampfungs- und Kondensationsprozess (6.38) und (6.39). Diese Ausdrücke können implizit als Quellterm in der Phasenerhaltungsgleichung behandelt werden.

Ein ähnlicher Ausdruck kann für die Kondensation erhalten werden. In diesem Fall betrachten wir kleine Tröpfchen in einer kontinuierliche Dampfphase, auch wenn die Primärphase eine Flüssigkeit ist.

Zu Beachten ist, dass der Koeffizient theoretisch für die Kondensation und Verdampfung unterschiedlich sein sollte. Darüber hinaus basiert der theoretische Ausdruck auf einigen starken Annahmen:

- Flache Grenzfläche
- verteilte Regime mit konstantem Durchmesser
- bekanntes  $\beta$ .

Der Blasendurchmesser und der Akkomodationskoeffizient sind normalerweise nicht bekannt, weshalb die Koeffizienten auf die experimentellen Daten abgestimmt werden müssen. Standardmäßig wird sowohl der Koeffizient für Verdampfung als auch für Kondensation auf 0.1 gesetzt. In praktischen Fällen kann jedoch der Koeffizient auch eine Größenordnung von  $10^3$  annehmen [18].

## 6.3 Poröse Medien

Das Modell eines porösen Mediums in ANSYS-Fluent kann für viele Ein- und Mehrphasenprobleme verwendet werden, wie zum Beispiel bei der Simulation von Schüttungen, Filterpapieren, perforierte Platten, Rohrbündel und vielem mehr. Es wird immer dann verwendet, wenn die Erstellung eines Rechenetztes für sehr kleine und komplexe Geometrien nicht mehr möglich ist und die genaue Feinstruktur auch nicht ausschlaggebend ist, das Gefüge sozusagen als homogen angenommen werden kann. Der Druckverlust in der porösen Zone wird durch empirische Widerstandswerte in der Impulsgleichung berücksichtigt. Der Wärmeübergang kann mit oder ohne thermischem Gleichgewicht zwischen Flüssigkeit- und fester Phase in der Energiegleichung berücksichtigt werden [18].

### 6.3.1 Limitierungen und Annahmen

Der empirische Widerstand gegen die Fluidbewegung wird als Senkenterm in der Impulsgleichung berücksichtigt. Daher hat das Modell folgende Annahmen und Limitierungen, die berücksichtigt werden müssen.

- Die Volumenblockade, die physikalisch durch die Feinstruktur des Festkörpers hervorgerufen wird, wird nicht berücksichtigt. Stattdessen verwendet Fluent die sogenannte Leerrohrgeschwindigkeit (superficial velocity), welche aus dem Volumenstrom bestimmt wird, um die Kontinuität der Geschwindigkeitsvektoren über die Grenzflächen des porösen Mediums zu sichern. Die Leerrohrgeschwindigkeitsformulierung berücksichtigt nicht die Porosität bei der Berechnung der konvektiven und diffusiven

Terme der Transportgleichung. Es besteht jedoch die Möglichkeit einer genaueren Behandlung der Geschwindigkeit, wobei die richtige (physikalische) Geschwindigkeit in der porösen Zone berechnet wird. Bei Mehrphasensystemen weisen alle Phasen dieselbe Porosität auf. Es gelten folgende Punkte:

- Die Effekte des porösen Mediums auf das Turbulenz Feld werden nur approximiert.
- Im Allgemeinen ist die Porosität isotrop, dies gilt für Ein- sowie Mehrphasenmodelle.
- Die "Superficial Velocity Formulation" sowie die "Physical Velocity Formulation" ist im Einphasen sowie im Mehrphasenmodell verfügbar.
- Im porösen Medium werden die Impulswiderstände sowie die Wärmequellen separat in jeder Phase behandelt.

Als Grundlage dient hier der Theory Guide von ANSYS Fluent [18].

### 6.3.2 Impulsgleichung für Poröse Medien

Wie oben erwähnt wird normalerweise die "Superficial Velocity Porous Formulation" verwendet, bei der die superficial Phasen- oder Gemisch-Geschwindigkeit aus dem Volumenstrom berechnet wird. Hier wird auf diese Methode eingegangen. Später wird die Erweiterung auf das genauere Modell der "Physical Velocity" behandelt. Im Folgenden wird das Modell für eine einzelne Phase beschrieben, es ist daher nochmals festzuhalten:

- Für Mehrphasen Strömungen müssen die physikalischen Gesetze und Gleichungen, wie Massenerhaltung Impuls- und Energieerhaltung und alle anderen skalaren Gleichungen, für jede Phase separat gelöst werden.
- Die "Superficial Velocity Porous Formulation" gibt generell gute Ergebnisse für das Druckverhalten in der porösen Region, jedoch bleiben die Geschwindigkeiten außerhalb sowie innerhalb der porösen Region gleich und sie kann nicht die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit sowie den Druckverlust in der Porösen Zone vorhersagen wodurch die Genauigkeit des Modells limitiert ist.

Poröse Medien werden durch die Addition eines Impulsquellterms zu den Standard Flussgleichungen modelliert. Der Quellterm besteht aus zwei Teilen: Ein "Viskosen Term" (Zähigkeitsverluste, der erste auf der rechten Seite der Gleichung (6.47)) und einen "Inertial Loss Term" (Trägheitsverluste, der zweite Term auf der rechten Seite der Gleichung (6.47))

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right), \quad (6.47)$$

wobei  $S_i$  der Quellterm für die  $i$ 'te (x, y and z) Impulsgleichung ist,  $|v|$  ist der Absolutwert der Geschwindigkeit,  $D$  and  $C$  sind Matrizen,  $\mu$  ist die dynamische Viskosität und  $\rho$  steht für die Dichte des Fluids. Der Senkenterm verursacht einen Druckgradienten in der porösen Zelle, welcher einen Druckverlust proportional zur Flüssigkeitgeschwindigkeit (Quadrat der Geschwindigkeit) erzeugt.

Für homogene Feststoffe reduziert sich Gleichung (6.47) zu

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (6.48)$$

wobei  $\alpha$  die Permeabilität und  $C_2$  der "inertial Resistance factor" (Trägheitsfaktor) ist. Diese Vereinfachung bestimmt  $D$  und  $C$  als Diagonalmatrizen mit  $\frac{1}{\alpha}$  und  $C_2$  als Diagonaleinträge (Null für die anderen Elemente) [18].

## Darcy-Gesetz

In laminaren Strömungen durch poröse Medien ist der Druckverlust proportional zur Geschwindigkeit. Daher kann die Konstante  $C_2$  null gesetzt werden. Ignoriert man die konvektive Beschleunigung sowie Diffusion in der Impulserhaltung (6.2) im porösen Medium so reduziert sich die Impulserhaltung zum Darcy-Gesetz:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v}. \quad (6.49)$$

Der Druckverlust den ANSYS Fluent in jede der drei Koordinatenrichtungen berechnet ist dann in der porösen Region

$$\nabla p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x \quad (6.50)$$

$$\nabla p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y \quad (6.51)$$

$$\nabla p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} v_j \Delta n_z, \quad (6.52)$$

wobei  $\frac{1}{\alpha_{ij}}$  die Einträge der Matrix  $D$  in der Gleichung (6.47) sind,  $v_j$  die Geschwindigkeit in die jeweilige Koordinaten Richtung ist und  $\Delta n_x$ ,  $\Delta n_y$  und  $\Delta n_z$  die Dicke des porösen Mediums in die jeweilige Richtung ist [18].

### 6.3.3 Relative Viskosität in porösen Medien

In viskosen Strömungen wird eine effektive Viskosität  $\mu_e$  eingeführt, die den Effekt des porösen Mediums im Diffusionsterm der Impulsgleichung berücksichtigt:

$$\mu_e = \mu_r \mu, \quad (6.53)$$

wobei  $\mu$  die Flüssigkeitsviskosität ist und  $\mu_r$  die relative Viskosität darstellt. Die relative Viskosität wird mithilfe von Sub-Modellen, die in ANSYS Fluent implementiert sind, berechnet [18]. Hier wurde jedoch ein konstanter Wert von 1 für die relative Viskosität verwendet.

$$\begin{array}{ll} \text{Birkman Correction} & \mu_r = (1 - \gamma)^{-2.5} \\ \text{Einstein Formulation} & \mu_r = 1 + 2.5(1 - \gamma) \\ \text{Breugem Correlation} & \mu_r = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \gamma - \frac{3}{7} \right) & \gamma \geq \frac{3}{7} \\ 0 & \gamma < \frac{3}{7} \end{cases} \end{array} \quad (6.54)$$

### 6.3.4 Energiegleichung in porösen Medien

Es wird die Energietransportgleichung (6.4) in der porösen Zone gelöst, jedoch mit Modifizierungen am Wärmeleitungsterm und der zeitabhängigen Terme. Es gibt zwei Modelle zur Betrachtung der Energiegleichung, eines nimmt ein thermisches Gleichgewicht zwischen dem porösen Medium und dem Flüssigkeitsstrom an. Beim anderen Modell ist dies nicht der Fall. Hier wird nur auf das Modell, welches das thermische Gleichgewicht behandelt, eingegangen, da dies in der Problemstellung von Bedeutung ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Gips simultan mit dem darin befindlichen Wasserdampf beziehungsweise Wasser erwärmt [18].

## Thermisches Gleichgewichtsmodell

Beim Equilibrium-Modell wird thermisches Gleichgewicht zwischen dem porösen Medium und dem Fluid angenommen. Die Wärmeleitung verwendet eine effektive Leitfähigkeit und die zeitabhängigen Terme die thermische Trägheit des Festkörpers:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1 - \gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho_f E_f + p)) = S_f^h + \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \vec{v}) \right], \quad (6.55)$$

wobei

$E_f$  = totale Energie des Fluids

$E_s$  = totale Energie des Festkörper

$\rho_f$  = Dichte des Fluids

$\rho_s$  = Dichte des Festkörpers

$\gamma$  = Porosität des Mediums

$k_{eff}$  effektive thermische Leitfähigkeit

$S_f^h$  Quellterm für das Fluid.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit  $k_{eff}$  wird aus dem volumsbezogenen Mittel der Wärmeleitfähigkeit von Fluid und Festkörper berechnet:

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s, \quad (6.56)$$

wobei  $k_f$  die thermische Leitfähigkeit des Fluids ist und  $k_s$  die des Festkörpers. Die thermische Leitfähigkeit des Fluids sowie des Festkörpers kann über UDF-Funktionen eingegliedert werden [18].

### 6.3.5 Modellierung von porösen Medien basierend auf der Physikalischen Geschwindigkeit

ANSYS Fluent berechnet als Standardeinstellung die sogenannte "superficial velocity", in der, wie bereits erwähnt, die poröse Zone nicht berücksichtigt wird und welche basierend auf dem Volumenstrom berechnet wird. Diese Geschwindigkeit kann wie folgt in Beziehung mit der physikalischen Geschwindigkeit gebracht werden:

$$\vec{v}_{superficial} = \gamma \vec{v}_{physical} \quad (6.57)$$

wobei  $\gamma$  für die Porosität des Mediums steht und als der Bruchteil des Volumens, welches durch das Fluid besetzt wird, zu dem totalen Volumen definiert ist. Die Leerrohrgeschwindigkeit bleibt dieselbe in der porösen Region wie außerhalb, dadurch wird die Porosität nicht in der Transportgleichung berücksichtigt. Dies limitiert die Genauigkeit des Modells in den Fällen, in denen die Geschwindigkeit in der porösen Zone erhöht werden sollte. Daher führt diese Behandlung der Geschwindigkeit nicht zu richtigen Ergebnissen, wenn die Geschwindigkeitsbeträge sowie die Gradienten von Bedeutung sind. Für genauere Betrachtungen wird es notwendig, die echte physikalische Geschwindigkeit in den Transportgleichungen zu berücksichtigen [18]. Es wurde die physikalische Geschwindigkeit zur Berechnung herangezogen.

### 6.3.6 Mehrphasenprobleme in porösen Medien

Es ist möglich, in porösen Medien Mehrphasenströmungen mit der physikalischen Geschwindigkeit zu berechnen, um das wirkliche physikalische Geschwindigkeitsfeld durch die gesamte Rechen Domain zu erhalten, welche poröse und nicht poröse Regionen enthält. Mit der physikalischen Geschwindigkeitsbetrachtung kann die bestimmende Gleichung in einen isotropen porösen Medium, für einen allgemeinen Skalar  $\phi_q$  in der Phase  $q$  wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\partial (\gamma \alpha_q \rho_q \phi_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q \phi_q) = \nabla \cdot (\gamma \Gamma_q \nabla \phi_q) + \gamma S_{\phi,q}. \quad (6.58)$$

Hier ist  $\gamma$  die Porosität, welche sich mit der Zeit und Raum verändern kann;  $\rho_q$  ist die Phasendichte;  $\alpha_q$  ist der Volumsanteil;  $\vec{v}_q$  ist die Geschwindigkeit der Phase;  $S_{\phi,q}$  ist ein möglicher Quellterm und  $\Gamma_q$  der Diffusionskoeffizient.

Die Transportgleichung für den Skalar gilt für alle anderen Transportgleichungen im Euler Mehrphasenmodell wie die Impuls und Energiegleichungen.

Unter Annahme von isotroper Porosität und einer Mehrphasenströmung nehmen die Gleichungen (6.15), (6.16) und (6.19) folgende Formen an [18].

#### Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \gamma \sum_{p=1}^3 (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + \gamma S_q, \quad (6.59)$$

[18].

#### Impulsgleichung

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\gamma \alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\gamma \bar{\tau}_q) + \gamma \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \gamma \sum_{p=1}^n \left( \vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) \\ & + \gamma \left( \vec{F}_q + \vec{F}_{left,q} + \vec{F}_{vm,q} \right) \\ & - \alpha_q \left( \frac{\gamma^2 \mu}{K_q} \vec{v}_q + \frac{\gamma^3 C_{2,q}}{2} \rho_q |\vec{v}_q| \vec{v}_q \right), \quad (6.60) \end{aligned}$$

wobei der letzte Term der Impulswiderstandsquellterm (Senke) des porösen Mediums darstellt. Er besteht aus zwei Teilen - einem viskosen Verlustterm und einem inertialen Verlustterm.  $\dot{m}_{pq}$  und  $\dot{m}_{qp}$  beschreiben den Massentransfer zwischen den Phasen. Der Parameter  $K$  ist die Permeabilität und  $C_2$  ist der Inertial-Widerstandsfaktor.  $K$  und  $C_2$  sind beides Funktionen von  $(1 - \gamma)$ . Wenn  $\gamma = 1$ , ist der Fluss nicht porös und die zwei Widerstandsterme verschwinden [18].

#### Energiegleichung

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q (\gamma \rho_q h_q + (1 - \gamma) \rho_s h_s)) + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = & -\gamma \alpha_q \frac{dp_q}{dt} + \gamma \bar{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q \\ & - \nabla \cdot (3\alpha_q (\gamma k_q + (1 - \gamma) k_s) \nabla T_q) \\ & + \gamma S_q + \gamma \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}), \quad (6.61) \end{aligned}$$

wobei:

Die Indizes  $q$ ,  $p$  und  $s$  stehen für die Phase  $q$ ,  $p$  und für den Festkörper  $s$ .

$h$  ist die totale Enthalpie

$Q_{pq}$  ist der Wärmetransport zwischen der Phase  $p$  und der Phase  $q$

$\rho$  ist die Dichte

$S$  ist die Wärmequelle

$\alpha$  ist der Volumsanteil der Phase

$\vec{v}$  ist die Geschwindigkeit der Phase

$h_{pq}$  und  $h_{qp}$  ist die totale Enthalpie Differenz zwischen den Phasen  $p$  und  $q$  und umgekehrt [18].

## 6.4 Löser Theorie

### 6.4.1 Überblick der Löser

In ANSYS FLUENT sind zwei numerische Methoden zur Lösung der Strömungsprobleme implementiert:

1. Druck-basierter Löser
2. Dichte-basierter Löser

Historisch wurde der Druck-basierte Ansatz für langsame inkompressible Strömungen entwickelt, während der Dichte-basierte Ansatz hauptsächlich für schnelle kompressible Ströme entwickelt wurde. Mittlerweile wurden beide Methoden erweitert und neu formuliert, so dass sie für ein weites Gebiet von Strömungsbedingungen eingesetzt werden können. Bei beiden Methoden werden die Geschwindigkeitsfelder aus den Impulsgleichungen gewonnen. Im Dichte-basierten Ansatz wird die Kontinuitätsgleichung verwendet, um das Dichtefeld zu berechnen, während das Druckfeld aus der Zustandsgleichung bestimmt wird. Bei dem Druck-basierten Ansatz wird das Druckfeld durch die Lösung einer Druck- oder Druckkorrektur-Gleichung, die aus der Manipulation der Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichung erhalten wurde, gewonnen.

Mit beiden Methoden löst ANSYS FLUENT die Integralgleichungen zur Erhaltung von Masse und Impuls und (falls nötig) für Energie und andere Skalare wie Turbulenzen und chemische Spezies. In beiden Fällen wird eine auf dem Kontrollvolumen basierende Technik verwendet:

- Aufteilung der Domäne in diskrete Kontrollvolumina durch die Verwendung eines Rechengitters.
- Integration der Gleichungen in die einzelnen Kontrollvolumina zur Erstellung eines algebraischen Gleichungssystems für die diskreten Variablen ("Unbekannten") wie Geschwindigkeit, Temperatur und andere Skalare.
- Die Linearisierung der diskretisierten Gleichungen und die Lösung des resultierenden linearen Gleichungssystems ergeben aktualisierte Zahlenwerte der Variablen.

Die beiden numerischen Methoden verwenden einen ähnlichen Diskretisierungsprozess (endliches Volumen), wobei sich jener Ansatz, um die diskretisierten Gleichungen zu linearisieren und zu lösen, unterscheidet [18].



## 6.4.2 Druck-basierter Löser

Der Druck-basierte Löser verwendet einen Algorithmus, der zu einer allgemeinen Klasse von Methoden gehört, den sogenannten Projektionsmethoden. Bei dem Projektionsverfahren werden die Bedingungen der Massenerhaltung und der Kontinuität des Geschwindigkeitsfeldes erfüllt durch das Lösen einer Druckgleichung (oder Druckkorrekturgleichung). Die Druckgleichung wird aus den Kontinuitäts- und den Impulsgleichungen abgeleitet, so dass das durch den Druck korrigierte Geschwindigkeitsfeld die Kontinuitätsgleichung erfüllt. Da die Gleichungen nichtlinear und miteinander gekoppelt sind, umfasst der Lösungsprozess Iterationen, bei denen der gesamte Satz an Gleichungen wiederholt gelöst werden muss bis die Lösung konvergiert.

In ANSYS Fluent stehen zwei Druck-Basierte Lösungsalgorithmen zur Verfügung. Ein getrennter Algorithmus und ein gekoppelter Algorithmus [18]. Für unsere Problemstellung wurde der gekoppelte Algorithmus verwendet.

### Der druckbasierte gekoppelte Algorithmus

Der Druck-basierte gekoppelte Algorithmus löst ein gekoppeltes Gleichungssystem mit den Impulsgleichungen und der Druck-basierten Kontinuitätsgleichung.

Da die Impuls- und Kontinuitätsgleichungen gekoppelt gelöst werden, verbessert sich die Konvergenzrate im Vergleich zum getrennten Algorithmus erheblich. Jedoch erhöht sich der Speicherbedarf um das 1,5- bis 2-fache im Gegensatz zum getrennten Algorithmus, da das System aller Impuls- und Druck-Basierten Kontinuitätsgleichungen im Speicher gespeichert werden muss [18].

### Pressure-Based Coupled Algorithm

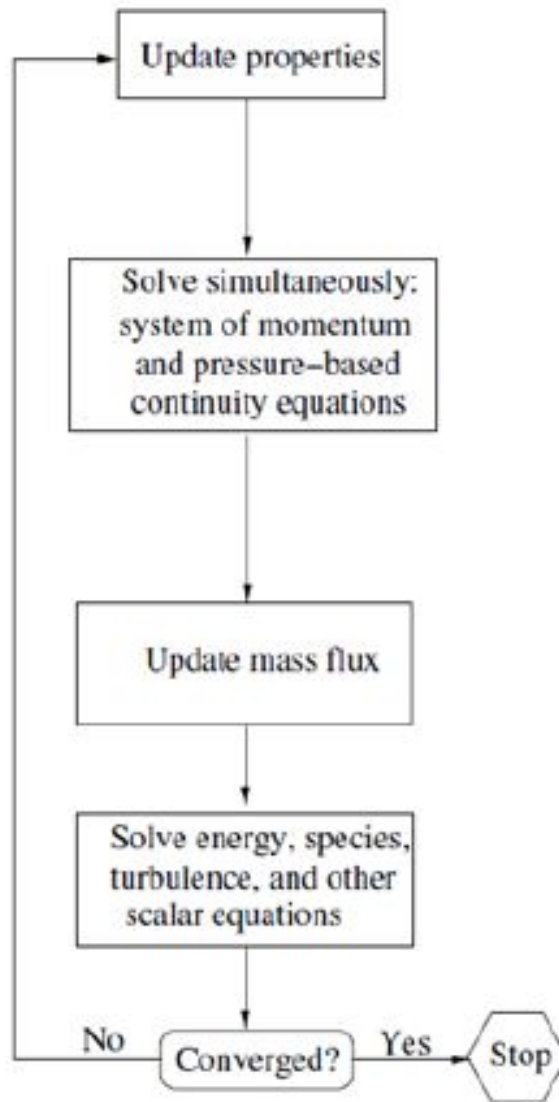


Abbildung 6.2: Der druckbasierte gekoppelte Algorithmus [17].

## 6.5 Parameter UDF

Für die Simulation wurden "User Defined Functions" (UDF) erstellt, welche die Messergebnisse für die Stoffparameter des Gipses aus den ÖGI Messungen sowie den Quellterm für Wasserdampf und die ETK als Randbedingung festlegen.

### 6.5.1 Temperatur UDF

Die UDF für die ETK wird auf die Feuerseite der Simulationsdomain angewandt. Sie setzt die Temperatur nach einer 6 Sekunden andauernden Initialisierungsphase, bei der die Temperatur auf 300 K konstant bleibt, auf die ETK.

```

DEFINE_PROFILE(RB_Temp_v01, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t < 0)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
        else if (t >= 0 && t < 6)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 300;
        else if (t >= 6)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 143.476296343373 * log(t) + 43;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

Abbildung 6.3: UDF für die ETK-Randbedingung.

## 6.5.2 Druck UDF

Die UDF für den Ofendruck wird auf die Feuerseite der Simulationsdomain angewandt. Sie setzt den Druck nach einer 6 Sekunden andauernden Initialisierungsphase, während dieser der Druck Null gehalten wird, auf 10 Pa, wobei dieser Druck kontinuierlich erreicht wird.

```

DEFINE_PROFILE(RB_pressure_v01, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t < 0)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
        else if (t >= 0 && t < 6)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
        else if (t >= 6)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 10-10/(t-5);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

Abbildung 6.4: UDF für den Ofendruck.

## 6.5.3 Gips Stoffwerte UDF

### Wärmeleitfähigkeit

Der Verlauf der gemessenen Wärmeleitfähigkeit, siehe Abbildung 3.13, wurde in fünf Temperaturbereiche unterteilt. Im ersten und letzten Bereich wurde die Wärmeleitfähigkeit als Konstant angenommen und in den drei Bereichen dazwischen mit einem Polynom möglichst gut an den tatsächlich gemessenen Verlauf angepasst. Die Leitfähigkeit wird noch zusätzlich mit einem Faktor  $\frac{1}{1-\lambda}$  korrigiert, wobei  $\lambda$  die Porosität von Gips darstellt. Diese Korrektur ist notwendig, da bei den Vermessungen der Gipsproben der Gips als

poröser Stoff vermessen wurde und dies somit hier berücksichtigt werden muss. Die in den Gleichungen von ANSYS, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, Berücksichtigung der Porosität von Gips und die damit einhergehende Minderung der Leitfähigkeit wird somit aufgehoben. Die Leitfähigkeit von Gips wird dadurch in voller Höhe berücksichtigt.

```
DEFINE_PROPERTY(thermal_conductivity_gips_v02_por_cor_v01, c, t)
{
    real lambda;
    real T = C_T(c,t);

    if (T <= 293.15)
        lambda = 0.2484125028;
    else
        if (T <= 343.15)
            lambda = 0.00000424630977720426*T + 0.247167697088816;
        else
            if (T <= 773.15)
                lambda = 0.000000000228633717452961*pow(T,4.0) - 0.0000005860608916583*pow(T,3.0) + 0.0000554503030580786*pow(T,2.0) - 0.0228216329869664*T + 3.60853380221014;
            else
                if (T <= 1173.15)
                    lambda = 0.000000628189659962805*pow(T,2.0) - 0.000876466518490655*T + 0.49169447739067;
                else
                    lambda = 0.344622457982411;

    return lambda / (1 - C_POR(c,t));
}
```

Abbildung 6.5: UDF für die temperaturabhängige thermische Leitfähigkeit.

## Dichte

Der Verlauf der Messungen der Dichte, siehe Abbildung 3.10, änderte sich nur gering im betrachteten Temperaturbereich und die Werte der spezifischen Wärmekapazität beziehen sich auf die Ausgangsmasse. Daher wurde hier auf den realen Verlauf der Dichte verzichtet und stattdessen die Ausgangsdichte verwendet. Sie wurde wieder mit dem inversen Faktor der Porosität korrigiert, um auf die real gemessenen Werte der porösen Gipsstruktur zu kommen.

```
#define const_rho 1012

DEFINE_PROPERTY(density_gips_const_v01_por_cor_v01, c, t)
{
    // Variablendeklaration
    real rho;

    // Der Dichte rho wird ein konstanter Wert zugewiesen.
    rho = const_rho / (1 - C_POR(c,t));

    // Die Dichte rho wird zurückgegeben.
    return rho;
}
```

Abbildung 6.6: UDF für den temperaturabhängige Dichteverlauf von Gips.

## Spezifische Wärmekapazität

Der gemessene Verlauf der spezifischen Wärmekapazität bezogen auf die Ausgangsmasse, siehe Abbildung 3.6, wurde in 16 Abschnitte unterteilt. Der erste und der letzte Abschnitt nähert die Kurve wieder durch eine Konstante und der Bereich dazwischen wurde mit 14 Polynomen angenähert. Für jeden Bereich muss zusätzlich die Enthalpie bestimmt werden. Für isobare Prozesse kann die Enthalpie durch Integration der Funktion für die spezifischen Wärmekapazität erhalten werden. Die Integrationsgrenzen bilden die aktuelle Temperatur sowie die Referenztemperatur des jeweiligen Abschnittes. Die berechneten Enthalpien aus den darunter liegenden Temperaturabschnitten werden aufsummiert.

```

//Abschnitt 01
if (T <= T_E_A01)
{
  cp = + 1251.853;
  *h = cp*(T-Tref);
}
else
{
  //Abschnitt 02
  if (T_E_A01 < T && T <= T_E_A02)
  {
    cp = + 0.133425722451648*pow(T,3.0) - 150.947127757936*pow(T,2.0) + 56938.1239480091*T - 7159683.7348415;
    h0 = + 0.133425722451648*(pow(T,4.0)-pow(T_E_A01,4.0))/4 - 150.947127757936*(pow(T,3.0)-pow(T_E_A01,3.0));
    *h = h01 + h0;
  }
  else
  {
    //Abschnitt 03
    if (T_E_A02 < T && T <= T_E_A03)
    {
      cp = -0.772968551144003*pow(T,3.0) + 961.554983446281*pow(T,2.0) -398320.071546219*T + 54954185.7533;
      h0 = -0.772968551144003*(pow(T,4.0)-pow(T_E_A02,4.0))/4 + 961.554983446281*(pow(T,3.0)-pow(T_E_A02,3.0));
      *h = h01 + h02 + h0;
    }
    else
    {
      //Abschnitt 04
      if (T_E_A03 < T && T <= T_E_A04)
      {
    
```

Abbildung 6.7: Ausschnitt der UDF für den temperaturabhängige Wärmekapazitätverlauf mit der dazugehörigen Berechnung der Enthalpie von Gips.

### 6.5.4 Quellterm UDF

Der Quellterm wurde über den Masseverlust von Gips in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Hierzu wurde die prozentuale Masseverlust, siehe Abbildung 3.4, in sechs Abschnitte unterteilt, wobei wieder der erste und letzte durch einen konstanten Wert angenähert wurde und die Bereiche dazwischen durch Polynome angepasst wurden. Die prozentuale Dichtedifferenz zwischen zwei Zeitschritten wird dann mit der Dichte  $\rho_0$  bei Raumtemperatur multipliziert und durch die Zeitschrittweite geteilt, um auf den Quellterm von Wasserdampf in diesem Zeitschritt zu kommen. Zur Stabilisierung des Quellterms wurden Bedingungen implementiert, welche Oszillationen verhindern sollten. Es kann immer nur einmal Wasserdampf generiert werden, auch wenn die Temperatur zwischenzeitlich wieder fiel. Dies entspricht auch der realen Situation. Weiters wird der Quellterm immer nur im ersten Iterationsschritt bestimmt und danach für alle weiteren konstant gehalten. Dies stabilisiert die Lösung und verringert den Rechenaufwand, da die UDF nur einmal angewendet werden muss. Es wird dadurch auch kein Fehler in der Berechnung des Quellterms erzeugt, da die Temperaturen vom Zeitschritt zuvor und von zwei Zeitschritten zuvor verwendet werden. Dies führt zu einer etwas verzögerten Freisetzung des Wasserdampfes, welche jedoch vernachlässigt werden kann, da eine Verschiebung von 4 s bei einer Gesamtsimulationszeit von 7200 s zu vernachlässigen ist.

```

DEFINE_SOURCE(source_mass_h2o_production_v04,c,t,dS,eqn)
{
  // Variablendeklaration
  real source, m_rel, Temp, m_rel_t, m_rel_t_minus_1;
  if (first_iteration)
  {
    //initialisierung
    if (CURRENT_TIME <= 5)
    {
      C_UDMI(c,t,2)=C_T(c,t);
      C_UDMI(c,t,0)=C_T(c,t);
      C_UDMI(c,t,3)=2;
      C_UDMI(c,t,1)=0;
    }

    if(C_UDMI(c,t,3)==1) //initialisierung ob Temperatur im letzten Teitschritt gestiegen ist.
    {
      // Temperatur T fuer den aktuellen Zeitpunkt
      Temp = C_UDMI(c,t,0);

      // Ein Abschnitt wird ausgewuehlt, im dem die Temperatur T liegt
      // Abschnitt 1
      if (Temp <= T_E_A01)
      {
        m_rel = + 100;
      }
    }
  }
}

```

Abbildung 6.8: UDF für den Quellterm von Wasserdampf.

## 6.6 Das Modell und Netzgitter

Der für uns relevante Energietransport findet nur über die Dicke der Gipsdielen statt, der Wärmeverlust am Rand sowie der Quertransport kann vernachlässigt werden. Somit kann ein kleiner Ausschnitt aus der quadratischen Gipsplatte mit der Kantenlänge von 1.2 m betrachtet werden. Dadurch verringert sich die Anzahl der Zellen und weiter die benötigte Rechenleistung und Dauer einer Simulation enorm. Der betrachtete Ausschnitt misst nur eine Kantenlänge von 10 mm. Das Simulationsmodell besteht aus vier Zonen. Von links nach rechts sieht man in der Abbildung 6.9 die Umgebungszone, welche die Umgebungstemperatur als Fixwert implementiert. Danach folgt die sogenannte Wechselwirkungszone, welche die angrenzende Luftschicht an die Gipsoberfläche darstellen soll. Hier kann sich bereits ein Temperaturgradient entwickeln. Danach Folgt die 10 cm dicke Gipsplatte, die in der Simulation als poröses Medium definiert ist, welches von Flüssigkeiten und Gasen durchströmt werden kann. Angrenzend an dieser Platte befindet sich die Feuerzone. Hier wird die ETK angewandt, was zur Erwärmung der gesamten Domain führt.

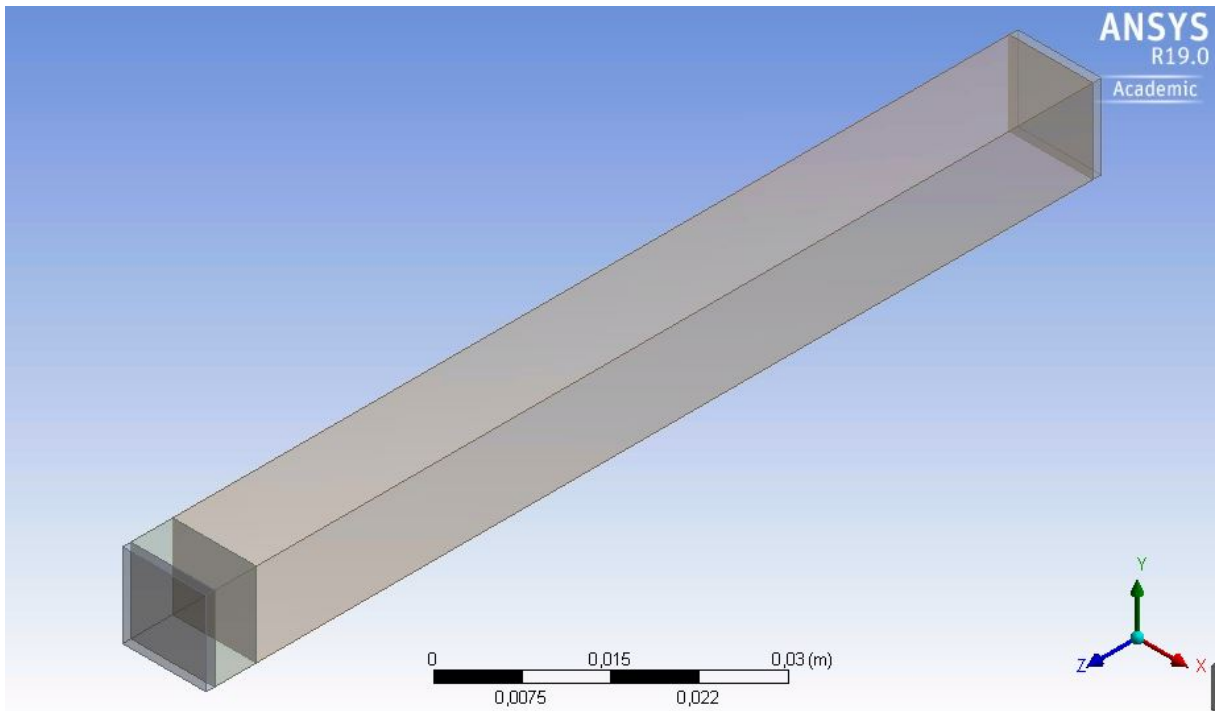


Abbildung 6.9: Modell der Simulationsdomain.

Das Gitter zur Berechnung der Wärmeleitungsphänomene in der Gipsstruktur ist quadratisch und jede Zelle hat eine Kantenlänge von 1 mm, wie man in Abbildung 6.10 sehen kann. Das Gitter besteht aus 10700 Zellen und 13068 Knoten.

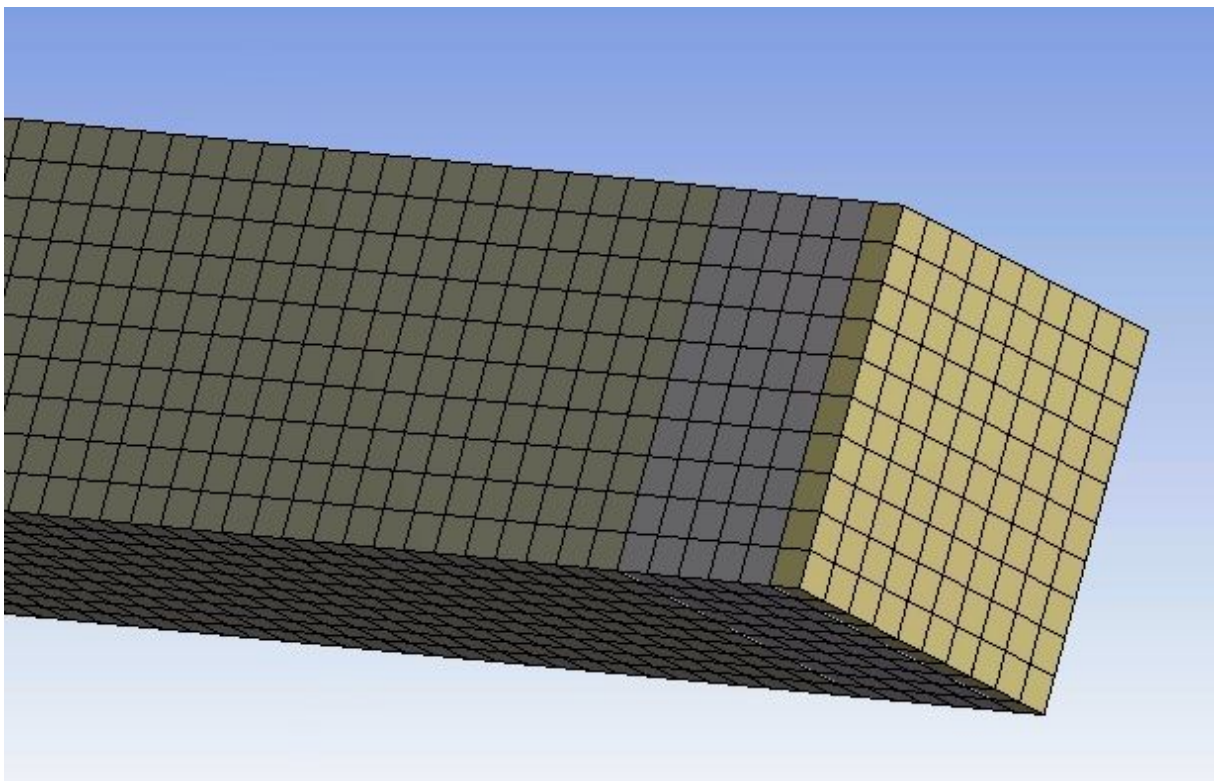


Abbildung 6.10: Berechnungsnetz.

## 6.7 Lösereinstellungen

Hier wird eine Zusammenfassung der Lösereinstellung für die Simulation gegeben anhand derer das Problem rasch überprüft und nachgerechnet werden kann.

### 6.7.1 Generelle Einstellungen

Beim Löser wurde der Druck-basierende Löser verwendet. Weiters wurden hier die absolute Geschwindigkeitsformulierung sowie eine zeitabhängige Betrachtung ausgewählt. Die Energiegleichung wurde aktiviert und unter dem Punkt der Viskosität wurde die laminare Betrachtung ausgewählt.

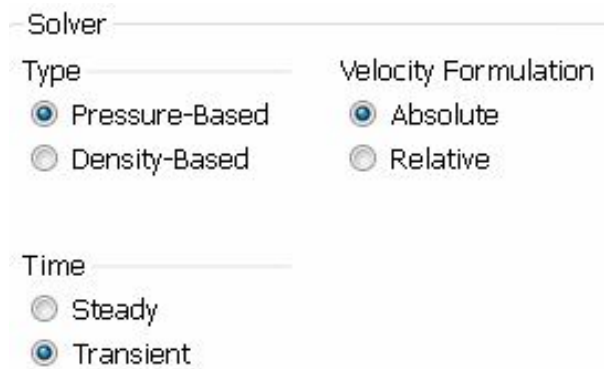


Abbildung 6.11: Lösereinstellungen.

### 6.7.2 Mehrphasen Einstellungen

Es wurde das Eulerian Model mit dem Verdampfungs- und Kondensationsmodell ausgewählt. Als Modell Option wurde das Lee Model herangezogen. Die Volumsanteile wurden implizit berücksichtigt.

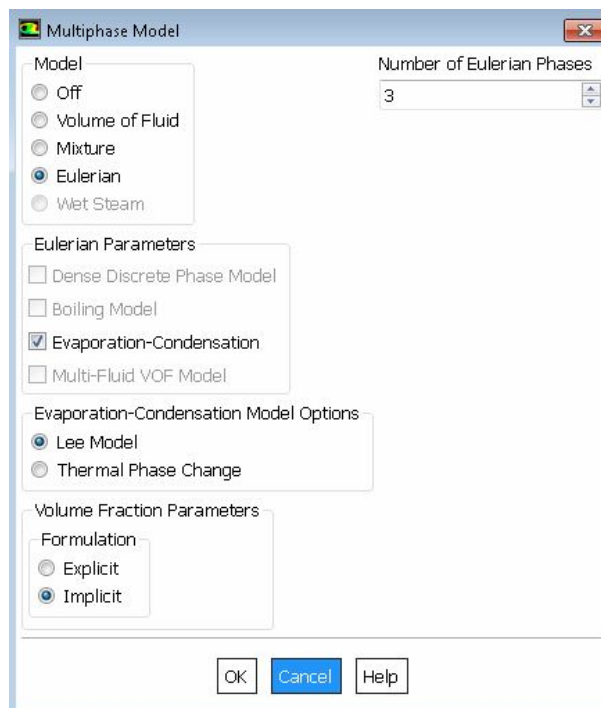


Abbildung 6.12: Mehrphasenmodell.



Für die Anzahl der Phasen wurden drei Phasen ausgewählt, wobei die primäre Phase als Luft definiert wurde und die zwei sekundären Phasen Wasser und Wasserdampf waren. Als Tropfendurchmesser für die sekundären Phasen wurde der Standardwert von  $1e-9$  m belassen.

Für die Interaktion zwischen den Phasen wurden die Optionen: "Virtual Mass", "Lift", "Wall Lubrication", "Surface Tension" deaktiviert. Für die "Drag" Option wurde nur zwischen den Phasen Wasserdampf-Luft ein symmetrischer Austausch Koeffizient eingestellt. Als Wärmeaustausch wurde die Standardeinstellung Ranz-Marshall verwendet. Die "Interfacial Area" wurde mit "ia-symmetric" ausgewählt. Für den Massentransfer zwischen Wasser und Wasserdampf wurden die in Abbildung 6.13 ersichtlichen Parameter eingestellt.

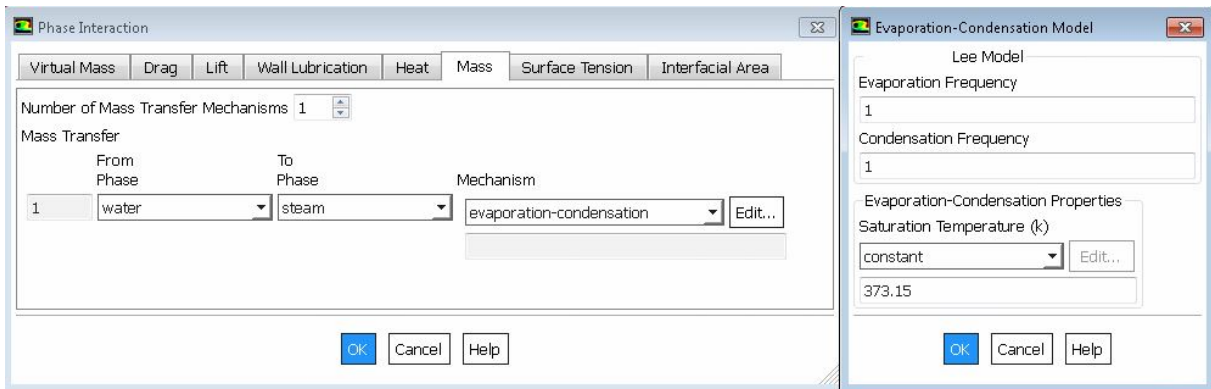


Abbildung 6.13: Lee-Modell.

Für die Sättigungstemperatur wurde ein konstanter Wert von 373.15 K eingestellt.

### 6.7.3 Materialeigenschaften

#### Luft

Es wurden die Stoffdaten für Luft, die in der ANSYS Bibliothek zur Verfügung stehen verwendet. Nur der Wert der Dichte wurde mit dem Gesetz des idealen Gases modelliert, statt der konstanten voreingestellten Dichte. Für die thermische Leitfähigkeit wurde ein linearer Verlauf angenommen und der Wert  $0.02619 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bei 300 K und  $0.06785 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bei 1000 K, wie in [19] angeführt, verwendet.

## THE THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID AIR

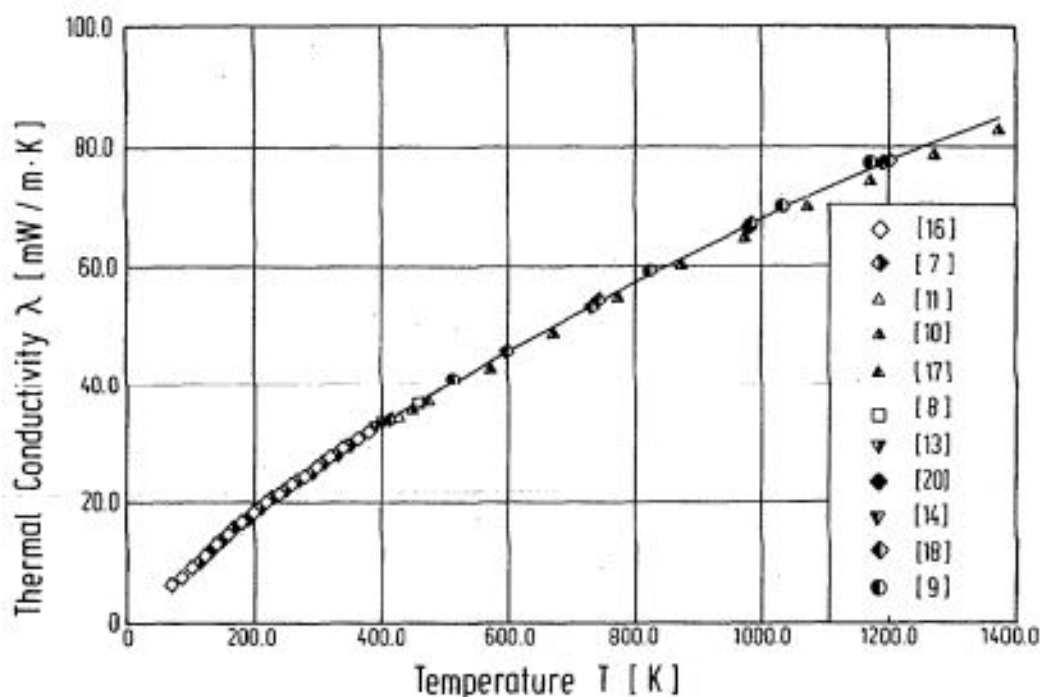


Abbildung 6.14: Temperaturabhängige thermische Leitfähigkeit von Luft [19]. Aufgrund des annähernd linearen Verlauf wurde er in der Simulation als linear angenommen.

### Wasserdampf

Die Stoffwerte von Wasserdampf wurden aus dem Buch: "International Steam Tables" [20] sowie der ANSYS Bibliothek entnommen. Es wurde ein Polynom für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit aus der ANSYS Bibliothek verwendet, da sich dieses, so wie schon bei Luft, stark mit steigender Temperatur erhöht, wie es auch aus den "International Steam Tables" [20] zu entnehmen ist. Es wurde keine Korrektur für die Wärmeleitfähigkeit aufgrund der porösen Zone vorgenommen, da die Wärmeleitfähigkeit von Wasserdampf gegenüber der von Gips einen geringeren Einfluss hat und dies damit auch berücksichtigt wird. Für die Dichte wurde, wie schon bei Luft, das ideale Gasgesetz angewandt, da dies bei niedrigen Drücken, wie sie im betrachteten Problem vorkommen, zulässig ist. Für die spezifische Wärmekapazität wurde auch ein in Teilbereiche gestückelter polynomialer Verlauf aus der ANSYS Bibliothek verwendet. Der Wert für die spezifische Enthalpie  $2675.57 \text{ kJ kg}^{-1}$  wurde bei der Referenztemperatur von  $100 \text{ °C}$  aus [20] entnommen.

### Wasser

Für Wasser wurden die Stoffwerte aus dem Buch: "International Steam Tables" [20] entnommen. Für die Dichte wurde der Wert  $958.3501 \text{ kg m}^{-3}$  bei der Referenztemperatur von  $100 \text{ °C}$  aus [20] verwendet. Bei dieser Referenztemperatur wurde auch der Wert für die spezifische Wärmekapazität mit  $4216.6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  sowie der Wert für die Wärmeleitfähigkeit mit  $0.067722 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  entnommen. Der Wert für die spezifische Enthalpie  $419.099 \text{ kJ kg}^{-1}$  wurde auch bei der selben Referenztemperatur aus [20] entnommen.

## Gips

Für Gips wurden die vom ÖGI experimentell ermittelten Stoffwerte anhand von UDF, wie oben beschrieben, implementiert. Es wurden so die Dichte, die spezifische Wärmekapazität sowie die Wärmeleitfähigkeit, wie es für Festkörper in ANSYS üblich ist, eingestellt.

### 6.7.4 Zonen Einstellungen

#### Umgebungs-/ Interaktionszone

Die Umgebungszone wurde als Fluid definiert. Für alle Phasen wurde ein fixer Wert für die Temperatur von 300 K eingestellt. In der Interaktionszone wurde die Temperatur nicht fixiert.

#### Feuer Zone

Die Feuerzone wurde auch als Fluid definiert und für alle Phasen wurde die ETK als Temperatur zugewiesen. Die ETK wurde mit einer UDF-Funktion, wie bereits beschrieben, implementiert.

#### Poröse Zone

Die Zone Gips wurde auch als Fluid definiert, wobei hier das Modell der porösen Zone aktiviert wurde. Für die Porosität von Gips wurde 0.55 angenommen. Als thermisches Modell kam das Thermische-Gleichgewichtsmodell zur Anwendung.

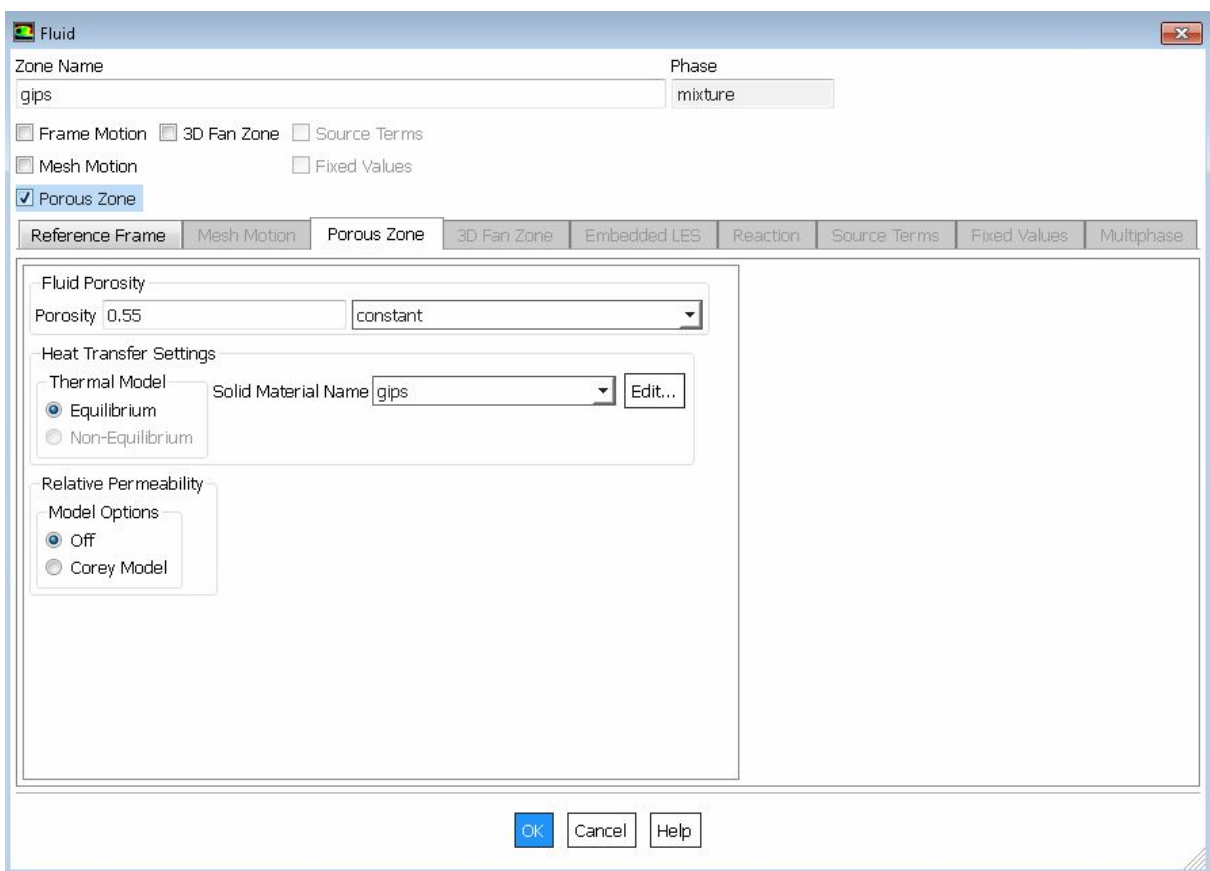


Abbildung 6.15: Gips als poröse Zone.

Zur Berücksichtigung des Widerstandes in der porösen Zone wurde ein viskoser Widerstandsterm eingestellt. Für den viskosen Widerstand, der, wie bereits erwähnt, die inverse absolute Permeabilität darstellt, wurde in alle Richtungen für Wasserdampf sowie Luft der Wert  $4e+10$  festgelegt. Bei Wasser wurde der Wert  $1e+11$  angenommen. Beim Wasserdampf wurde der Quellterm, welcher durch den Masseverlust von Gips gegeben ist, als UDF implementiert.

## 6.7.5 Randbedingungen

### Druckauslass ofenseitig

Ofenseitig wurde die Wand als Druckauslass definiert. Es wurde ein Druckverlauf angelegt, der auf 10 Pa ansteigt und mit einer UDF definiert ist. Die Temperatur von jeder Phase wurde auf die ETK gesetzt und die Rückströmungen wurden auch auf diese Temperatur gesetzt, wobei hier der Volumsanteil der Rückströmungen bei Luft auf eins gesetzt wurde, um reine Luft-Rückströmungen zu erhalten.

### Druckauslass Umgebungseitig

Hier wurde die Temperatur der Phasen auf 300 K gesetzt. Der Rückfluss wurde wieder auf Luft beschränkt und als Umgebungsdruck wurde 0 Pa eingestellt.

### Wände

Den Wänden von der Feuerzone sowie der Umgebungszone wurden die entsprechenden Temperaturen zugeordnet. Für die Wände vom Gips sowie der Interaktionszone wurde eine adiabate Randbedingung gewählt.

## 6.7.6 Löser

### Methoden

Das Lösen eines Mehrphasensystems ist von Natur aus schwierig und es entstehen leicht Stabilitäts- sowie Konvergenzprobleme. Es wird vom ANSYS Theory Guide [18] empfohlen, für zeitabhängige Lösungen das "Phase Coupled SIMPLE" Schema zu verwenden. Für die Diskretisierungsmethoden wurde immer zweite Ordnung oder höher verwendet. Als Methode für den Gradienten dient die Einstellung "Least Squares Cell Based".

**Solution Methods**

Pressure-Velocity Coupling

Scheme  
Phase Coupled SIMPLE

Solve N-Phase Volume Fraction Equations

**Spatial Discretization**

Gradient  
Least Squares Cell Based

Density  
Second Order Upwind

Momentum  
Second Order Upwind

Volume Fraction  
QUICK

Energy  
Second Order Upwind

**Transient Formulation**

Second Order Implicit

Non-Iterative Time Advancement

Frozen Flux Formulation

Warped-Face Gradient Correction

High Order Term Relaxation

Options...

Default

Abbildung 6.16: Lösungsmethode.

## Löserkontrolle

Für die Lösungskontrolle dienen die Standardeinstellungen.

**Solution Controls**

Under-Relaxation Factors

Pressure	<input type="text" value="0.3"/>
Density	<input type="text" value="1"/>
Body Forces	<input type="text" value="1"/>
Momentum	<input type="text" value="0.7"/>
Vaporization Mass	<input type="text" value="1"/>
Volume Fraction	<input type="text" value="0.5"/>
Energy	<input type="text" value="1"/>

Abbildung 6.17: Lösungs Kontrolle.

## Initialisierung

Für die Initialisierungsmethode wird vom ANSYS Theory Guide [18] die Standard Initialisierung empfohlen. Ein gutes Initialisierungsfeld ist auch empfohlen, um Instabilitäten in der Lösung entgegenzuwirken. Die Rechendomäne wurde auf 300 K initialisiert, wobei die der Volumensanteil von Luft auf 1 gesetzt wurde.

**Solution Initialization**

Initialization Methods

Hybrid Initialization

Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

Relative to Cell Zone

Absolute

Initial Values

water temperature (K)

300

air X Velocity (m/s)

0

air Y Velocity (m/s)

0

air Z Velocity (m/s)

0

air Volume Fraction

1

air Temperature (K)

300

Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

Abbildung 6.18: Initialisierung

## Berechnung

Es wird vom Theory Guide [18] empfohlen, mit kleinen Zeitschritten zu starten, welche nach einigen Zeitschritten erhöht werden können. Dies verbessert die Stabilität der Lösung. Die Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt wurde auf ein Maximum von 30 gesetzt. Als Zeitschritt wurden 4s eingestellt und für die Anzahl der Zeitschritte 1800 eingestellt um auf die gesamte Versuchszeit von 120 min zu kommen.

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed  
Time Step Size (s): 4  
Number of Time Steps: 1800

Settings...

Options

- Extrapolate Variables
- Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1  
Time Sampled (s): 0  
Sampling Options...

Solid Time Step

- User Specified
- Automatic

Max Iterations/Time Step: 30  
Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...  
Acoustic Sources FFT...

Calculate

Help

Abbildung 6.19: Berechnung



# Kapitel 7

## Ergebnis der Simulation

### 7.1 Temperatur

Der Temperaturverlauf der Simulation in Gegenüberstellung zum Experiment ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die gestrichelten Linien sind die experimentellen Verläufe zu den jeweiligen Messstellen bei 0 cm, was wie bereits im Kapitel 4 genauer erläutert, der Oberfläche des Gipses umgebungsseitig entspricht und die weiteren Messstellen in Richtung Feuerseite in jeweils 2 cm Abständen.

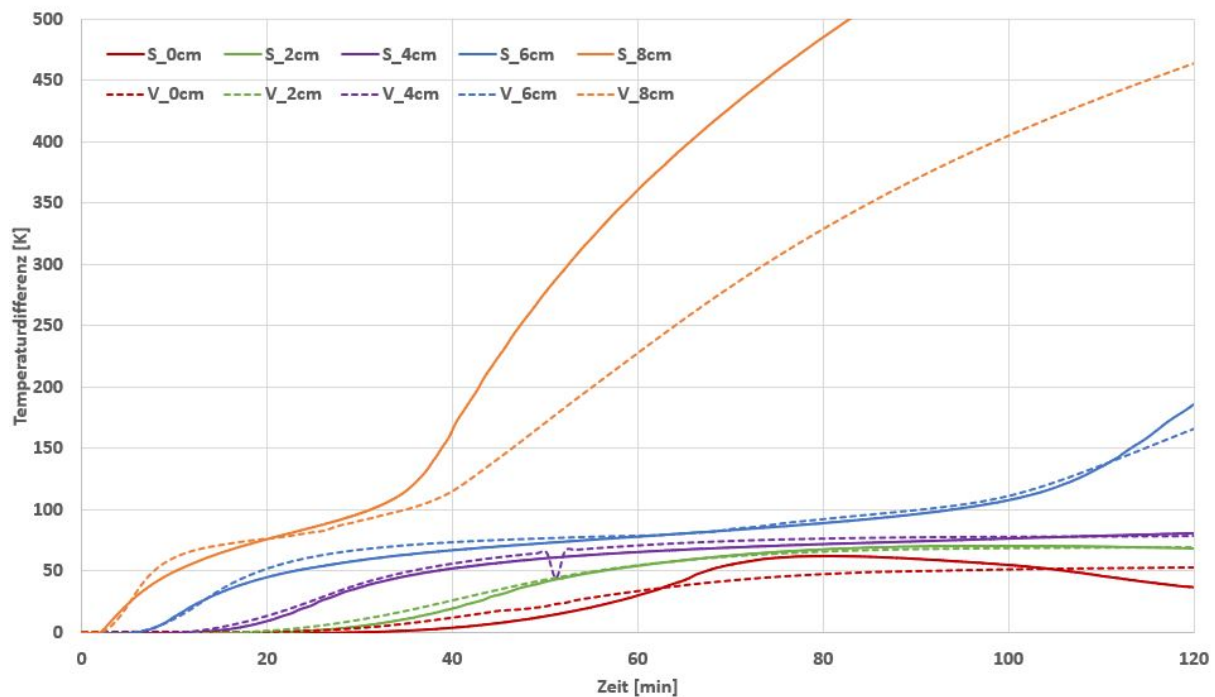


Abbildung 7.1: Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der Simulation und des Experiments (Erklärung siehe Text).

Aus den Verläufen ist gut zu erkennen, dass im inneren Bereich (bei 4, 6 und 8 cm) der Simulationsdomain eine sehr gute Übereinstimmung zum Experiment erreicht wurde. Der blaue, violette sowie grüne Verlauf zeigen einen nahezu identischen Temperaturverlauf über die gesamte Prüfdauer von 120 min. Es ist gut zu erkennen, wie die Temperaturen durch den diffusiven Transport sowie die Kondensation des Wasserdampfes in kühleren Gebieten in die Höhe getrieben werden, um sich danach bei einem Temperaturniveau von 100 °C einzufinden. Erst wenn das gesamte Wasser in den jeweiligen Gebiet wieder verdampft ist,

kann die Temperatur der Gipsstruktur die 100 °C überschreiten und der Aufheizvorgang weiter voranschreiten. Aus den Temperaturverlauf auf der Oberfläche umgebungsseitig ist zu erkennen, dass es zu Komplikationen kommt auf die noch genauer eingegangen wird.

## 7.2 Phasenwechsel

Zur genaueren Untersuchung des Phasenwechsel wurden auch die Volumsanteile von Wasserdampf und Wasser an den jeweiligen Messpunkten aufgezeichnet. Es wurde auch der Quellterm aufgezeichnet. In der Abbildung 7.2 ist die Summe des entstehenden Wasserdampfes in der gesamte Gips-Domain pro Zeitschritt aufgetragen. Hier sieht man, dass der Quellterm stark fluktuiert. Dies kann mit kleineren Zeitschritten etwas verbessert werden, hat jedoch in unserer Betrachtung keinen negativen Einfluss auf den Temperaturverlauf im Gips. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass der entstehende Wasserdampf nicht mit der Temperatur der jeweiligen Zelle in eben dieser entsteht, dadurch kommt es zu einer Abkühlung, die nicht der Realität entspricht, da das Kristallwasser die Temperatur besitzt, bei der es aus der Struktur gelöst wird. Dies kann auch zu Oszillationen beim Quellterm führen. Mit einem Energiequellterm könnte dieser Fehler behoben werden. Aufgrund der geringen Auswirkungen wurde jedoch auf diese Verfeinerung des Modells verzichtet.

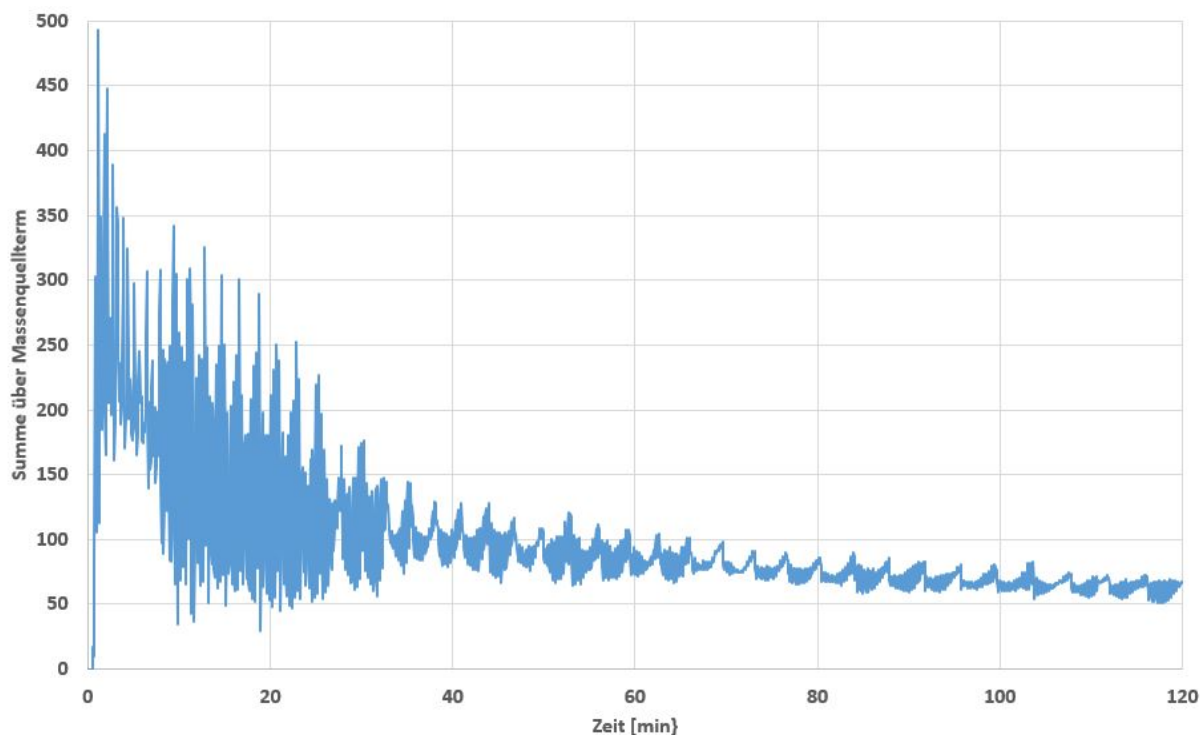


Abbildung 7.2: Zeitlicher Verlauf des Quellterms für Wasserdampf.

Auf der Abbildung 7.3 ist zu erkennen zu welchem Zeitpunkt der Wasserdampf in das jeweilige Gebiet des Gipses vorgedrungen ist. Der Volumsanteil des Wasserdampfes schwankt etwas, dies ist wiederum auf den stark schwankenden Quellterm von Wasserdampf zurückzuführen und könnte mit kleineren Zeitschritten geglättet werden. Da diese Schwankungen nicht in den Temperaturverlauf zu sehen sind, wurde hier keine Verkürzung der Zeitschritte vorgenommen, um die Rechendauer möglichst gering zu halten.

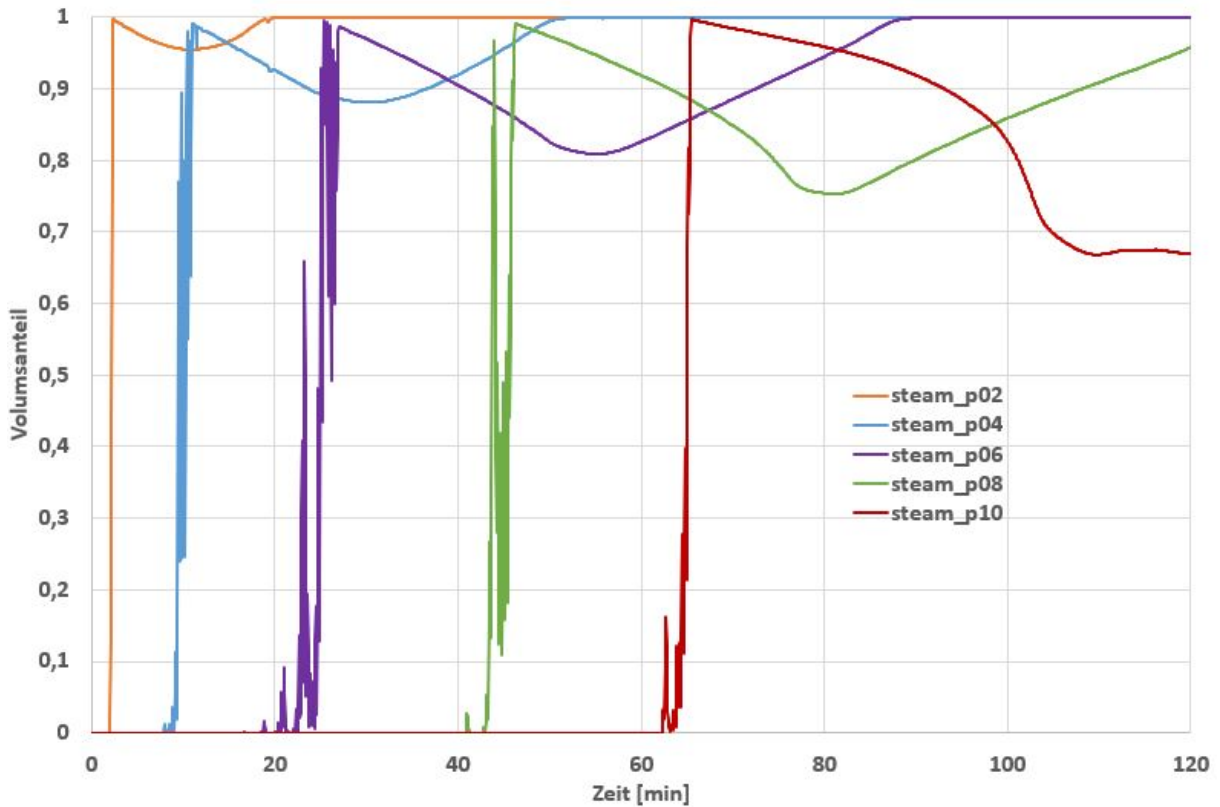


Abbildung 7.3: Verlauf des Volumensanteils von Wasserdampf an den verschiedenen Messstellen.

Es ist gut zu erkennen, dass zuerst ein Peak im Wasserdampf-Verlauf entsteht und danach der Dampfgehalt wieder etwas abnimmt. Diese Abnahme ist auf die lokale Kondensation zurückzuführen, wie man in Abbildung 7.4 sieht. In der Phase, in der Wasserdampf kondensiert, kann der Volumensanteil auch nicht eins erreichen. Hat der Phasenwechsel sein Maximum überschritten, so fängt auch die Anteil von Wasserdampf wieder an zu steigen, bis schlussendlich das gesamte Wasser verdampft ist. Ab diesem Zeitpunkt ist nur noch Wasserdampf in diesem Gebiet enthalten.

Ersichtlich wird bei Betrachtung der Temperaturverläufe aus Abbildung 7.1, dass der schnelle, fast exponentielle Anstieg der Temperatur immer ungefähr dann einsetzt, wenn der Wasserdampf dort angelangt ist und beginnt zu kondensieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die Temperatur in Abbildung 7.1 erst dann wieder zu steigen beginnt, wenn das Wasser in diesem Punkt wieder vollständig verdampft ist. Dies kann man auch gut am Volumensanteil von Wasserdampf sehen, wenn er eins wird, ist das gesamte Wasser wieder verdampft.

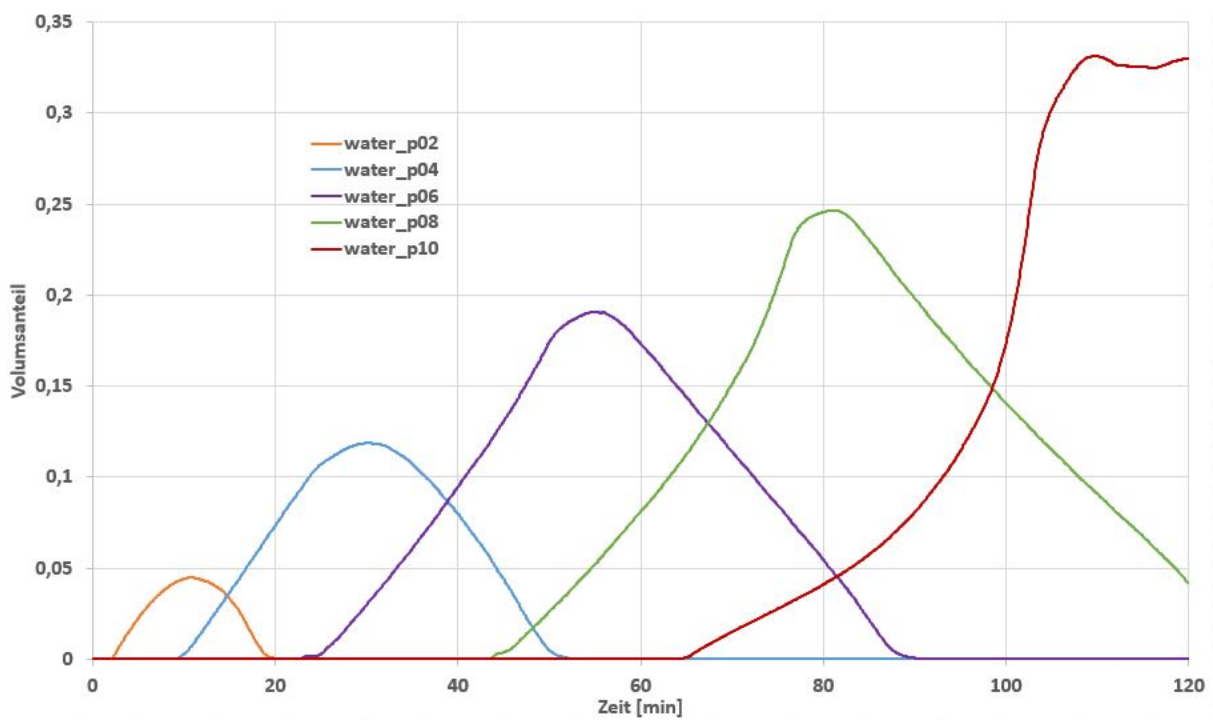


Abbildung 7.4: Verlauf des Volumensanteils von Wasser an den verschiedenen Messstellen.

Der letzte Messpunkt wurde 1 mm innerhalb gesetzt, da es hier zu starken Oberflächeneffekten kommt. An diesem Messpunkt kann man gut erkennen, dass hier mehr Wasser kondensiert. Aufgrund der Randbedingung, welche die Umgebungstemperatur wiedergibt, können hier die 100 °C nicht erreicht werden. Daher bleibt der Mischzustand erhalten. Es tritt jedoch ein Problem auf: Das Wasser sowie der Wasserdampf, der aus dem Gips austritt, bleiben in der Wechselwirkungszone und führen zu einer Wärmekopplung zwischen der Umgebungszone und dem Gips. Im realen Fall würde das Wasser auf der Oberfläche einen Wasserfilm bilden und der Dampf in der Wechselwirkungszone mit Luft vermischt beziehungsweise nicht eine konstante Dampfschicht erzeugen. Auch ist darauf hinzuweisen, dass sich beim Übergang von der porösen Zone auf die Wechselwirkungszone die Geschwindigkeit von Wasserdampf, Luft und Wasser abrupt stark verändert. Dies führt zu numerischen Problemen und dadurch zu einer reduzierten Genauigkeit in diesem Bereich. Durch die erhöhte Geschwindigkeit kommt es auch zu einem größeren konvektiven Wärmetransport sowie zu Rückströmungen von Luft, welche aufgrund des zu langsam austretenden Wasserdampfes aus der Gipszone entstehen. Die Luft aus der Umgebungszone hat 300 K und kühlt dadurch das Gebiet unnatürlich ab. Diese Effekte führen zu dem abweichenden Verhalten des letzten Aufzeichnungspunkts gegenüber den Punkten, die weiter in der Gipszone liegen.

### 7.3 Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten wurden auch in jedem Messpunkt aufgezeichnet. Aus der Abbildung 7.5 ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit des Wasserdampfes im Mittel ungefähr bei  $2 \text{ mm s}^{-1}$  liegt.

Aus Gleichung (6.47) und (6.48) sieht man, dass der viskose Widerstandsterm die inverse Permeabilität wiedergibt. In unseren Fall ist für Wasserdampf der viskose Widerstandsterm  $4e+10 \text{ m}^{-2}$ . Daraus folgt für Wasserdampf eine Permeabilität von  $2.5e-11 \text{ m}^2$  dies entspricht 100 Darcy.

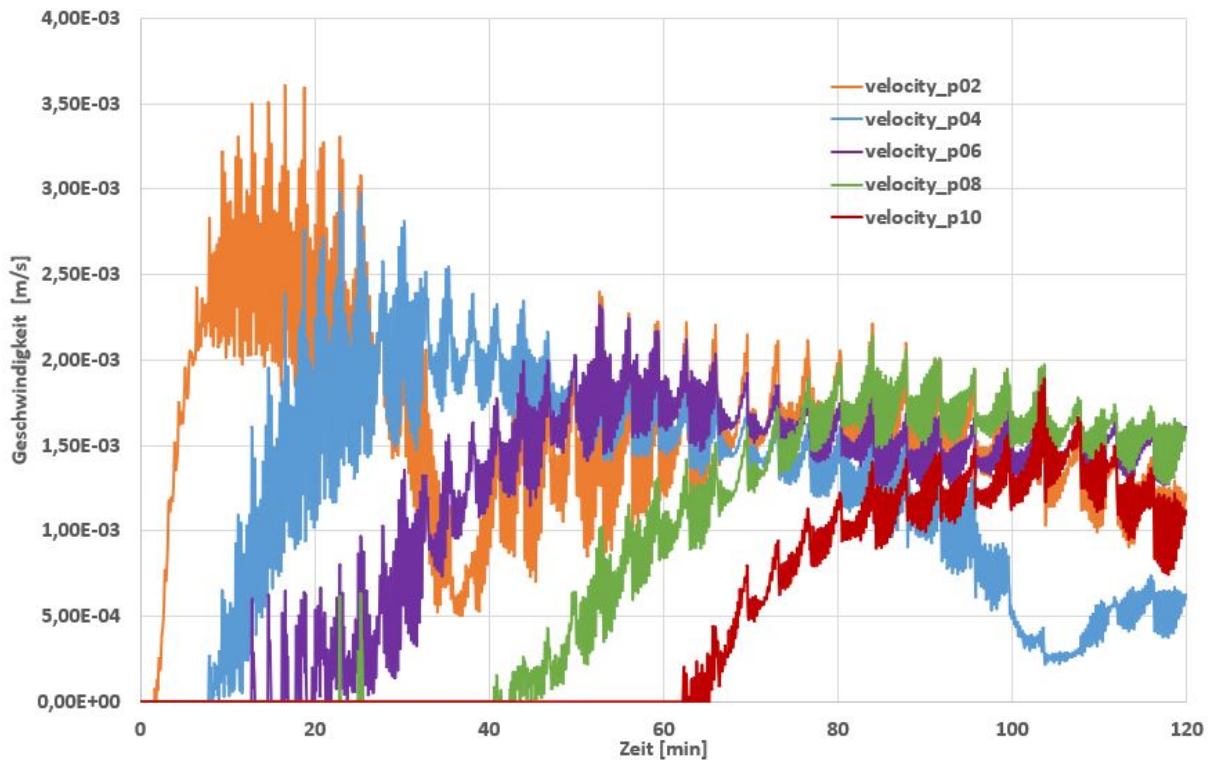


Abbildung 7.5: Verlauf der Geschwindigkeit des Wasserdampfes an den verschiedenen Messstellen.

Das Wasser hat eine um etwa eine Größenordnung geringere Geschwindigkeit als der Wasserdampf. Dies ist auch zu erwarten, da das Wasser in den Poren des Gipses haften bleibt. Dies ist auf Grund der hygroskopischen Eigenschaften von Gips. Jedoch wird das Wasser darüber hinaus leicht vom Wasserdampf bzw. der verdrängten Luft mitgerissen und dadurch kommt es zu einer langsamen Bewegung in Richtung der Umgebungsseite.

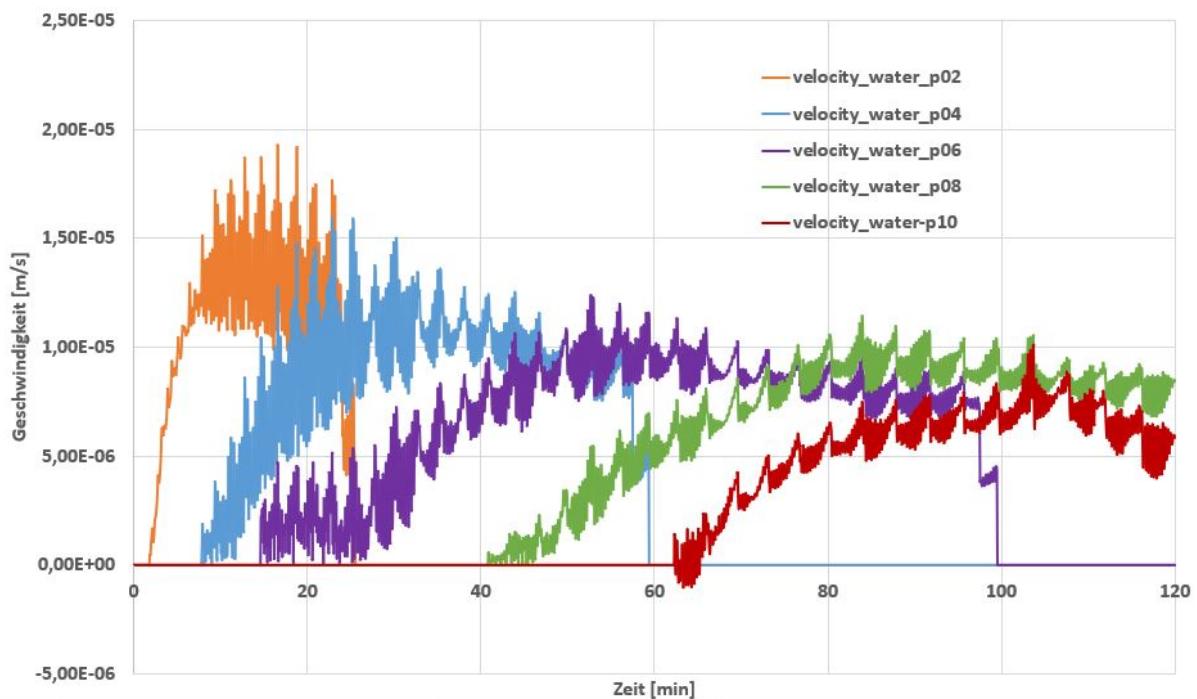


Abbildung 7.6: Verlauf der Geschwindigkeit des Wassers an den verschiedenen Messstellen.

Im letzten Messpunkt ist wieder die umgebungsseitige Instabilität der Lösung zu erkennen. Es kommt zu einem Rückfluss des Wassers in Richtung Feuerseite, was physikalisch nicht zu erwarten wäre.

## 7.4 Volumenströme

In Abbildung 7.7 sieht man den zeitlichen Verlauf des Volumenintegrals der gesamten Rechendomains. Diese zeigt, wie die Luft nach und nach aus dem Gips durch den Wasserdampf verdrängt wird. Der Volumensanteil von Wasser wird auch kontinuierlich mehr, flacht jedoch bei ca. 80 min etwas ab. Die Schwankungen sind wieder auf den Quellterm zurückzuführen.

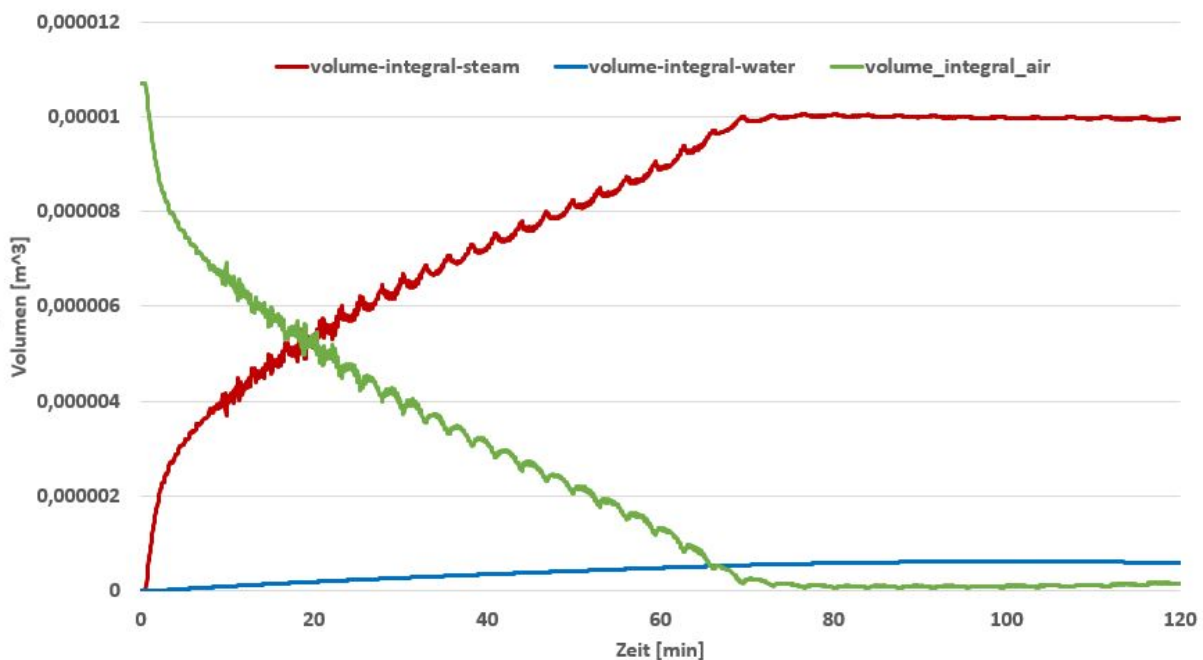


Abbildung 7.7: Verlauf des Volumsintegrals über die gesamte Rechendomains.

Im Verlauf des Volumenstroms in Richtung des Feuers, siehe Abbildung 7.8, sieht man das zu Beginn noch Luft aus dem Gips gedrückt wird. Diese wird jedoch schnell von dem stark dominierenden Wasserdampf abgelöst. Wasser kann feuerseitig nicht ausströmen, da dort die Temperaturen so hoch sind, dass dieses sofort verdampfen würde. Hier kann man auch anmerken, dass es durch Massenstrom in Richtung Feureseite zu einer Abkühlung der Ofentemperatur in der Grenzschicht zum Gips kommen kann. Dies ist in dieser Simulation nicht berücksichtigt und könnte eine Ursache dafür sein, dass die Temperaturen an den Messpunkten in 8 cm Tiefe, wie man in Abbildung 7.1 gut sehen kann, im Vergleich zum Experiment zu hoch werden.

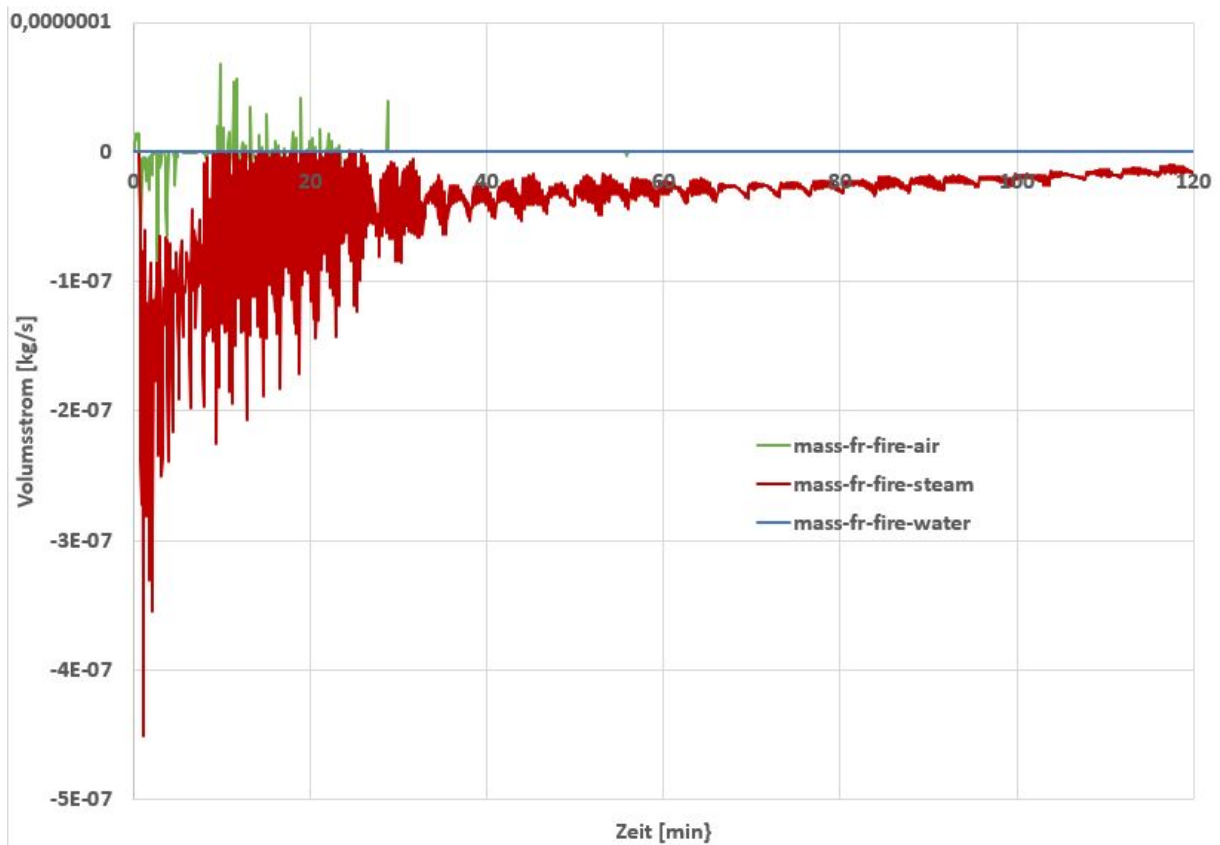


Abbildung 7.8: Verlauf des Volumenstroms in die Brennkammer.

Im Verlauf des Volumenstroms in Richtung Umgebung, siehe Abbildung 7.9, sieht man, dass in den ersten 70 min nur Luft in die Umgebung transportiert wird. Man sieht auch, dass der Volumenstrom sehr stark fluktuiert und es zu Rückströmungen kommt. Diese ist wieder auf den stark schwankenden Quellterm sowie auf die Probleme in der Grenze Gips-Wechselwirkungszone zurückzuführen. Ab etwa Minute 70 kommt es dann zum Ausströmen von Wasserdampf und Wasser, wobei Wasser dies stark dominiert. In der Realität bildet sich jedoch ein so stark ausgeprägter Kondensationsfilm auf der Oberfläche, da der Großteil des Wasserdampfes erst in der Luft kondensiert und sich dort verteilt und somit nicht in der Wechselwirkungszone verweilt. Dies führt, wie bereits erwähnt, zu den schwankenden Temperaturen in der Simulation, siehe Abbildung 7.1, an der Oberfläche des Gips.

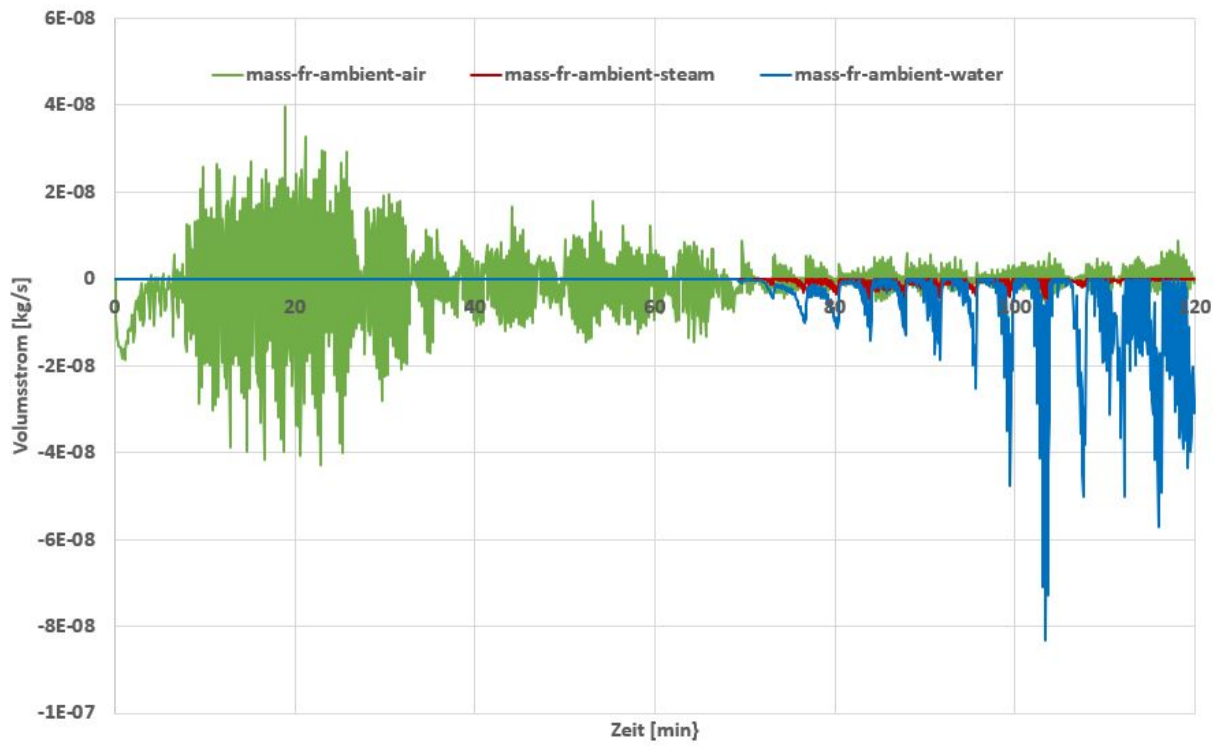


Abbildung 7.9: Verlauf des Volumenstromes in die Umgebung.



# Kapitel 8

## Diskussion und Ausblick

Das Ziel, die Simulation des Wärmetransportes durch Gips, wurde in der Mitte der Dielen erreicht. In der Simulation wurde Gips als poröse Struktur betrachtet und der Phasenübergang des ausgasenden Wasserdampfes sowie der Dampfdiffusion wurden berücksichtigt. Das in ANSYS verfügbare Modell der porösen Medien in Verbindung mit dem Euler-Euler Modell zur Betrachtung des Mehrphasenphänomens hat eine ausreichend genaue und stabile Simulation gewährleistet.

Die Temperaturverläufe im Gips konnten sehr gut nachgebildet werden. Es konnten auch Informationen über die Geschwindigkeit des Wasserdampfes sowie des Wassers aus der Simulation gewonnen werden, die in einem zukünftigen Experiment überprüft werden können. Zudem wurden die Massenströme in die Feuerseite aufgezeichnet und können in einer Ofensimulation als Randbedingung eingebunden werden und somit auch die Kühlung der Ofenatmosphäre durch den Wasserdampf simuliert werden und mit Experimenten verglichen werden.

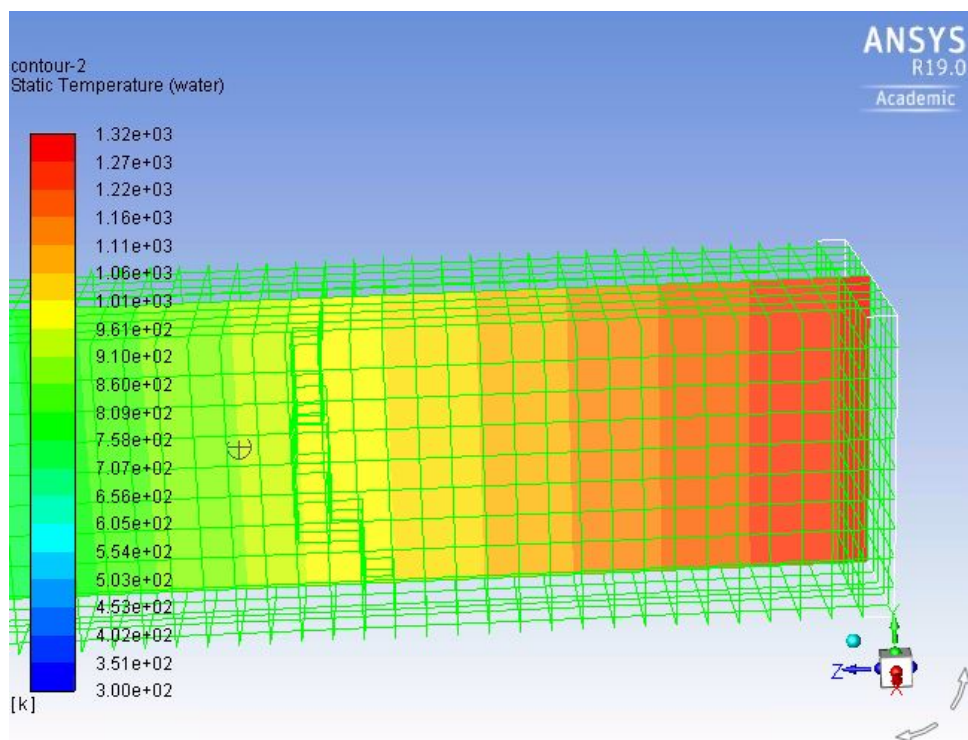


Abbildung 8.1: Detailansicht der Temperaturverhältnisse auf der Feuerseite am Ende der Simulation.

Die Randgebiete wurden in diesen Simulationen noch nicht ausreichend genau wiederge-

geben. Es kommt zu starken Geschwindigkeitsgradienten sowie Temperaturgradienten in der Grenzschicht zwischen Gips und Umgebung/Brennraum, welche die Lösung negativ beeinflussen. Dies kann man in den Abbildungen 8.1, 8.2 und 8.3 gut erkennen. Es könnte zu Verbesserungen der Simulation kommen, wenn in den Randbereichen noch der Strahlungsverlust mitberücksichtigt werden würde. Dies wird im Zuge einer Fortsetzung dieser Forschungsarbeit bereits umgesetzt.

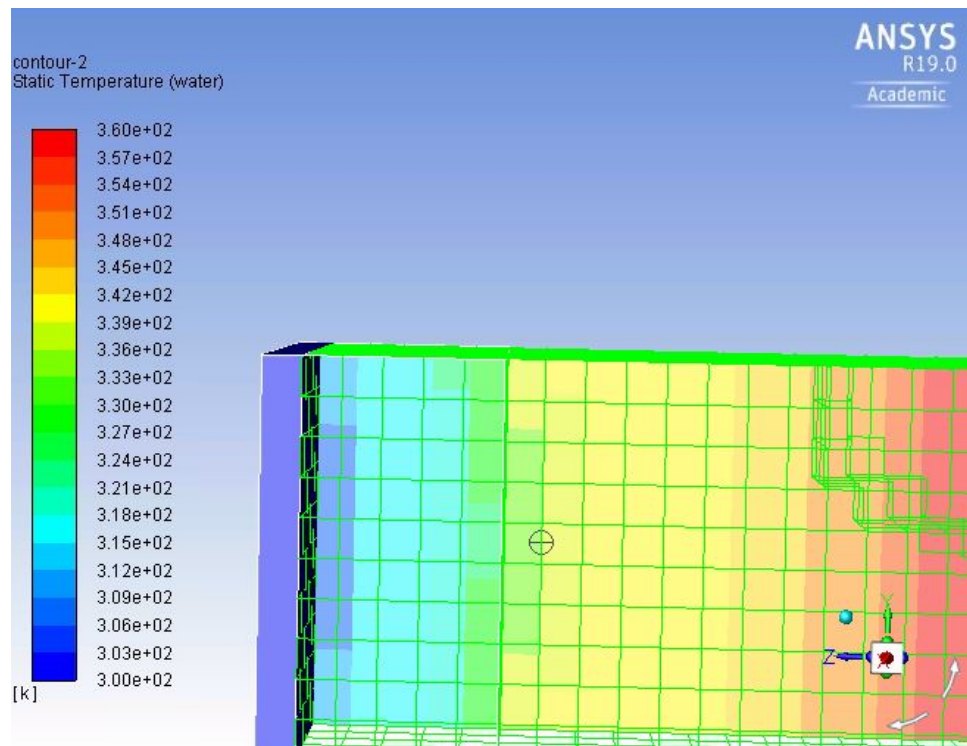


Abbildung 8.2: Detailansicht der Temperaturverhältnisse auf der Umgebungsseite am Ende der Simulation.

Es ist auch zu erwähnen, dass die Randgebiete experimentell nochmals genauer untersucht werden sollten. Es sollten in zukünftigen Evaluierungsexperimenten Thermoelemente auf der Oberfläche auch innerhalb des Ofens aufgeklebt werden. Weiters sollten in etwa 1 mm Tiefe ein Thermoelemente eingesetzt werden. Von großen Interesse wäre auch, die Temperaturen in etwa 5 mm Abstand zu messen. Bei der Verkabelung der Thermoelemente sollte zukünftig darauf geachtet werden, dass die Kabel nicht direkt nach hinten aus dem Gips verlegt werden, sondern quer auf die Seite und dann erst aus dem Gips herauskommen. So könnten thermische Kopplungen und unerwünschte Temperaturverluste durch die Drähte verhindert werden, was die Genauigkeit der Messung erhöhen würde. Es könnten auch noch Feuchtigkeitssensoren in den Gips verbaut werden, damit die Geschwindigkeiten in der Gipsstruktur experimentell überprüft werden können.

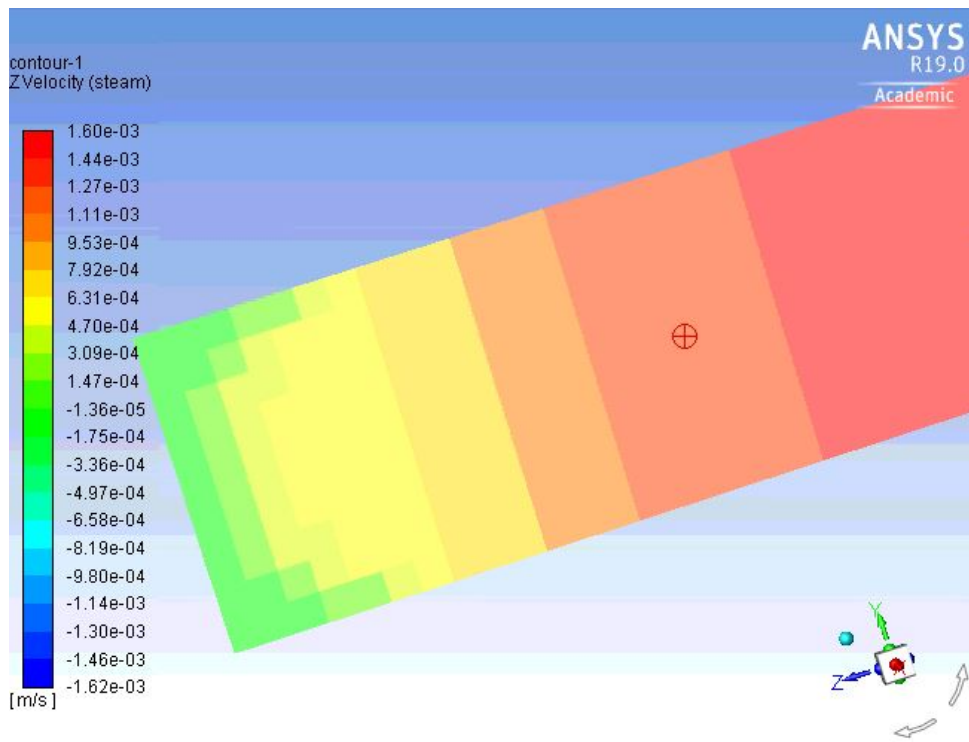


Abbildung 8.3: Detailansicht der Geschwindigkeit in Durchflussrichtung auf der Umgebungsseite am Ende der Simulation.

Ein wichtiger Ausblick dieses Ergebnisses ist die Einbindung der Gipssimulation mit den empirisch gefundenen Stoffparametern in eine Bauteilsimulation, in der Gips als Baustoff verbaut wurde. Dies wird im Rahmen des Projektes "Rechnen statt messen", wie bereits im Kapitel 2 "Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit" erläutert, durchgeführt werden. Es wurde des Weiteren ein wichtiger Grundstein dafür gelegt, wie man zukünftig Materialien, welche Wasser in gebundener Form enthalten, in einer Brandsimulation behandeln kann. Es müssen natürlich für jedes Material die experimentellen Stoffdaten neu erhoben werden, jedoch wurde im Rahmen dieser Arbeit die Vorgehensweise ausgearbeitet. Auch die Simulationsparameter müssen für jedes Material neu kalibriert werden. Jedoch wurde gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, den Wärmetransport durch ein poröses Medium in Kombination mit einem Mehrphasenphänomen numerisch zu simulieren.

# Kapitel 9

## Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit, den Wärmetransport durch Gips numerisch zu simulieren, wurde erreicht. Wie in Abbildung 9.1 gut zu sehen ist, können die Temperaturverläufe im inneren der Gipsstruktur sehr gut nachgebildet werden. Somit ist der Grundstein für weitere Materialanalysen mit der Software ANSYS Fluent gelegt. Auch wird das Ergebnis dieser Arbeit in größere Bauteilsimulation eingebaut werden, um als Ziel die Genauigkeit dieser zu erhöhen.

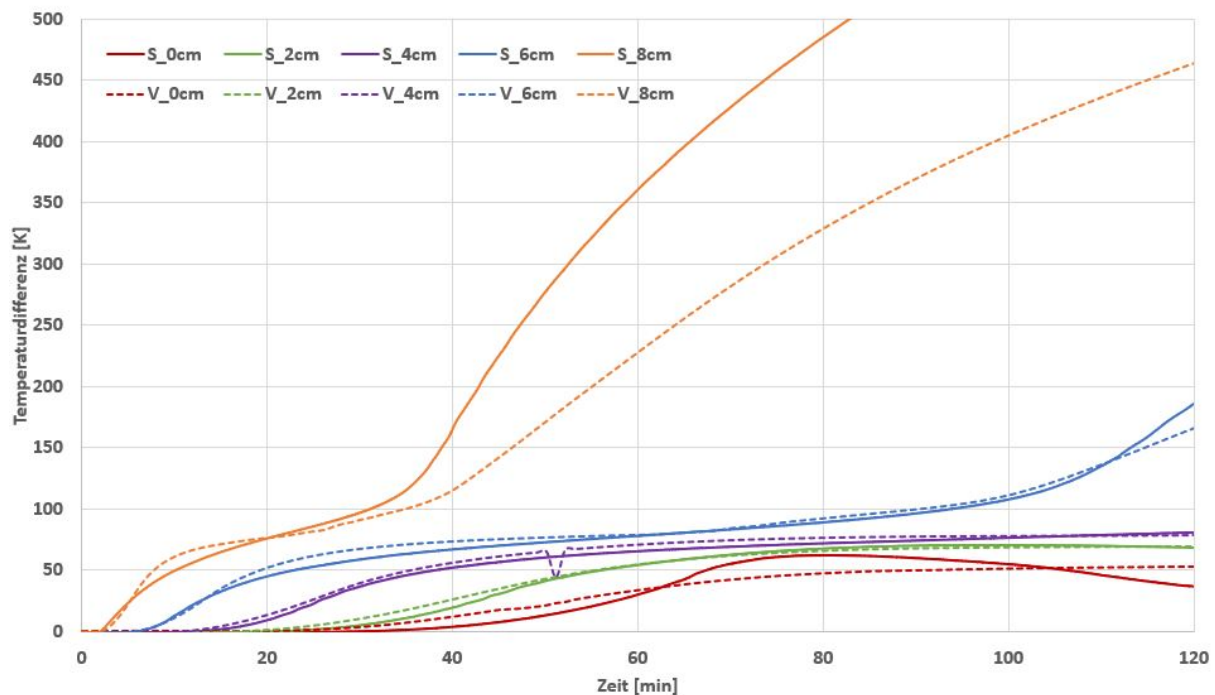


Abbildung 9.1: Temperaturverlauf der Simulation im Vergleich zum Experiment.

Eine Verbesserung der Simulation kann im Wesentlichen durch eine genauere Analyse der Grenzschicht und Oberflächen Phänomene erarbeitet werden. Als Ausblick wird hier erwähnt, dass noch in diesem Forschungsprojekt die Wärmestrahlung in das Modell implementiert wird, welche zu einer erhöhten Genauigkeit führen könnte. Auch kann die Kühlung der Ofentemperatur durch den ausgasenden Wasserdampf mitberücksichtigt werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] A. E. Cote, *Fire protection handbook*, vol. 1. NationalFireProtectionAssoc, 2008.
- [2] E. DIN, “1363-1: 2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen–teil 1: Allgemeine anforderungen,” *Deutsche Fassung EN*, pp. 1363–1, 2012.
- [3] M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr, K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. M. Watts Jr, C. J. WIECZOREK, *et al.*, *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015.
- [4] A. E. Cote, *Fire protection handbook*, vol. 2. NationalFireProtectionAssoc, 2008.
- [5] B. der Gipsindustrie eV, “Gips-datenbuch,” *Bundesverband der Gipsindustrie eV, Darmstadt, Germany*, 2003.
- [6] J. R. Mehaffey, P. Cuerrier, and G. Carisse, “A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire,” *Fire and Materials*, vol. 18, no. 5, pp. 297–305, 1994.
- [7] K. Ghazi Wakili, E. Hugi, L. Wullschleger, and T. Frank, “Gypsum board in fire — modeling and experimental validation,” *Journal of Fire Sciences - J FIRE SCI*, vol. 25, pp. 267–282, 05 2007.
- [8] NETZSCH-Gerätebau GmbH, *Funktionsprinzip einer Wärmestrom-DSC*.
- [9] K. Ghazi Wakili, M. Koebel, T. Glaettli, and M. Hofer, “Thermal conductivity of gypsum boards beyond dehydration temperature,” *Fire and Materials*, vol. 39, no. 1, pp. 85–94, 2015.
- [10] N.-G. GmbH, *Funktionsprinzip Dilatometer*.
- [11] W. Parker, R. Jenkins, C. Butler, and G. Abbott, “Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity,” *Journal of applied physics*, vol. 32, no. 9, pp. 1679–1684, 1961.
- [12] N.-G. GmbH, *Prinzip der LFA-Methode*.
- [13] N. Standard, “En 60584-1: “thermoelectric couples–first part (reference tables)”,” 1996.
- [14] R. Langbauer, “Numerische simulation des wärmetransportes durch gips,” diplomarbeit, Technische Univerität Graz, 2019.
- [15] R. Prieler, P. Kitzmüller, S. Thumser, G. Schwabegger, E. Kaschnitz, and C. Hochenauer, “Experimental analysis of moisture transfer and phase change in porous insulation exposed to fire and its effect on heat transfer,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 160, p. 120207, 2020.

- [16] F. Draft prEN, “13501-1: Fire classification of construction products and building elements.”
- [17] J. H. Ferziger and M. Peric, *Numerische Strömungsmechanik*. Springer-Verlag, 2008.
- [18] A. Fluent *et al.*, “Ansys fluent theory guide,” *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, pp. 724–746, 2011.
- [19] K. Stephan and A. Laesecke, “The thermal conductivity of fluid air,” *Journal of physical and chemical reference data*, vol. 14, no. 1, pp. 227–234, 1985.
- [20] H.-J. Kretschmar and W. Wagner, *International Steam Tables*. Springer, 2019.