

Benjamin Ortner, BSc

# Numerische Berechnung der thermischen Verformung von Ziegel- und Leichtbauwänden bei Feuerwiderstandsprüfungen

## Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Dipl.-Ing.

Studienrichtung: Maschinenbau

## Technische Universität Graz

Betreuer

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René Prieler

Beurteiler:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer

Institut für Wärmetechnik

Institutsleitung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer

Graz, März 2021

This document is set in Palatino, compiled with pdfL<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>2</sub>ε and Biber.

The L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X template from Karl Voit is based on KOMA script and can be found online:  
<https://github.com/novoid/LaTeX-KOMA-template>

---

## Eidesstattliche Erklärung<sup>1</sup>

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum

---

Unterschrift

---

<sup>1</sup>Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008



# Kurzfassung

**Titel:** Numerische Berechnung der thermischen Verformung von Ziegel- und Leichtbauwänden bei Feuerwiderstandsprüfungen

**Autor:** Benjamin Ortner, BSc

1. Stichwort: Brandschutz
2. Stichwort: Ziegelwand
3. Stichwort: Leichtbauwand

Noch immer kommt es zu Feuerausbrüchen, die teils Menschenleben, aber auf jeden Fall hohe Sachschäden verursachen. Die Entwicklung von Brandschutzelementen, wie z. B. Brandschutztüren, welche die Feuerausbreitung eingrenzen sollen, ist daher bis heute von großer Bedeutung.

Die Tauglichkeit neu entwickelter Brandschutzelemente wird mit sogenannten Feuerwiderstandsprüfungen nachgewiesen, bei denen das Prüfobjekt einer genormten thermischen Belastung ausgesetzt wird. Versuche dieser Art sind allerdings mit großem Zeit-, Material-, Personal- und damit finanziellem Aufwand verbunden. Somit besteht Interesse an der Virtualisierung, d. h. der numerischen Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen.

Bisherige Untersuchungen in diesem Bereich haben gezeigt, dass die Einbettung der Prüfobjekte in ihre Montagewände einen relevanten Einfluss auf die zu erwartenden Verformungen hat. Mit dieser Arbeit wurden Berechnungsmodelle für die thermische Deformation von Wänden mit eingebautem Prüfobjekt, hier einer Brandschutztür, entwickelt. Diese sollen in weiterer Folge zu einer besseren Übereinstimmung der virtuellen Feuerwiderstandsprüfungen mit den Realversuchen führen. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in die zwei großen Teilbereiche der Ziegel- und Leichtbauwände (Trockenbauwände). Beide Varianten wurden mit je drei Unterkonfigurationen – Tür links, mittig und rechts eingebaut – modelliert. Bei den Simulationen handelt es sich um thermisch-mechanisch gekoppelte Finite-Elemente-Simulationen.

Die Relationen der Messpunktverschiebungen wurden überwiegend korrekt berechnet. Auch die Orte mit den maximalen Verformungen konnten durch die Simulationsmodelle realistisch nachgebildet werden. So liegt bei den Ziegelwänden eine ausgeprägte maximale Verformung auf halber Türhöhe vor, bei den Leichtbauwänden hingegen erfährt die Türoberkante eine ähnlich große Deformation. Demnach dominiert bei Ziegelwänden

---

die mechanische Last der Türe. Für Leichtbauwände hingegen ist auch die thermische Deformation der verbauten Stahlprofile von großer Bedeutung.

Trotz Unsicherheiten und Schwierigkeiten bei der Modellierung, wie der Wahl von Stoffdaten und Randbedingungen, konnten somit sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Berechnungsergebnisse im Vergleich zu bereits vorhandenen Messergebnissen erreicht werden.

# Abstract

**Title:** Numerical simulation of the thermal deformation of brick walls and gypsum-sheathed stud walls during fire resistance tests

**Author:** Benjamin Ortner, BSc

1<sup>st</sup> keyword: Fire safety

2<sup>nd</sup> keyword: Brick wall

3<sup>rd</sup> keyword: Drywall

Even today, major fires occur regularly, sometimes causing loss of life, but in any case high property damage. The development of fire protection components, such as fire doors, which are designed to limit the spread of fire, is therefore still of high importance.

The suitability of these newly developed fire protection components is proven with fire resistance tests in which the test specimen is subjected to a standardized thermal load. However, these tests require a great deal of time, material, personnel, and thus financial effort. Due to these issues, there is interest in virtualization, i.e., the numerical simulation of fire resistance tests.

Previous investigations in this field have shown that the embedding of the test objects in their mounting walls has a relevant influence on the thermal deformation. The aim of this work is to develop a model for the thermal deformation of brick walls and gypsum-sheathed stud walls (drywalls), which should subsequently lead to a better agreement between the virtual fire resistance tests and the real tests. The thesis is divided into two major sections considering brick walls and drywalls. Both variants were modeled with three sub-configurations each (fire door installed on the left, in the center and on the right). The numerical calculations are one-way coupled thermo-mechanical finite element simulations.

The relations of the displacements of some available measurement data points were mainly calculated correctly. The locations where the deformation reaches its maximum could also be realistically identified by the simulation models. For the brick walls, the maximum deformation is approximately at half the door height, whereas the top edge of the door experiences a similarly large deformation for the stud walls. Therefore, it can be estimated that the thermal deformation of the steel profiles is significant for the deformation of the drywall, whereas the deformation of the brick walls is dominated by the mechanical load of the test specimen (fire door).

---

Despite uncertainties on material properties and the influence of the boundary conditions, it was possible to achieve both qualitatively and quantitatively good calculation results in comparison to the measured deformation.

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz. Besonders bedanken möchte ich mich beim Institutsvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit. Dabei hatte ich die Gelegenheit, viel Neues zu lernen und anzuwenden.

Ebenso großer Dank gilt dem Betreuer meiner Arbeit, Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc René Prieler, der stets erreichbar war und mit ausgezeichneten Ratschlägen weiterhelfen konnte.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mit ihrer großartigen Unterstützung dieses Studium erst ermöglicht haben. Auch bei meiner Freundin möchte ich mich für ihre motivierenden Worte und ihre Hilfe in der finalen Phase meiner Ausbildung bedanken.

Graz, im März 2021

Benjamin Ortner



# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Kurzfassung</b>                                       | <b>v</b>    |
| <b>Abstract</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>Vorwort</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>Nomenklatur</b>                                       | <b>xiii</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                             | <b>xvii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                      | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation . . . . .                                 | 1           |
| 1.2 Aufgabenstellung . . . . .                           | 3           |
| 1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .                          | 4           |
| <b>2 Grundlagen</b>                                      | <b>7</b>    |
| 2.1 Brandschutzprüfungen . . . . .                       | 7           |
| 2.1.1 Allgemeine Anforderungen . . . . .                 | 7           |
| 2.1.2 Beurteilung des Bauteilverhaltens . . . . .        | 9           |
| 2.2 Wandkomponenten . . . . .                            | 10          |
| 2.2.1 Ziegel . . . . .                                   | 10          |
| 2.2.2 Stürze . . . . .                                   | 12          |
| 2.2.3 Profile . . . . .                                  | 12          |
| 2.2.4 Gipskartonverkleidung . . . . .                    | 13          |
| 2.3 Physikalische und mathematische Grundlagen . . . . . | 14          |
| 2.3.1 Wärmetransport . . . . .                           | 14          |
| 2.3.2 Thermische Expansion . . . . .                     | 16          |
| 2.3.3 Multiple Regression . . . . .                      | 17          |
| 2.4 Materialverhalten relevanter Werkstoffe . . . . .    | 19          |
| 2.4.1 Gebrannter Ton . . . . .                           | 19          |
| 2.4.2 Mauermörtel . . . . .                              | 21          |
| 2.4.3 Beton . . . . .                                    | 23          |
| 2.4.4 Gips . . . . .                                     | 24          |
| 2.4.5 Stahl . . . . .                                    | 26          |
| 2.4.6 Mineralwolle . . . . .                             | 30          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>Numerische Verfahren</b>   | <b>31</b> |
| 3.1      | Computational Fluid Dynamics (CFD) . . . . .                            | 31        |
| 3.2      | Finite-Elemente-Methode (FEM) . . . . .                                 | 31        |
| 3.2.1    | Grundlagen . . . . .  | 31        |
| 3.2.2    | Nichtlinearitäten . . . . .   | 34        |
| 3.2.3    | Thermische Expansion . . . . .  | 37        |
| 3.2.4    | Numerische Simulation von Wärmetransport . . . . .                      | 37        |
| <b>4</b> | <b>Versuchswände und Messergebnisse</b>                                 | <b>41</b> |
| 4.1      | Prüfofen . . . . .  | 41        |
| 4.1.1    | Versuchsablauf . . . . .  | 41        |
| 4.1.2    | Messeinrichtungen . . . . .   | 42        |
| 4.2      | Prüfobjekt - Tür mit Zarge . . . . .                                    | 44        |
| 4.3      | Aufbau der Ziegelwand im Versuch . . . . .                              | 45        |
| 4.3.1    | Messergebnisse . . . . .  | 45        |
| 4.3.2    | Schlussfolgerungen für die Modellbildung . . . . .                      | 50        |
| 4.4      | Aufbau der Leichtbauwände im Versuch . . . . .                          | 51        |
| 4.4.1    | Messergebnisse . . . . .  | 51        |
| 4.4.2    | Schlussfolgerungen für die Modellbildung . . . . .                      | 56        |
| <b>5</b> | <b>Modellbildung</b>  | <b>57</b> |
| 5.1      | Wärmeübertragung auf die Wände . . . . .                                | 58        |
| 5.1.1    | Schon bestehendes CFD-Modell des Versuchsofens . . . . .                | 58        |
| 5.1.2    | Vereinfachungen für die Temperaturfeldberechnung . . . . .              | 58        |
| 5.2      | Temperaturen im Prüfobjekt . . . . .                                    | 60        |
| 5.3      | FEM-Modell der Ziegelwand . . . . .                                     | 61        |
| 5.3.1    | Wärmetransport . . . . .  | 61        |
| 5.3.2    | Netzgitter für die drei Einbausituationen der Türe . . . . .            | 62        |
| 5.3.3    | Überprüfung der Wärmetransportrechnung mittels Referenzmodell . . . . . | 63        |
| 5.3.4    | Temperaturfeld als Polynom mittels MATLAB Curvefit . . . . .            | 64        |
| 5.3.5    | Kontakte zwischen den Ziegeln (Testsimulation) . . . . .                | 66        |
| 5.3.6    | Hohlräume und Mörtelschicht (Testsimulationen) . . . . .                | 67        |
| 5.3.7    | Randbedingungen (Testsimulationen) . . . . .                            | 69        |
| 5.3.8    | Kontakte . . . . .  | 72        |
| 5.4      | FEM-Modell der Leichtbauwand . . . . .                                  | 73        |
| 5.4.1    | Netzgitter für die drei Einbausituationen der Türe . . . . .            | 75        |
| 5.4.2    | Wärmetransport . . . . .  | 76        |
| 5.4.3    | Verformungsmodellierung . . . . .                                       | 77        |
| 5.4.4    | Randbedingungen . . . . .   | 78        |
| 5.4.5    | Kontakte . . . . .  | 79        |
| 5.5      | Zusammenfassung . . . . .   | 80        |
| <b>6</b> | <b>Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung</b>                   | <b>81</b> |
| 6.1      | Wärmetransport durch die Ziegelwand . . . . .                           | 81        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.2      | Verformung . . . . .  | 84         |
| 6.2.1    | Verformungsverhalten der kalten Wand aufgrund der Türtemperatur             | 84         |
| 6.2.2    | Verformungsverhalten der heißen Wand ohne Tür . . . . .                     | 84         |
| 6.2.3    | Kombination von Wand- und Türtemperaturfeld . . . . .                       | 87         |
| 6.3      | Weitere Anwendungsfälle des Ziegelwandmodells . . . . .                     | 91         |
| 6.3.1    | Ziegelwand mit Tür links . . . . .  | 91         |
| 6.3.2    | Ziegelwand mit Tür rechts . . . . .   | 95         |
| 6.4      | Fazit . . . . .   | 95         |
| 6.5      | Korrektur der Rahmensteifigkeit für die Ziegelwand mit Tür mittig . . . . . | 99         |
| <b>7</b> | <b>Simulationsergebnisse der Leichtbauwandverformung</b>                    | <b>103</b> |
| 7.1      | Wärmetransport durch die Leichtbauwand . . . . .                            | 103        |
| 7.2      | Verformung . . . . .  | 103        |
| 7.2.1    | Verformungsverhalten der kalten Wand aufgrund der Türtemperatur             | 104        |
| 7.2.2    | Verformungsverhalten der heißen Wand ohne Tür . . . . .                     | 104        |
| 7.2.3    | Kombination von Wand- und Türtemperaturfeld . . . . .                       | 106        |
| 7.3      | Weitere Anwendungsfälle des Leichtbauwandmodells . . . . .                  | 110        |
| 7.3.1    | Leichtbauwand mit Tür links . . . . .                                       | 110        |
| 7.3.2    | Leichtbauwand mit Tür rechts . . . . .                                      | 114        |
| <b>8</b> | <b>Diskussion</b>   | <b>119</b> |
| 8.1      | Gegenüberstellung Leichtbauwand - Ziegelwand . . . . .                      | 119        |
| 8.2      | Unsicherheiten in der Modellbildung . . . . .                               | 120        |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>121</b> |
|          | <b>Anhang</b>   | <b>122</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>126</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>130</b> |
|          | <b>Literatur</b>  | <b>131</b> |



# Nomenklatur

| Symbol                        | Beschreibung                          | Einheit     |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| <i>Lateinische Buchstaben</i> |                                       |             |
| $a$                           | Beschleunigung                        | $m/s^2$     |
| $\mathbf{C}$                  | Elastizitätstensor                    |             |
| $c$                           | spezifische Wärmekapazität            | $J/kgK$     |
| $E$                           | Elastizitätsmodul                     | $MPa$       |
| $\vec{f}$                     | Volumenkraftdichte                    | $N/m^3$     |
| $I$                           | Strahlungsintensität                  | $W/m^2Sr.a$ |
| $K_T$                         | Tangentensteifigkeitsmatrix           |             |
| $l$                           | Länge                                 | $m$         |
| $N$                           | Ansatzfunktion (FEM)                  |             |
| $Q$                           | Wärmemenge                            | $J$         |
| $\dot{Q}$                     | Wärmestrom                            | $W$         |
| $\dot{q}$                     | Wärmestromdichte                      | $W/m^2$     |
| $R$                           | Residuum                              |             |
| $R^2$                         | Bestimmtheitsmaß (Regression)         |             |
| $\mathbf{S}$                  | Spannungstensor                       |             |
| $T$                           | Absolute Temperatur                   | $K$         |
| $t$                           | Temperatur                            | $C$         |
| $\mathbf{u}$                  | Verschiebung (allgemein)              | $mm$        |
| $W$                           | Gewichtungsfunktion (FEM)             |             |
| $x$                           | Weg                                   | $m$         |
| <i>Griechische Buchstaben</i> |                                       |             |
| $\alpha$                      | Absorptionsgrad                       |             |
| $\alpha_K$                    | Wärmeübergangskoeffizient (konvektiv) | $W/m^2K$    |
| $\alpha_{th}$                 | thermischer Ausdehnungskoeffizient    | $1/K$       |
| $\lambda$                     | Wärmeleitfähigkeit                    | $W/mK$      |
| $\epsilon$                    | Emissionsgrad                         |             |
| $\epsilon_V$                  | Verzerrungstensor                     |             |
| $\rho$                        | Dichte                                | $kg/m^3$    |
| $\tau$                        | Zeit                                  | $s$         |

---

| <b>Symbol</b> | <b>Beschreibung</b>                | <b>Einheit</b> |
|---------------|------------------------------------|----------------|
| $\tau$        | Transmissionsgrad                  |                |
| $\nu$         | Querkontraktionszahl               |                |
| $\phi$        | Sichtfaktor                        |                |
| $\Phi$        | Vektor unbekannter Parameter (FEM) |                |
| $\Psi$        | Vektor der Randbedingungen (FEM)   |                |
| $\Delta$      | Elementgröße                       | <i>mm</i>      |
| $\sigma$      | Stefan-Boltzmann Konstante         | $W/m^2K^4$     |

---

# Abkürzungsverzeichnis

| Symbol | Beschreibung                  |
|--------|-------------------------------|
| AR     | Aspect Ratio                  |
| CFD    | Computational Fluid Dynamics  |
| ETK    | Einheitstemperaturkurve       |
| FEM    | Finite Elemente Methode       |
| FVM    | Finite Volumen Methode        |
| RTE    | Ray Transfer Equation         |
| S2S    | Surface To Surface            |
| TEC    | Thermal expansion coefficient |
| UDF    | User Defined Function         |



# 1 Einleitung

Um die Widerstandsfähigkeit von Feuerschutzeinrichtungen wie Toren, Wänden, Brandschutzisolationen, Abschottungseinrichtungen und Brandschutztüren nachzuweisen, werden sogenannte Feuerwiderstandsprüfungen durchgeführt. Dabei werden die Prüfkörper in einem Versuch einer genormten thermischen Belastung ausgesetzt. Diese Experimente sind mit einem hohen Material-, Zeit-, Personal- und damit Kostenaufwand verbunden. Insofern besteht ein Interesse an der Virtualisierung dieser Versuche.

An der Technischen Universität Graz wurden bereits mehrere Untersuchungen rund um die Thematik der virtuellen Feuerwiderstandsprüfung durchgeführt. Diese reichen von der Simulation der Gasphasenverbrennung im Prüfofen mit Computational Fluid Dynamics (CFD) über die Berechnung der Verformung von Prüfkörpern mit Finite-Elemente-Methode (FEM) bis hin zu einer 2-wegigen CFD-FEM-Koppelung. Bisher blieb das Verhalten der Wände, in welche die Prüfkörper im Zuge der Feuerwiderstandsprüfungen eingebaut werden, weitgehend unberücksichtigt<sup>1</sup>.

Auf den folgenden Seiten soll erläutert werden, warum das Deformationsverhalten der Wände im Brandversuch relevant ist, um die Verformungen der eigentlichen Prüfobjekte korrekt abzubilden. Dies erfolgt auf Basis von bereits abgeschlossenen Untersuchungen und dem Vergleich von bisherigen Simulationsergebnissen mit Messergebnissen aus den realen Brandschutzprüfungen. Daraus wird die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit abgeleitet. Am Ende von Kapitel 1 wird der Aufbau der gesamten Dokumentation beschrieben.

## 1.1 Motivation

Die Hersteller sind in erster Linie am Verhalten ihrer Feuerschutzeinrichtungen interessiert. Somit erscheint es auch aus Sicht der numerischen Berechnung sinnvoll, sich bei der Modellierung zunächst auf die eigentlichen Prüfobjekte zu beschränken. Genau diesen Ansatz verfolgen bisherige Arbeiten, die sich mit der Durchführbarkeit von virtuellen Brandschutzprüfungen beschäftigen.

Prieler et al. untersuchten das Verhalten einer doppelflügeligen Tür im Brandversuch. Anhand mehrerer Messpunkte auf dem Prüfobjekt zeigt Abbildung 1.1 die Abweichungen von im Versuch gemessenen mit numerisch berechneten Verformungen. Eine negative Verschiebung in z-Richtung bedeutet dabei eine Deformation zum Feuer hin. Obgleich der zeitliche Trend der Simulationsergebnisse bereits gute Übereinstimmungen mit den messtechnisch ermittelten Verläufen zeigt, bleibt eine deutliche Abweichung von bis zu 40 mm übrig. Als Ursache für diese Unterschiede

---

<sup>1</sup>Bisherige Simulationsergebnisse wurden z. B. von Pletzer manuell um die gemessene Wandverformung korrigiert [2].

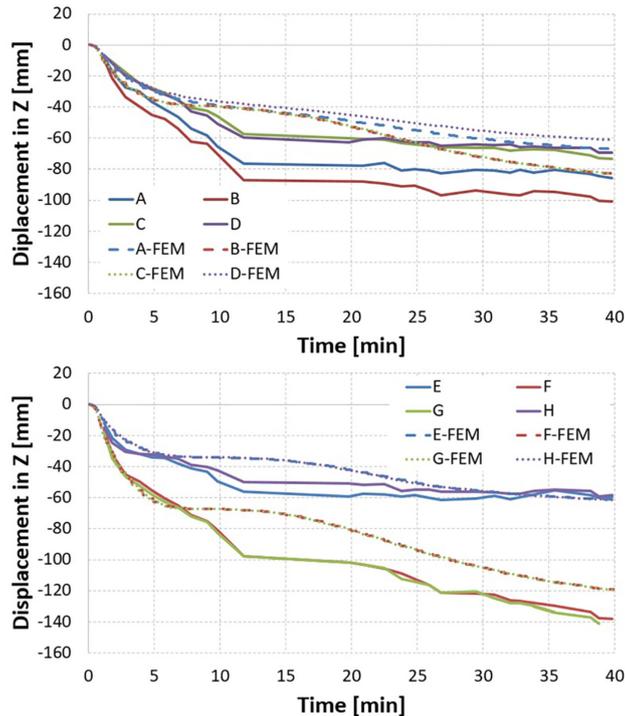
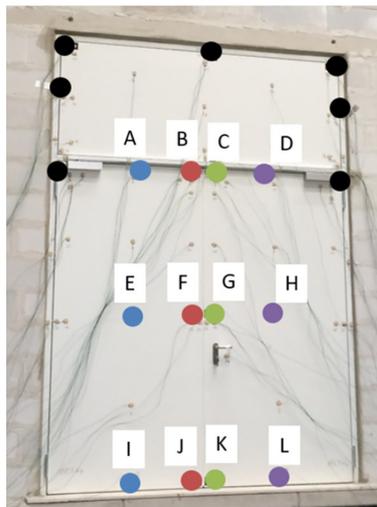


Abbildung 1.1: Abweichung von Messung und Simulation bei zuvor durchgeführten Arbeiten [1]

wurde unter anderem<sup>2</sup> die nicht vorhandene Modellierung der Wandverformung identifiziert [1].

Um die Wandverformung zu berücksichtigen, wurden von Prieler et al. Verschiebungen der Lagerungspunkte der Türe in der FEM-Simulation vorgegeben. Die Deformation der Wand wurde also als Randbedingung modelliert. Die damit erzielten Ergebnisse sind bereits deutlich näher an den gemessenen Werten, was mit Abbildung 1.2 dargestellt wird. Eine weitere Möglichkeit, die Wandverschiebung zu berücksichtigen, gibt es bei Versuchen, in denen die Wandverformung messtechnisch erfasst wurde. Damit kann eine manuelle Korrektur der berechneten Prüfbjektivverformungen erfolgen. Diesen Ansatz verfolgte Pletzer in seiner Arbeit [2].

Alle bisherigen Ansätze haben gemeinsam, dass Wand- und Türverformung nicht in einem Simulationsmodell berechnet werden. Die übrig bleibenden Abweichungen legen nahe, dass das Wandverhalten berücksichtigt werden sollte. Durch ihr Verformungsverhalten beeinflusst die Wand das Prüfbjekt (Tür) nicht nur mit einer zusätzlichen Verschiebung, sondern übt dabei über die Zarge auch Kräfte auf das Türblatt aus. Dadurch kann es zu einem Einfluss auf das Verformungsbild der Tür kommen. Dies ist insbesondere wichtig, um die Spaltbildung zwischen Türe und Zarge für den Rauchgasaustritt besser berechnen zu können.

Damit ist das Ziel dieser Arbeit vorgegeben: Es sollen möglichst effiziente Modelle entwickelt werden, mit welchen (im Sinne einer thermo-mechanischen-Koppelung) sowohl die Wandverformung als auch die Prüfbjektivverformung berechnet werden können. Innerhalb dieser Masterarbeit soll es erster Linie um das Wandverhalten gehen. Eine umfassende Gesamtkoppelung der numerischen

<sup>2</sup>Eine weitere Ursache für Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen ist der Unterschied der berechneten Temperaturen in der Stahltüre und gemessenen Werten.

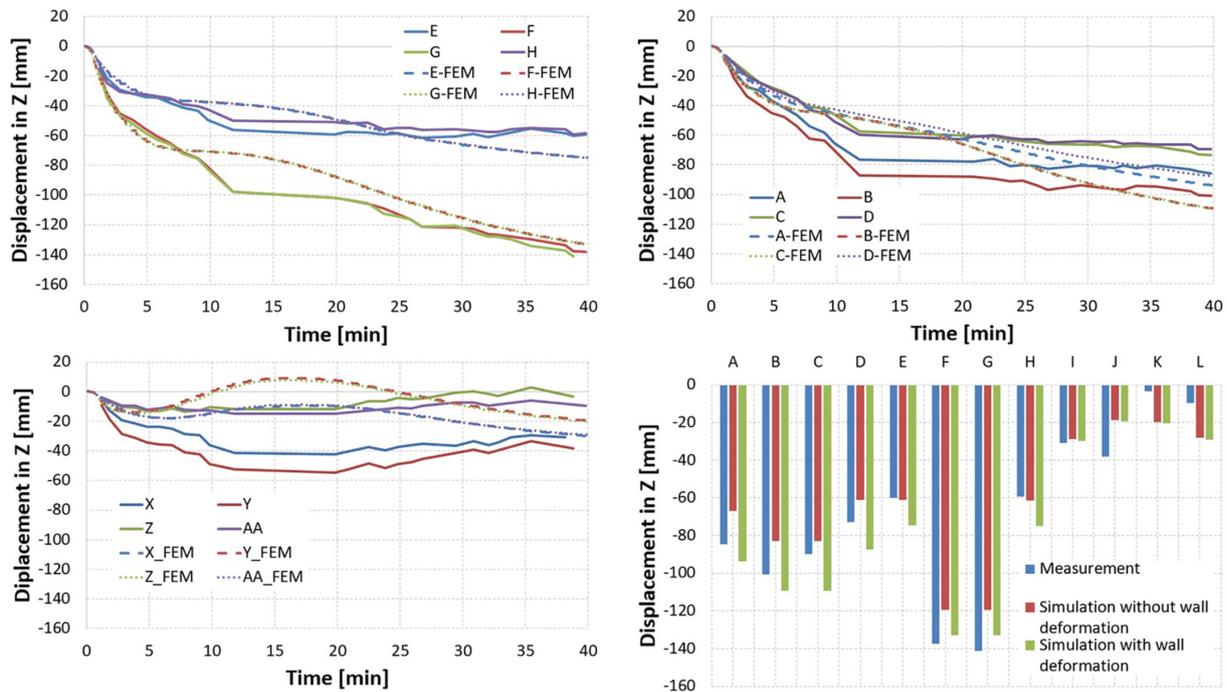


Abbildung 1.2: Manuelle Berücksichtigung der Wandverformung als Randbedingung [1]

Modelle mit dem Thema der virtuellen Feuerwiderstandsprüfungen kann aufbauend auf die bereits abgeschlossenen Untersuchungen in weiterführenden Arbeiten erfolgen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Für das Validieren der Modelle stehen Messergebnisse aus sechs Versuchen zur Verfügung, die beim *IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Gesellschaft m.b.H.* in Linz durchgeführt wurden. Dabei wurden drei Ziegelwand- und drei Leichtbauwandkonstruktionen einer Brandschutzprüfung unterzogen. Das Prüfobjekt war in allen Versuchen eine Brandschutztür, welche in die jeweilige Ziegel- oder Leichtbauwand eingebaut wurde. Abbildung 1.3 zeigt alle sechs Konfigurationen der Versuchswände bei den Feuerwiderstandsprüfungen. Diese schließen einen  $4\text{ m} \times 4,5\text{ m}$  großen Prüfofen nach vorne ab.

Zur Ziegelwand: Zunächst soll der Wärmetransport betrachtet werden, um ein Temperaturfeld in der Wand zu erhalten. Dieses soll dann zur Berechnung der Verformung der Wandkonstruktion dienen. Erst werden die Deformationen von Ziegelwänden ohne Prüfobjekt untersucht. Dadurch soll das Simulationsmodell einfach gehalten werden, um Einflüsse von Detaillierungsgrad, Randbedingungen und Temperaturverteilung auf das Verformungsverhalten und die Größenordnung der Verschiebungen zu erkennen. Im nächsten Schritt soll das Prüfobjekt (Tür) in das Modell integriert werden. Das Konzept soll dann auf die Ziegelwände mit links und rechts eingebauter Türe angewendet werden, um seine Tauglichkeit zu überprüfen.

Eine analoge Vorgehensweise soll für die Simulation der Leichtbauwand zum Einsatz kommen. Auch hier wird zunächst der Wärmetransport innerhalb der Wand betrachtet und darauf aufbau-



Abbildung 1.3: Ziegelwand- (oben) und Leichtbauwandkonfigurationen (unten), anhand derer das Modell in der vorliegenden Arbeit aufgebaut und validiert wurde.

end eine Verformung der Konstruktion ohne eingebaute Türe berechnet. In weiterer Folge wird die Türe in das Modell implementiert.

Das FEM-Modell der Brandschutztüre wird aus der Vorarbeit von Pletzer [2] übernommen. Die thermische Belastung bei der Feuerwiderstandsprüfung erwirkt ein Temperaturfeld in der Türe. Dadurch erfährt das Prüfobjekt eine Deformation, welche durch die Einspannung in der Wand begrenzt wird. Folglich kommt es zu einer Kraftwirkung auf die Ziegel- und Leichtbauwände. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus vorrangig auf dem Verhalten der Wände. Die Türe kann somit als Last in der Wandkonstruktion angesehen werden.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 der allgemeine Ablauf von Feuerwiderstandsprüfungen erläutert und beschrieben, welche grundsätzlichen Kriterien und Normen zur Anwendung kommen. Des Weiteren folgt ein Überblick über die maßgeblich beteiligten physikalischen Phänomene sowie eine Beschreibung der für die Versuche wesentlichen Werkstoffe. Am Ende von Kapitel 2 erfolgt zudem eine Klärung der wichtigsten relevanten Begriffe aus den Fachbereichen des Ziegelbaus und des Trockenbaus (Leichtbauwand).

Kapitel 3 soll einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten numerischen Verfahren zur Berechnung von thermo- mechanisch gekoppelten Systemen geben.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der realen Versuchssituation. Der verwendete Prüfofen wird kurz erläutert. Ergänzt wird dies mit einer Beschreibung der Versuchswände. Wichtigster Punkt in Kapitel 4 ist die Darstellung der Messergebnisse für alle Wandkonfigurationen<sup>3</sup>. Daraus folgen einige Feststellungen über das mechanische Verhalten des Prüfaufbaus unter der thermischen Belastung bei der Feuerwiderstandsprüfung.

In Kapitel 5 werden - nach einem Verweis auf in Vorarbeiten durchgeführte Simulationen - jene Abstraktionsschritte erläutert und begründet, welche notwendig waren, um ein taugliches Simulationsmodell für die Wandverformung zu erhalten. Anschließend erfolgt die Beschreibung einer Validierung des in der vorliegenden Arbeit angewendeten Ziegelwandmodells anhand einer Referenzstudie. Diese beschäftigt sich ebenfalls mit dem mechanischen Verhalten von Ziegelwänden in Feuersituationen und diente als Hauptliteraturquelle für die Erstellung der Ziegelwandmodelle. Der zuletzt genannte Schritt ist notwendig, weil für die Validierung des vorliegenden Modells wichtige Messdaten, vor allem die Temperaturverteilung in der Ziegelwand zu verschiedenen Zeitpunkten fehlen.

In Kapitel 6 und Kapitel 7 werden schließlich die Ergebnisse der erstellten Simulationsmodelle präsentiert. Zunächst geschieht das anhand der Ziegel- und Leichtbauwand wand mit mittig eingebauter Tür, dann für die daraus abgeleiteten Anwendungsfälle mit Tür rechts- und linksseitig montiert. Im Besonderen soll auf die Einflüsse von Wand- und Prüfbjektverhalten eingegangen werden.

Schließlich werden im Kapitel 8 die Grenzen und Unsicherheiten des vorliegenden Modells diskutiert, die sich im Wesentlichen aus Stoffwertunsicherheiten, Modellaufbauunsicherheiten und Schwierigkeiten bei der Wahl der Randbedingungen ergeben. Am Ende der Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse sowie ein Ausblick auf die sich ergebenden Möglichkeiten, das Gesamtvorhaben einer virtuellen Brandschutzprüfung weiterzuführen.

---

<sup>3</sup>Ziegel- und Leichtbauwände mit jeweils links, mittig und rechts verbauter Tür



## 2 Grundlagen

Kapitel 2 beginnt mit einer Klärung der wichtigsten Begriffe aus dem Bereich der Feuerwiderstandsprüfungen. Danach erfolgt eine Zusammenfassung der physikalischen und mathematischen Grundlagen, die in dieser Arbeit angewendet wurden. Zuletzt wird eine etwas detailliertere Beschreibung des Verhaltens von Materialien, welche in den Brandschutzprüfungen eine Rolle spielen, vorgenommen.

### 2.1 Brandschutzprüfungen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, dienen die Brandschutzprüfungen zum Nachweis der Funktionserfüllung von Prüfkörpern wie etwa Brandschutztüren. Der Ablauf der Prüfungen erfolgt dabei nach Norm, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die zugrunde liegenden Regelwerke wie die ÖNORM EN 1363-1 (Allgemeine Anforderungen) [3] und 1363-2 (Alternative und ergänzende Verfahren) [4] sind sehr umfangreich. Aus diesem Grunde sollen hier nur die wichtigsten Forderungen erläutert werden.

#### 2.1.1 Allgemeine Anforderungen

Im Folgenden werden einige grundlegende Anforderungen an Feuerwiderstandsprüfungen erläutert, welche durch die Normen gestellt werden. Darunter fallen Temperatur-, Druck- und Konditionierungsvorgaben.

**Zeitlicher Temperaturverlauf** Bei Prüfungen nach ÖNORM EN 1363-1 [3] wird ein genormter Temperaturverlauf in Form der sogenannten Einheitstemperaturkurve (ETK) gefordert, welche nach Gleichung 2.1 definiert ist. Eine geeignete Regelung hat im Versuch dafür zu sorgen, dass dieser Verlauf vom Prüfofen möglichst genau eingehalten wird.

$$t(\tau) = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot \tau + 1) \quad (2.1)$$

Die durch Gleichung 2.1 erhaltene Temperatur ist in Grad Celsius angegeben.  $\tau$  ist in Minuten einzusetzen. Dieser Temperaturverlauf wird in Abbildung 2.1 dargestellt. Darin sind auch die nach Norm einzuhaltenden Grenzwertverläufe ersichtlich. Wird bei der Feuerwiderstandsprüfung eine dieser Grenzkurven unter- oder überschritten, dann ist der Versuch als ungültig zu werten. Für den Zeitbereich bis 10 min nach Versuchsstart sind keine Grenzen definiert, es wird aber empfohlen, die ETK so gut wie möglich nachzubilden. Zusätzlich zu den Grenzkurven existiert

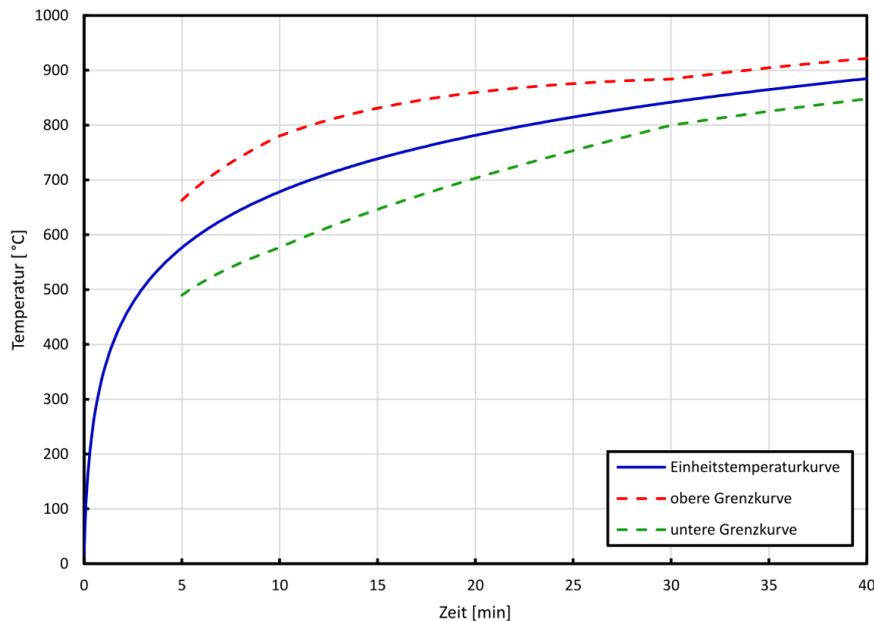


Abbildung 2.1: Einheitstemperaturkurve und dazugehörige Grenzkurven [3]

auch die Bedingung, dass von keiner Messsonde im Ofen eine größere Abweichung als 100 K von der ETK aufgezeichnet werden darf.

Neben der oben genannten ETK gibt es noch weitere Temperatur-Zeit-Verläufe, die alternative Brandszenarien wie zB. Schwellbrände nachbilden sollen. Auf diese wird an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen, sondern auf entsprechende Normen verwiesen.

**Druckverteilung** Die Druckverteilung im Ofen ist hauptsächlich eine Folge von natürlicher Konvektion. Sie soll so eingestellt und geregelt werden, dass fünf Minuten nach Beginn des Versuchs eine maximale Druckabweichung von  $\pm 5$  Pa des prüfobjektspezifischen Nenndrucks erreicht wird. Nach zehn Minuten darf eine Abweichung von  $\pm 3$  Pa übrig bleiben [3]. Die Druckverteilung über der Prüfofenhöhe ist maßgeblich für den Ort und die Intensität eines etwaigen Rauchgasaustrittes verantwortlich. So käme es bei einem Überdruck gegenüber außerhalb des Prüfofens zum Austritt von heißen Rauchgasen, wodurch sich ein Brand ausbreiten könnte. Für die Verformung der Prüfkörper ist die Druckverteilung im Ofen aufgrund der geringen Differenzen zur Umgebung von keiner Bedeutung.

**Konditionierung** Eine allgemeine Schwierigkeit bei den Brandschutzprüfungen stellt die Forderung nach einer möglichst realitätsnahen Konditionierung der Prüfkörper dar. Beispielsweise müssen für große Betonbauteile aufgrund des hohen Feuchtegehalts lange Trocknungszeiten vorgesehen werden. Für Mauerwerk gilt die Forderung nach 28 Tagen Konditionierungszeit, um eine ausreichende Trocknungszeit für den Mörtel zu gewährleisten <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Bei den Ziegelwänden, welche Gegenstand dieser Arbeit sind, wurde dies nur bedingt eingehalten, da die Türen geprüft werden, nicht die gesamten Ziegel- oder Leichtbauwandkonstruktionen

## 2.1.2 Beurteilung des Bauteilverhaltens

Des Weiteren beschreiben die Normen Kriterien, welche ein Klassifizieren der eigentlichen Prüfobjekte erlauben. Das relevante Regelwerk für die Klassifizierung von Türen, Toren und Fenstern ist die ÖNORM 1634 - 1 [5]. Die europäische Norm<sup>2</sup> EN 13501 - 2 [6] beschreibt die Klassifizierung von Bauprodukten. Einige der wichtigsten Kriterien sind:

**R - Tragfähigkeit** Die Tragfähigkeit R ist die Fähigkeit des Bauteils, unter festgelegten mechanischen Einwirkungen einer Brandbeanspruchung auf einer oder mehreren Seite(n) ohne Verlust der Standsicherheit für eine Dauer zu widerstehen [6].

**E - Raumabschluss** Der Raumabschluss E ist die Fähigkeit eines Bauteils mit raumtrennender Funktion, der Beanspruchung eines nur an einer Seite angreifenden Feuers so zu widerstehen, dass ein Feuerdurchtritt zur unbeflammten Seite als Ergebnis des Durchtritts von Flammen oder heißer Gase verhindert wird. Diese würden ansonsten die Entzündung der dem Feuer abgekehrten Oberfläche des Bauteils oder in der Nähe dieser Oberfläche befindlicher Materialien verursachen [6].

**I - Wärmedämmung** Die Wärmedämmung I ist die Fähigkeit eines Bauteils, einer einseitigen Brandbeanspruchung ohne die Übertragung von Feuer als Ergebnis einer signifikanten Übertragung von Wärme von der dem Feuer zugekehrten Seite zu der vom Feuer abgewandten Seite zu widerstehen. Die Übertragung muss so begrenzt sein, dass weder die vom Feuer abgewandte Oberfläche noch Materialien in der Nähe dieser Oberfläche entzündet werden. Das Bauteil muss außerdem ein so großes Hindernis für die Wärmeeinwirkung darstellen, dass in der Nähe befindliche Personen geschützt werden [6].

Darüber hinaus existieren noch weitere Kriterien, die jedoch an dieser Stelle nicht näher beschrieben werden, wie

- M - Widerstand gegen mechanische Beanspruchung
- C - Selbstschließende Eigenschaft
- S - Rauchdichtheit
- G - Widerstandsfähigkeit gegen Rußbrand
- K - Brandschutzfunktion

Mit einer Klassifizierung von "EI90" ist das Prüfobjekt (für die Feuerwiderstandsprüfungen im Rahmen dieser Arbeit) eine Brandschutztür, die für 90 min Sicherheit gegenüber Raumabschluss und Wärmedämmung gewährleisten soll.

---

<sup>2</sup>Nationale Normen werden nach und nach durch europäische Normen abgelöst.

## 2.2 Wandkomponenten

Im folgenden Kapitel erfolgt eine kurze Beschreibung der wichtigsten Bauteile und Komponenten, die relevant für die vorliegende Arbeit sind. Dabei handelt es sich zu einem großen Teil um Auszüge des Buches *Ziegel im Hochbau* von Pech et al. [14] Für fundierte Informationen zum Thema Wandkomponenten sei auf diese und ähnliche Fachliteratur aus dem Fachbereich der Bautechnik verwiesen.

### 2.2.1 Ziegel

Der gemäß Unterabschnitt 2.4.1 aufbereitete Ton wird durch Vakuumstrangpressen und Drahtschneiden zu Ziegelrohlingen verarbeitet. Erst durch das Brennen entsteht daraus der belastbare Ziegel. Die Maße eines Mauerziegels sind in der Reihenfolge Länge, Breite und Höhe anzugeben. Wichtige physikalische Eigenschaften von Ziegeln sind (Auszüge aus *Ziegel im Hochbau* [14]):

#### **Brutto-Trockenrohichte**

*Das Bezugsvolumen entspricht hier den äußeren Abmessungen des Ziegels einschließlich aller Hohlräume, Poren, Löcher, Mörteltaschen etc. Diese Angabe dient zum Beurteilen von Eigenlasten, dem Schallschutz, des Feuerwiderstandes und des Wärmeschutzes.*

#### **Netto-Trockenrohichte**

*Dabei handelt es sich um die eigentliche Materialdichte. Diese ist der für die Simulationen in dieser Arbeit relevante Stoffwert.*

#### **Druckfestigkeit**

*Für alle Mauerziegel, die Anforderungen der Standsicherheit unterliegen, ist vom Hersteller die mittlere und die normierte Druckfestigkeit in  $\text{N}/\text{mm}^2$  anzugeben.*

#### **Wärmeschutz**

*Sind wärmeschutztechnische Anforderungen relevant, so ist vom Hersteller der Wert der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10,dry,unit}$  anzugeben und über welches Bestimmungsmodell dieser Wert ermittelt wurde. Mit Feuchteumrechnungskoeffizienten erhält man daraus die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerkes  $\lambda_{design,masonry}$ . Dieser Wert ist relevant für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$ . Für diese Arbeit ist diese Angabe jedoch nicht aussagekräftig, da die hier betrachteten Temperaturen weit über jene Bereiche hinausgehen, welche für die  $U$ -Wert-Bestimmung interessant sind. Es muss auf Zusatzliteratur zurückgegriffen werden.*

#### **Dauerhaftigkeit**

*Angabe zum Frostwiderstand. Klassen der Dauerhaftigkeit reichen von  $F_0$  - nicht angreifende Umgeben bis  $F_2$  - stark angreifende Umgebung. Für P-Ziegel (siehe unten) ist die Angabe "darf nicht in exponierter Lage verwendet werden" erforderlich.*

#### **Brandverhalten**

*Mauerziegel können ohne Prüfung in die Brandverhaltensklasse  $A_1$  eingestuft werden, wenn sie einen Massen- bzw Volumenanteil kleiner als 1% an organischen Stoffen enthalten.*

Die ÖNORM EN 771-1 [22] unterscheidet nach dem Einsatzbereich in P-Ziegel und U-Ziegel. Letztere werden für ungeschütztes Mauerwerk eingesetzt und können Regen, Frost, Tau, Boden und Grundwasser ausgesetzt sein. Abbildung 2.2 zeigt einige Varianten von U-Ziegeln. Ein

bekanntes Beispiel hierfür sind Klinker, die bis zur durchgehenden Sinterung gebrannt werden und sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse auszeichnen [14].

Im Gegensatz dazu sind P-Ziegel für die Verwendung in geschütztem Mauerwerk vorgesehen. Dabei versteht man unter geschütztem Mauerwerk jenes, welches durch eine geeignete Putzschicht oder Verkleidung vor Witterungseinflüssen geschützt ist. Darunter fallen auch Innenwände. Abbildung 2.3 zeigt eine Auswahl von P-Ziegeln.

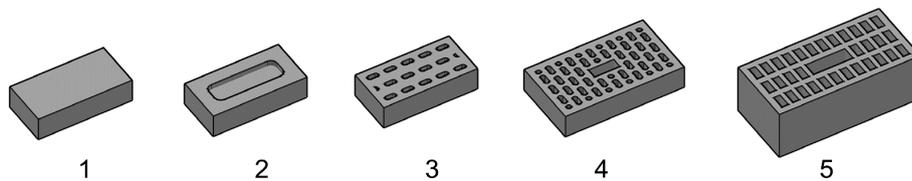


Abbildung 2.2: Mauerziegel-Beispiele für U-Ziegel [14]

1. Vollziegel
2. Mauerziegel mit Mulde
3. Hochlochziegel
4. Hochlochziegel
5. Langlochziegel

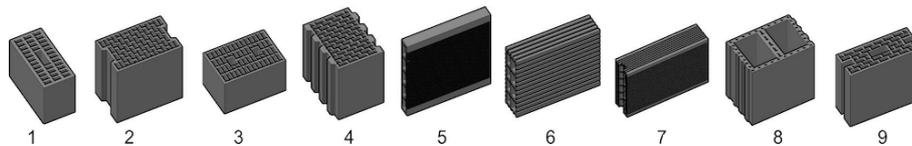


Abbildung 2.3: Mauerziegel-Beispiele für P-Ziegel [14]

1. Hochlochziegel
2. Hochlochziegel mit Mörteltasche
3. Hochlochziegel mit Grifföffnungen
4. Hochlochziegel mit Nut-Feder-System
5. Langlochziegel (Für Tennwände)
6. Langlochziegel mit Putzrillen
7. Langlochziegel mit Mörteltasche
8. Füllziegel
9. Mauertafelziegel

Mauerziegel werden weiter unterschieden in Vollmauerziegel, Langlochziegel und Hochlochziegel. Letztere sind mit Löchern oder Lochmustern versehen, die die Lagerfläche senkrecht durchdringen. Das Lochbild von tragenden Hochlochziegeln kann sehr ausgeklügelt sein, um gleichzeitig eine hohe Tragkraft und einen guten Wärmewiderstand zu erreichen. Darüber hinaus sollen die Löcher so gewählt werden, dass sie mit Mauermörtel überbrückt werden können [14].

Bei den Ziegeln der hier relevanten Versuchswände handelt sich um Hochlochziegel für geschütztes Mauerwerk. Die Versuche fanden allerdings ohne Dämmschicht (Verputz) statt.

### 2.2.2 Stürze

Ziegelstürze ermöglichen das Übermauern von Fenster- und Türöffnungen. Die vorgefertigten Ziegelschalen werden mit einem auf die statischen Erfordernisse abgestimmten, bewehrten Betonkern gefüllt. Dies kann bei nur teilweise vormontierten Stürzen auch erst auf der Baustelle erfolgen. Die maximale lichte Weite  $l$  (siehe Abbildung 2.4) liegt bei 4,5 m. Die Mindestauflagerbreite beträgt bei üblichen Stürzen 12 cm [14].

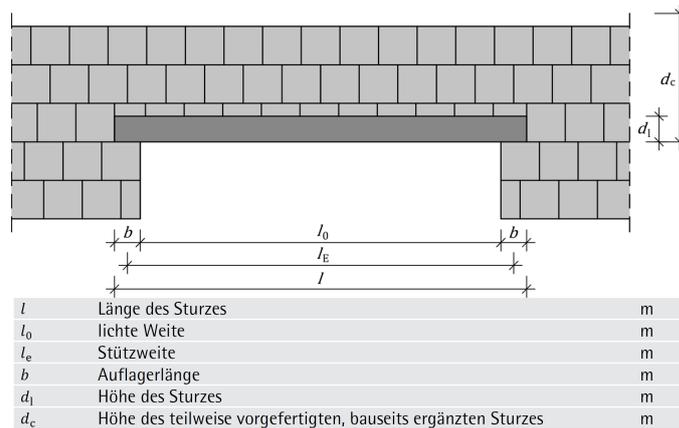


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung mit Bezeichnungen bei Stürzen [14]

### 2.2.3 Profile

Die tragende Struktur einer Leichtbauwand entsteht durch über Verbindungswinkel miteinander verschraubte, verzinkte Stahlprofile. Im Bereich der Tür haben diese eine Blechstärke von 2 mm (UA-Profil). Ansonsten sind sie nur 0,6 mm dick (UW- und CW-Profil). Darüber hinaus verfügen die Profile über ein Lochmuster. Dieses dient weniger der Gewichtsersparnis als zur Verschraubung und dem Durchführen von Elektrokabeln.

Das sogenannte "Ständerwerk" wird am Boden und an der Decke mit dünnwandigen UW-Profilen und senkrecht dazu mit ebenso dünnen CW-Profilen realisiert. Der Türrahmen wird mit dickeren UA-Profilen hergestellt. Alle Profile verfügen über C-förmige Querschnitte, wie in Abbildung 2.5 dargestellt.

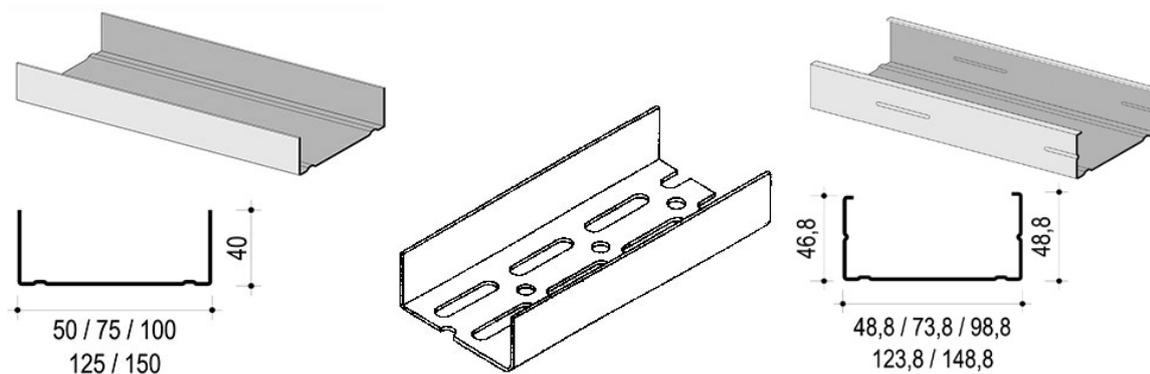


Abbildung 2.5: Profile für Leichtbauwände; vlnr.: UW-,UA-,CW-Profil [23]

### 2.2.4 Gipskartonverkleidung

Die Ständerwerke werden mit Gipskartonplatten in der Stärke von 12,5 mm und einer Breite von 600 mm verkleidet. Diese werden mit selbst schneidenden Schnellbauschrauben mit den Profilen verschraubt. Dabei sollten die Abstände zwischen den Schrauben weniger als 25 cm betragen. Bei der Verkleidung der Wand entstehende Lücken müssen verspachtelt werden. Abbildung 2.6 zeigt den inneren Aufbau der Leichtbauwände mit teilweise bereits angebrachter Gipsverkleidung.

Das mechanische Verhalten der Gipsplatten ist komplex, weil es neben dem Festigkeitsverlust auch zu einem Dichteverlust und einer Kontraktion mit steigender Temperatur kommt [11]. Innerhalb dieser Arbeit beschränkt sich das Materialmodell auf den temperaturbedingten Festigkeitsverlust.



Abbildung 2.6: Im Aufbau befindliche Leichtbauwand mit begonnener Gipskartonverkleidung

## 2.3 Physikalische und mathematische Grundlagen

Im folgenden Teil der Arbeit werden die wichtigsten physikalischen Phänomene beschrieben, die bei der Berechnung der thermischen Verformung von Wandkonstruktionen von Relevanz sind. Die Literaturquellen für die Ausführungen in diesem Abschnitt sind *Wärmeleitung, und -transport* von Hannoschöck [7] und *Festkörperphysik* von Ibach et al [8].

Überblicksartig soll auch das mathematische Werkzeug der Regression beschrieben werden, welches zur Entwicklung einer vereinfachten Temperaturfeldfunktion für die Ziegelwände angewendet wurde.

### 2.3.1 Wärmetransport

Die Übertragung von Wärme kann durch drei wesentliche Wirkmechanismen beschrieben werden: Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Auf diese soll nun nacheinander eingegangen werden.

**Wärmeleitung** Je höher die innere Energie eines Körpers ist, desto intensiver werden die Bewegungen seiner Moleküle. Die äußere Erscheinungsform dieser inneren Energie kennt man als Temperatur. Mit steigender Temperatur nehmen auch die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen zu. Energiereichere (heiße) Moleküle können dabei energieärmere (kalte) Moleküle in Bewegung versetzen. Dies ist der Effekt der Wärmeleitung. Bekanntlich wird bei der Wärmeleitung umso mehr Energie (in Form von Wärme) pro Zeiteinheit transportiert, je größer die Querschnittsfläche  $A$  eines Leiters, umso größer die Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$ , und je kürzer der Abstand  $\delta$  zwischen ihnen ist. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist ein Proportionalitätsfaktor und eine Eigenschaft des Materials. Sie ist im Allgemeinen abhängig von Druck und Temperatur.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{\delta} \quad (2.2)$$

Durch einen Grenzübergang hin zu infinitesimalen Weg- und Temperaturdifferenzen erhält man aus obiger Differenzgleichung die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.3)$$

bzw. in vektorieller Form

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2.4)$$

Das negative Vorzeichen zeigt dabei an, dass die Richtung des Wärmestromes stets vorgegeben ist, nämlich von den Bereichen mit hoher Temperatur hin zu jenen mit niedrigerer Temperatur. Mit Einführung der Temperaturleitfähigkeit  $a = \lambda/(\rho \cdot c)$  und  $d\dot{q} = -dx \cdot \rho \cdot c \cdot dT/d\tau$  erhält man die Wärmeleitungsgleichung in Temperaturform:

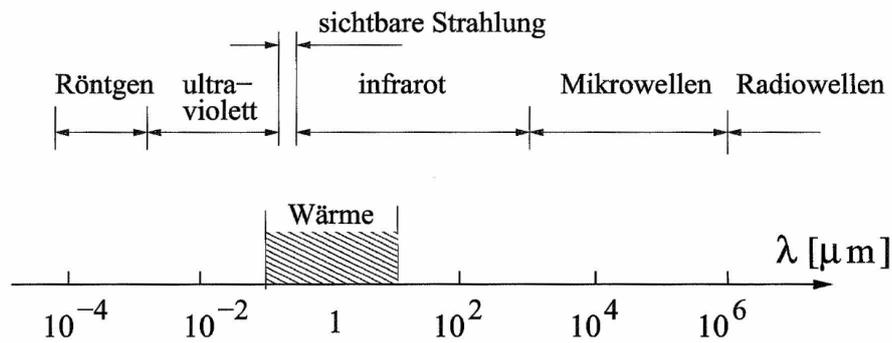


Abbildung 2.7: Elektromagnetisches Wellenspektrum [10]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - a \cdot \Delta T = 0 \quad (2.5)$$

**Konvektion** Konvektiver Wärmeübergang tritt bei der Bewegung von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) auf. Durch ihre Wärmekapazität können Fluidteilchen Energie aufnehmen, aufgrund der Strömung abtransportieren und an anderer Stelle wieder abgeben. Man unterteilt ferner in *freie Konvektion*, die durch Auftriebswirkung infolge temperaturbedingter Dichteunterschiede entsteht, und in *erzwungene Konvektion*, bei der die Strömungsfelder von außen - z. B. durch ein Gebläse - angetrieben werden. Fluide besitzen grundsätzlich wie Festkörper eine Wärmeleitfähigkeit, jedoch ist schon bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten der Wärmetransport durch Konvektion dominant gegenüber jenem durch Molekularbewegung im Gas oder in der Flüssigkeit [7]. Den Wärmestrom  $\dot{Q}$ , der von einem Fluid mit der Temperatur  $T_\infty$  und einer Wand mit der Temperatur  $T_W$  ausgetauscht wird, lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \alpha_k \cdot (T_W - T_\infty) \quad (2.6)$$

Darin erscheint mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_k$  augenscheinlich wieder ein Proportionalitätsfaktor, dessen Zahlenwert allerdings im Wesentlichen von den vorliegenden Strömungsbedingungen abhängt und dessen Bestimmung nicht trivial ist. Für die Zwecke dieser Arbeit wurden aus der Literatur konstant angenommene Werte für  $\alpha_k$  entnommen, da eine Strömungsfeldberechnung im Versuchsofen ohnehin nicht berücksichtigt wurde.

**Wärmestrahlung** Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Wärmetransportmechanismen bedingt Strahlung kein Medium. Stattdessen erfolgt der Energietransport durch elektromagnetische Wellen. Abbildung 2.7 zeigt über einen großen Wellenlängenbereich die relevanten Abschnitte für Wärme und den schmalen Bereich des sichtbaren Lichts. Die von einer Oberfläche abgestrahlte Wärmestromdichte wird mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz angegeben [9]:

$$\dot{q} = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.7)$$

Darin ist  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante mit dem Wert von  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ . Mit dem temperaturabhängigen Emissionsverhältnis  $\epsilon$  gilt Gleichung 2.7 für sogenannte graue Körper. Bei diesen ist das Emissionsverhältnis nicht von der Wellenlänge abhängig. Besonderes Augenmerk sei auf die Tatsache gelenkt, dass der abgegebene Wärmestrom gemäß Gleichung 2.7 mit der vierten Potenz von der Temperatur abhängt. Insbesondere bei Anwendungen mit hohen Temperaturen - wie im Rahmen dieser Arbeit - kann auf eine Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Strahlung nicht verzichtet werden (siehe auch Abbildung 5.6).

Körper können einfallende Strahlung durchlassen (Transmission), absorbieren (Absorption) oder reflektieren (Reflexion). Aufgrund der Energieerhaltung ist die Summe aus Transmission ( $\tau$ )-, Reflexions ( $\rho$ )- und Absorptionsgrad ( $\alpha$ ) immer gleich eins:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.8)$$

$\alpha$ ,  $\rho$  und  $\tau$  hängen von Material und Oberflächenbeschaffenheit, der Temperatur des bestrahlten Körpers, sowie den Eigenschaften der einfallenden Strahlung (Spektrum) ab [10]. Im Falle von nicht transparenten, also undurchlässigen Körpern ist  $\tau = 0$ .

**Kondensation und Verdampfung** Besonders bei Situationen, in denen Wasserdampf eine Rolle spielt, wie beim Brandversuch mit Gipskartonplatten, kann die Wärmeübertragung deutlich von Verdampfungs- und Kondensationseffekten geprägt sein. Heißer Dampf - entstanden durch chemische Reaktionen im Gips - kondensiert an zunächst kalten Stellen, wodurch sich deren Temperatur schneller erhöht als durch die Wärmeleitung zu erwarten wäre. Durch das spätere Wiederverdampfen wird die Temperatur an den kondensatbenetzten Gebieten für längere Zeit im Bereich der Verdampfungstemperatur gehalten. Die Wärmeübertragung durch den Wasserdampf kann als eine Art des konvektiven Wärmetransports angesehen werden.

### 2.3.2 Thermische Expansion

Eine Temperaturänderung führt bei allen Stoffen zu einer Veränderung ihres Volumens. Gase dehnen sich dabei deutlich mehr aus als Flüssigkeiten und Festkörper. Auf Letztere beschränken sich die weiteren Ausführungen. Die Ursache der thermischen Expansion von Festkörpern liegt in physikalischen Effekten auf atomarer Ebene begründet, auf die in entsprechender Fachliteratur, wie zB. *Festkörperphysik* von Ibach et al. [8] näher eingegangen wird. Als Kennzahl für die thermische Ausdehnung wurde der von einer Probenlänge unabhängige, lineare Ausdehnungskoeffizient eingeführt:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (2.9)$$

Dabei ist  $l$  die Länge der Probe und  $dl$  die Veränderung derselben bei einer infinitesimalen Temperaturdifferenz  $dT$ . Die messtechnische Ermittlung muss dabei im spannungsfreien Zustand erfolgen. Die Größenordnung der Zahlenwerte liegt im Bereich von  $10^{-5}$  [8]. Für den Großteil der Materialien, welche in dieser Arbeit Verwendung finden, führt eine Temperaturerhöhung zu einer

Expansion des Körpervolumens (Stahl, gebrannter Ton, Mörtel etc.). Der lineare Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ist in diesem Fall positiv. Es gibt aber auch Materialien, die sich beim Aufheizen zusammenziehen (Kontraktion). Ein Beispiel dafür wäre Gips bei hohen Temperaturen [11].

Eine genaue Kenntnis der temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist für die Berechnung der Verformungen von Ziegel- und Leichtbauwänden besonders wichtig, da diese Ausdehnungseffekte die treibende Kraft sind. Leider sind die in der Literatur verfügbaren Werte vor allem für gebrannten Ton mit teilweise großen Schwankungen behaftet. Eine Ermittlung der genauen Verläufe in Abhängigkeit der Temperatur wären nur mit aufwendigen Messungen möglich.

### 2.3.3 Multiple Regression

Oft steht für eine Korrelation von Einflussgrößen und Ausgangsparametern ein Set von Daten, wie z. B. Messpunkten oder Daten aus Simulationen, zur Verfügung. Auch wenn die analytische Beziehung zwischen Einfluss- und Ausgangsgrößen im Allgemeinen unbekannt ist, ist es dennoch möglich, einen näherungsweisen formalen Zusammenhang mithilfe der Regression zu erhalten.

Im einfachsten Fall liegt eine lineare Korrelation zwischen einer Einflussgröße und einem Ausgangsparameter vor, wie in Abbildung 2.8.

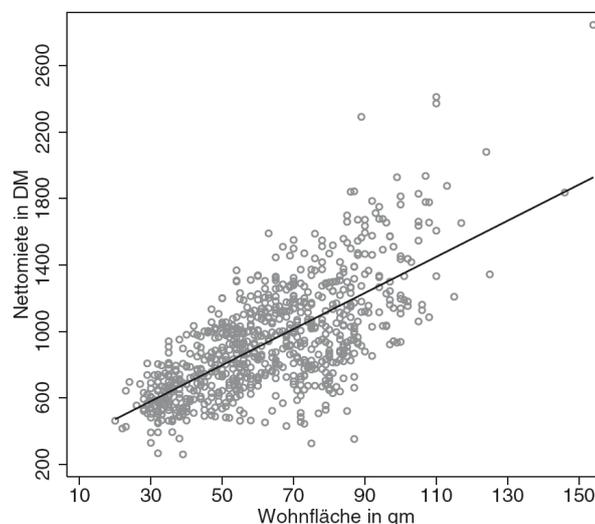


Abbildung 2.8: Lineare Regression; Streudiagramm und Regressionsgerade [12]

Darin wird die aus dem Streudiagramm nahe gelegte Korrelation der Parameterpaare  $(x_i, y_i)$  mithilfe einer Geradengleichung (Regressionsgerade) angenähert. Dazu müssen für eine Funktion

$$y(x_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i \quad (2.10)$$

die Parameter  $\beta_0$  und  $\beta_1$  in geeigneter Weise gefunden werden, sodass die Funktion in Gleichung 2.10 die Punktdaten möglichst gut annähert. Ein mögliches Verfahren dazu ist die Methode der kleinsten Quadrate. Damit sollen die quadratischen Abweichungen

$$KQ(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 \cdot x_i)^2 \quad (2.11)$$

minimiert werden. Details zu diesem Verfahren sei an dieser Stelle auf Fachliteratur wie *Regression - Modelle, Methoden und Anwendungen* von Fahrmeir et al. [12] verwiesen.

Regressionsverfahren sind nicht auf lineare Zusammenhänge beschränkt. Auch eine polynomiale Regressionsdarstellung der Form

$$y_i(x_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \beta_2 \cdot x_i^2 + \dots + \beta_l \cdot x_i^l \quad (2.12)$$

ist möglich. Der Aufwand zur Auffindung der Parameter  $\beta_0$  bis  $\beta_l$  wird mit steigendem Polynomgrad höher. Gibt es mehr als einen Eingangswert  $x_i$ , spricht man von multipler Regression. Die Näherungsfunktionen sind im Fall von zwei Eingangsparametern dreidimensionale Flächen.

Das Verfahren der multiplen Regression eignet sich zum Ermitteln einer Gleichung in zwei Variablen, mithilfe derer das Temperaturfeld in der Ziegelwand einfach ausgedrückt werden kann. Die Eingangsdaten dafür stammen aus der detaillierten Simulation der Wärmeübertragung in nur einem Ziegel.

Eine Kennzahl für die Beurteilung der Qualität der Regression ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  mit der Definition nach Gleichung 2.13. Darin ist  $\hat{y}$  der Prognosewert (Regressionsfunktion),  $y$  der beobachtete Wert (Messwert, Simulationsergebnis) und  $\bar{y}$  der Mittelwert der beobachteten Daten. Je näher  $R^2$  bei 1 ist, desto besser ist die Anpassung der erhaltenen Funktion an die Daten.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.13)$$

## 2.4 Materialverhalten relevanter Werkstoffe

Auf den folgenden Seiten folgt eine Beschreibung der wichtigsten in den Versuchswänden verbauten Werkstoffe und ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften. In den Brandschutzprüfungen bewegen sich die Temperaturen in einem Bereich von 20 °C bis über 1200 °C. Daher wird besonders auf die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffdaten hingewiesen.

### 2.4.1 Gebrannter Ton

Der für die Ziegelherstellung notwendige Ton kommt natürlich vor und wird oberflächennah abgebaut. Dieses Rohmaterial wird unter Einsatz schwerer Maschinen zerkleinert und homogenisiert. Mit Heißdampf wird die Tonmasse auf ca. 60 °C erwärmt und der sogenannten Ziegelpresse zugeführt. In dieser Vakuumstrangpresse erhalten die Mauerziegel bereits ihren Querschnitt. Nun werden sie noch mit einer Drahtschneideanlage auf die gewünschte Länge gebracht. Im Ziegeltrockner wird den Ziegelrohlingen die Feuchtigkeit entzogen. Die dabei entstehenden Kapillaren sind wichtig für das Raumklima des fertigen Ziegelbaues. Am Ende des ca. 30 Stunden dauernden Trocknungsvorgangs sind die Ziegel bereit für das eigentliche Brennen [13].

In über 100 m langen sogenannten Tunnelöfen wird das Ziegelbrennen durchgeführt. Diese Öfen verfügen über eine Vorfeuerbereich in dem die Ziegel langsam vorgewärmt werden, einem Hochtemperaturbereich, in dem bei bis zu 1100 °C gebrannt wird, und einer Abkühlzone. Im Hochtemperaturbereich vollzieht sich die Verbindung der Tonmoleküle. Erst hier erhält der Ziegel seine Festigkeit. Zusätzlich erlangen die Tonziegel bei diesem Vorgang auch ihre charakteristische rotbraune Farbe, verursacht durch im Ton enthaltene Eisenoxide. Der Brennvorgang im Tunnelofen dauert bis zu 48 Stunden [14].

**Thermische Eigenschaften** Abbildung 2.9 zeigt die Abhängigkeit der thermischen Stoffdaten Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und thermischer Ausdehnungskoeffizient<sup>3</sup> von der Temperatur. In der Darstellung sind die Daten auf ihren Wert bei Raumtemperatur von 20 °C normiert. Die Referenzwerte dazu sind in Tabelle 2.1 ersichtlich. Auffällig ist der Abfall der Wärmeleitfähigkeit ab ca. 300 °C und der erneute Anstieg ab 800 °C. Ersterer ist typisch für keramische Werkstoffe [15], Letzterer erklärt sich über den bei höheren Temperaturen dominierenden Wärmetransport durch Porenstrahlung im Material.

Die Zacke im temperaturabhängigen Verlauf der spezifischen Wärmekapazität erklärt sich durch die Verdampfung von im Material eingelagertem Wasser. Dies stellt eine Unsicherheit in der Materialmodellierung dar, da der Feuchtegehalt in den Ziegeln je nach Lagerung, Luftfeuchtigkeit, Trocknungszeit nach dem Aufbau etc. stark schwanken kann [16].

Der thermische Ausdehnungskoeffizient bleibt bis zu einer Temperatur von ca. 380 °C auf seinem Ausgangswert. Bei ca. 575 °C passiert eine Gefügemwandlung (Quarzumwandlung), was eine Spitze im Verlauf verursacht. Hierin liegt die größte Unsicherheit in der Materialmodellierung von gebranntem Ton, da die Stoffwerte in der Literatur enorm schwanken. Beispielsweise gibt der

<sup>3</sup>Der thermische Ausdehnungskoeffizient kann auch als mechanische Eigenschaft angesehen werden. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit soll er hier als thermische Eigenschaft beschrieben werden.

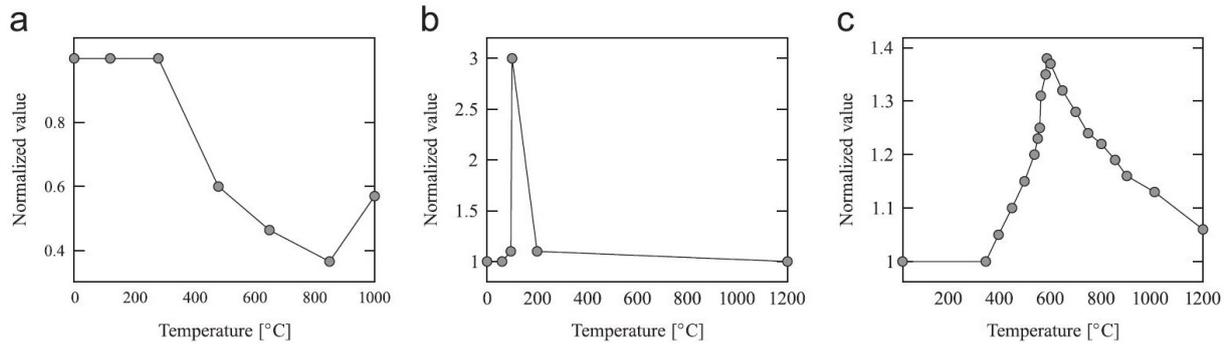


Abbildung 2.9: Thermische Eigenschaften von gebranntem Ton in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) Wärmeleitfähigkeit (b) spezifische Wärmekapazität (c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient [16]

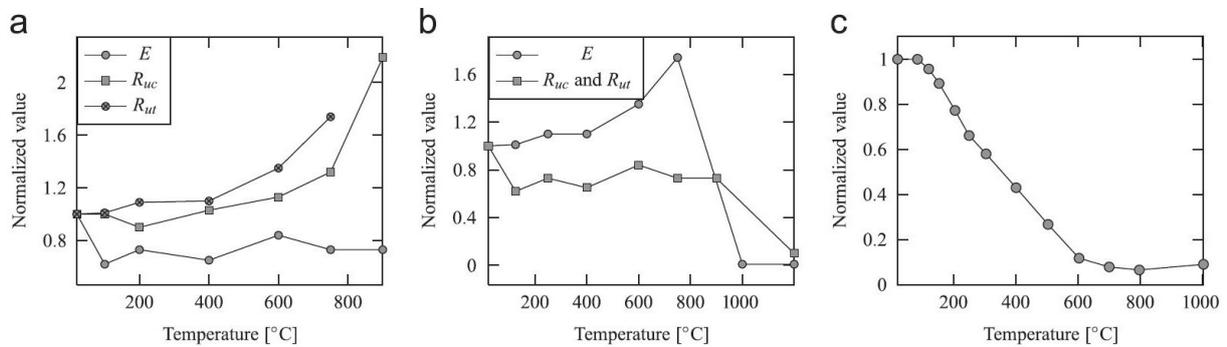


Abbildung 2.10: Mechanische Eigenschaften von gebranntem Ton und Mörtel in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) gebrannter Ton - Probe 1 (b) gebrannter Ton - Probe 2 (c) E-Modul von Mörtel [16]

Autor der Referenzstudie, deren Stoffwertdaten hier gezeigt werden, für zwei unterschiedliche Ziegelproben jeweils unterschiedliche Daten für die thermische Ausdehnung an (siehe Tabelle 2.1), die sich um 20% unterscheiden [15][16]. Die Wahl dieser Stoffwerte ist von hoher Relevanz für eine realistische Berechnung der thermischen Verformung einer Ziegelwand. Messdaten für die in den Feuerwiderstandsprüfungen verwendeten Ziegel liegen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht vor.

**Mechanische Eigenschaften** Abbildung 2.10 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls, der Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit für zwei unterschiedliche Ziegelproben. Der Elastizitätsmodul sackt bei steigenden Temperaturen zunächst um ca. 20% ab, schwankt dann jedoch mit sich weiter erhöhender Temperatur nur noch leicht<sup>4</sup>. Die Druckfestigkeit des gebrannten Tons liegt um ein Vielfaches über seiner Zugfestigkeit, was für seine Verwendung als Baustoff ideal ist. Zur Anwendung kommen im Rahmen dieser Arbeit die Stoffdaten der in den Abbildungen als Probe 2 benannten Werte. Die Querkontraktionszahl wird vereinfacht temperaturunabhängig angenommen.

<sup>4</sup>In der mittleren Teilgrafik b) (Abbildung 2.10) sind Elastizitätsmodul und Zug- bzw. Druckfestigkeit umgekehrt beschriftet.

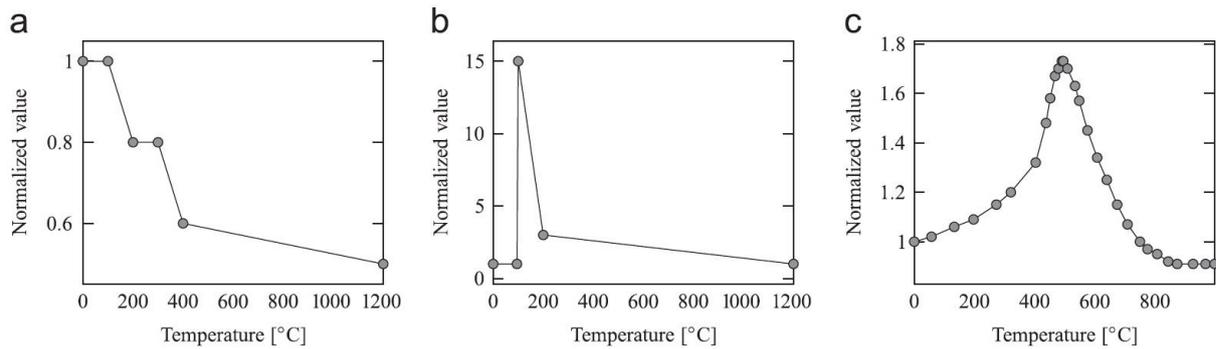


Abbildung 2.11: Thermische Eigenschaften von Mörtel in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) Wärmeleitfähigkeit (b) spezifische Wärmekapazität (c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient [16]

## 2.4.2 Mauermörtel

Mauermörtel ist ein Baustoff, der zur Verbindung von Ziegeln aller Art zu einem Mauerwerk dient. Die Kombination von Ziegeln und Mauermörtel legt die bauphysikalischen Eigenschaften des Mauerwerks fest. Darüber hinaus werden Abweichungen der Ziegel und Maßdifferenzen durch "ungenaueres Maurern" ausgeglichen [14].

Der Mauermörtel besteht aus einem Bindemittel (zB. Zement, Kalk) und einem feinkörnigen Material (zB. Sand). Diese Stoffe werden mit Wasser vermischt, um eine grobe, dickflüssige Masse zu erhalten, die zwischen die Ziegelreihen eingebracht wird, dort erhärtet und eine feste Verbindung herstellt. Im Gegensatz zum Ziegelmaterial, welches eher starr und spröde ist, bietet der Mörtel durch seine Verformbarkeit (und Kriechen) einen Ausgleich von Spannungsspitzen. Zu dicke Mörtelschichten hingegen sind zu vermeiden, da sie aufgrund der schlechteren Dämmung von Mörtel eine Wärmebrücke nach außen bilden [14].

**Thermische Eigenschaften** In Abbildung 2.11 sind die temperaturabhängigen thermischen Stoffdaten von Mauermörtel dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt nach der Verdampfung der im Material gebundenen Feuchtigkeit stark ab. Die Spitze im Verlauf der spezifischen Wärmekapazität existiert genau wie beim gebrannten Ton aufgrund von gebundenem Wasser, welches bei ca. 100 °C zu verdampfen beginnt. Der Feuchtegehalt im Material ist auch hier ein Unsicherheitsfaktor. Im Verlauf des thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat der Mörtel eine charakteristische Spitze im Bereich der Quarzumwandlung.

**Mechanische Eigenschaften** Mörtel besitzt eine viel größere Verformbarkeit als der gebrannte Ton des Ziegelmaterials. Dadurch stellt er im Mauerwerk eine Art Gelenk dar, welches sich auf die Verformung der Gesamtkonstruktion unter Last auswirkt (siehe auch Abschnitt 5). Tabelle 2.1 gibt als Materialmodell einen Zahlenwert von 3 GPa des Elastizitätsmoduls an, was nur ca. ein Viertel des Betrages der Ziegelprobe mit 11 GPa ausmacht. Mit steigender Temperatur fällt dieser Wert jedoch auf ca. 11% seines Ausgangszustandes ab. Dieser Sachverhalt deutet darauf hin, dass auf eine Modellierung des Mörtelverhaltens für die Ziegelwandsimulation nicht verzichtet werden kann.

| Characteristic   | Fired clay            |                       | Mortar joint        |
|--|-----------------------|-----------------------|---------------------|
|  | Test no. 2            | Test no. 3            |                     |
| Density $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )   | 2100                  | 1836                  | 1500                |
| Thermal conductivity<br>$\lambda_{\text{th}}$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 0.7                   | 0.4                   | 1.5                 |
| Heat capacity $C_p$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )                          | 870                   | 870                   | 1000                |
| Young modulus $E$ (GPa)  | 11                    | 5.2                   | 3                   |
| Ultimate tensile resistance $R_{ut}$ (MPa)   | 8                     | 5                     | –                   |
| Ultimate compressive<br>resistance $R_{uc}$ (MPa)  | 70                    | 28                    | –                   |
| Poisson's ratio $\nu$  | 0.22                  | 0.22                  | 0.25                |
| Thermal expansion coefficient<br>$\alpha_{\text{th}}$ ( $^{\circ} \text{K}^{-1}$ )                   | $5.25 \times 10^{-6}$ | $4.36 \times 10^{-6}$ | $10 \times 10^{-6}$ |

Tabelle 2.1: Stoffwerte von gebranntem Ton und Mörtel bei Raumtemperatur [16]; Für diese Arbeit verwendet wurde jene Tonprobe, die hier als Test no. 2 bezeichnet wird.

### 2.4.3 Beton

Beton besteht üblicherweise aus Zement und einem Zuschlag, z. B. Sand. Er zeichnet sich durch eine sehr hohe Druckfestigkeit aus. Beton tritt in den Modellen der Ziegelwand als Kern der Stürze über der Türe in Erscheinung. Er hat dort in Verbindung mit Stahlbewehrungen, welche die Zugkräfte aufnehmen sollen, eine versteifende Wirkung auf das Verformungsverhalten der Wand.

**Thermische Eigenschaften** Genauso wie beim Mörtel hat der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität von Beton eine Spitze im Bereich von ca. 100 °C (siehe Abbildung 2.12). Die Höhe dieses Maximums hängt stark von dem Feuchtegehalt im Material ab, was wieder eine Unsicherheit in der Modellbildung darstellt. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt mit steigender Temperatur kontinuierlich ab, was durch ein Entweichen der Feuchtigkeit erklärt werden kann. Dennoch wurde für diese Arbeit ein konstanter Wert von 0,72 W/mK für die Wärmeleitfähigkeit (*Ansys Mechanical* Standardwert) verwendet.

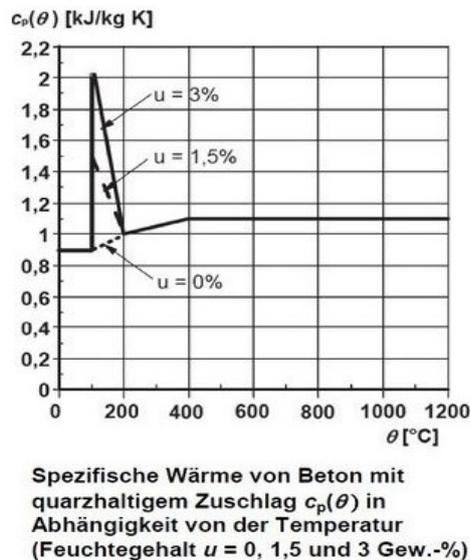


Abbildung 2.12: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Beton [17]

Die thermische Ausdehnung von Beton liegt für einen weiten Temperaturbereich in einer ähnlichen Größenordnung wie jene von Stahl. Dadurch entstehen im niedrigen Temperaturbereich kaum Eigenspannungen durch unterschiedliche Temperatúrausdehnungen<sup>5</sup>. Bei höheren Temperaturen ab ca. 550 °C unterscheiden sich die Werte von Beton und Stahl jedoch deutlicher. Dann entstehen thermische Eigenspannungen im Material und es kann zur Rissbildung kommen. [18]

**Mechanische Eigenschaften** Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl wurden innerhalb dieser Arbeit als konstant angenommen ( $E=30.000$  MPa,  $\nu=0,18$ ). Es existiert mit Sicherheit eine Temperaturabhängigkeit der mechanischen Kennwerte. Weil der Beton sich jedoch in einer

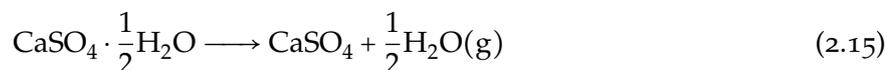
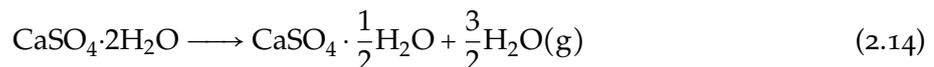
<sup>5</sup>Aus diesem Grund passiert bei Stahlbetonkonstruktionen im üblichen Außentemperaturbereich kein Abplatzen.

Tonschale (Sturz) befindet, damit im Wandinneren liegt und darüber hinaus eine hohe spezifische Wärmekapazität aufweist, wurden die Werte gerechtfertigt.

#### 2.4.4 Gips

Gips ist in dieser Arbeit in Form von Rigipsplatten<sup>6</sup> mit einer Stärke von 12,5 mm als Verkleidung der Leichtbauwandkonstruktion relevant. Beim Aufheizen kommt es im Gips zu mehreren chemischen Reaktionen, die einen großen Einfluss auf den Wärmetransport im Material haben. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf die Arbeiten von Wakili et al. [19] und Langbauer [11] verwiesen. Auf deren Publikationen basieren auch die unten angegebenen Zusammenhänge und Stoffdaten.

Der Hauptbestandteil von Gips ist Calciumsulfat-Dihydrat ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Bei ca. 80°C beginnt sich Wasser aus der Gitterstruktur von Calciumsulfat-Dihydrat zu lösen. Die chemische Reaktion, die dabei abläuft, ist jene nach Gleichung 2.14. Dieser Vorgang ist stark endotherm und ist bei ca. 125 °C abgeschlossen. Erhöht man die Temperatur weiter, so läuft im Bereich von 150 °C eine weitere chemische Reaktion nach Gleichung 2.15 ab. Das restliche Wasser löst sich ebenfalls. Nur  $CaSO_4$  bleibt übrig.



Gipsplatten für feuerwiderstandsfähige Strukturen enthalten zusätzlich Calciumcarbonat ( $CaCO_3$ ). Dieses erfährt bei einer Erwärmung über 800°C die Reaktion nach Gleichung 2.16. Es zerfällt in Calciumoxid ( $CaO$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ). Auch diese Reaktion ist ein endothermer Vorgang.



**Thermische Eigenschaften** Die Wärmeleitfähigkeit von Gips sinkt im Bereich zwischen 80 °C und 125 °C stark ab (siehe Abbildung 2.13). Erklärt werden kann dies durch das oben beschriebene Herauslösen von Wasser, welches eine gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, aus der Gitterstruktur des Calciumsulfat-Dihydrat. Bei höheren Temperaturen steigt die Wärmeleitfähigkeit von Gips jedoch wieder an, was durch Gefügeänderungen und das daraus folgende Verschmelzen von Gipsfasern erklärt wird [2].

Am deutlichsten machen sich die oben beschriebenen chemischen Abläufe im temperaturabhängigen Verlauf der spezifischen Wärmekapazität von Gips bemerkbar. In Abbildung 2.13 verursachen diese endothermen Reaktionen den ersten großen Anstieg auf bis zu 12.000 J/kgK, gefolgt von einem kleineren Peak auf ca. 7.800 J/kgK. Diese hohen Beträge versprechen ein gutes Aufnahmevermögen von Wärme im Brandfall, darum ist Gips für feuerwiderstandsfähige Konstruktionen

---

<sup>6</sup>Der Name Rigips ist ein Unternehmensname, ist jedoch zum Synonym für Gipsplatten geworden.

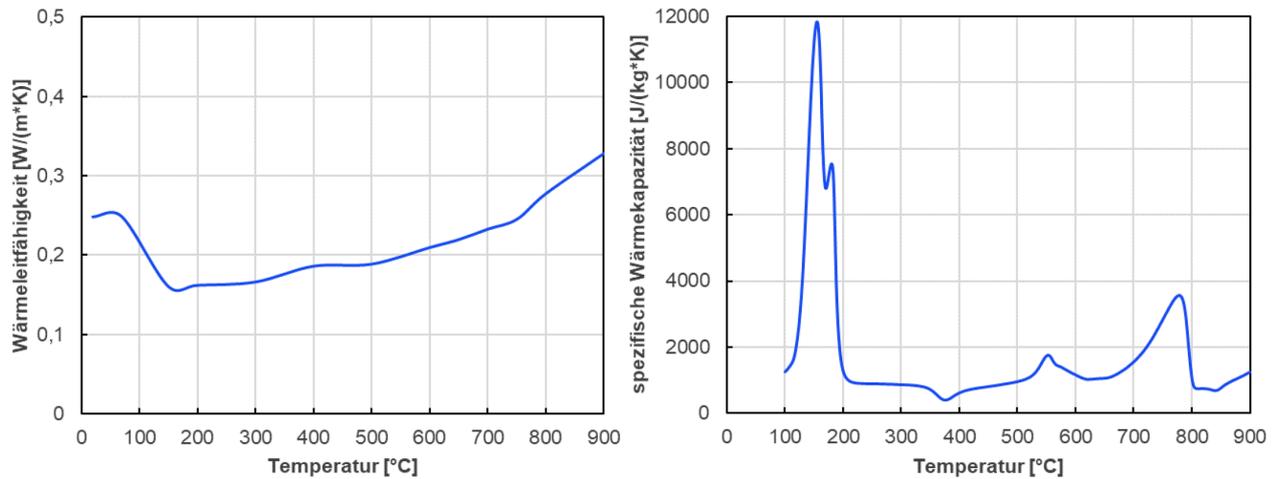


Abbildung 2.13: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Gips in Abhängigkeit von der Temperatur [11]

ein beliebter Baustoff. Nach dem Durchschreiten dieser Spitzen im Verlauf bleiben die Werte auf niedrigerem Niveau, bis sie schließlich im Bereich um die 800 °C erneut ansteigen, was auf die endotherme Reaktion Gleichung 2.16 zurückzuführen ist.

Es soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass der aus dem Gips ausgetretene Wasserdampf Auswirkungen auf die Wärmeleitung innerhalb der Türe und in den Wandkonstruktionen<sup>7</sup> hat. So kondensiert der Dampf zunächst an Flächen, die an einem frühen Zeitpunkt des Experiments noch eine geringere Temperatur als die Kondensationstemperatur haben. Dadurch werden einerseits diese Bereiche vorzeitig erwärmt, andererseits wird das dort kondensierte Wasser im späteren Verlauf des Versuchs wieder verdampft, wodurch sich die "scheinbare" spezifische Wärmekapazität der kondensatbenetzten Regionen erhöht. Das Vorhandensein von Wasserdampf erschwert also die Berechnung der Temperaturverteilung im Lösungsbereich und bedarf weiterer Untersuchungen.

Langbauer [11] beschreibt, dass sich Gips ab ca. 120 °C bei Temperaturerhöhung zusammenzieht, anstatt sich weiter auszudehnen. Dieser Effekt konnte in Vorarbeiten - z. B. von Pletzer [2] - ignoriert werden, weil der Gips keine strukturmechanisch relevante Rolle für dessen Simulationen hatte. Weil die Gipsplatten mit steigenden Temperaturen stark an Festigkeit verlieren, wurde die negative Temperatúrausdehnung, dargestellt in Abbildung 2.14, auch für diese Arbeit nicht berücksichtigt. Ein detailliertes thermo-mechanisches Materialmodell für Gips kann in Folgearbeiten erstellt werden.

**Mechanische Eigenschaften** Das mechanische Verhalten von Gips ist von einem deutlichen Festigkeitsverlust bei höheren Temperaturen gekennzeichnet. Die Werte dazu stammen aus Heißbiegefestigkeitsprüfungen. Dabei wurden die maximale Biegespannung und die dazugehörige Verformung von Proben nach unterschiedlichen Aufheizzeiten und bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Daraus lässt sich unter Annahme von näherungsweise linearen Zusammenhängen ein Verlauf des temperaturabhängigen Elastizitätsmoduls gemäß Abbildung 2.15 errechnen.

<sup>7</sup>In der Brandschutztür befindet sich eine Dämmschicht aus Gips, die Leichtbauwände sind mit Gipsplatten verkleidet.

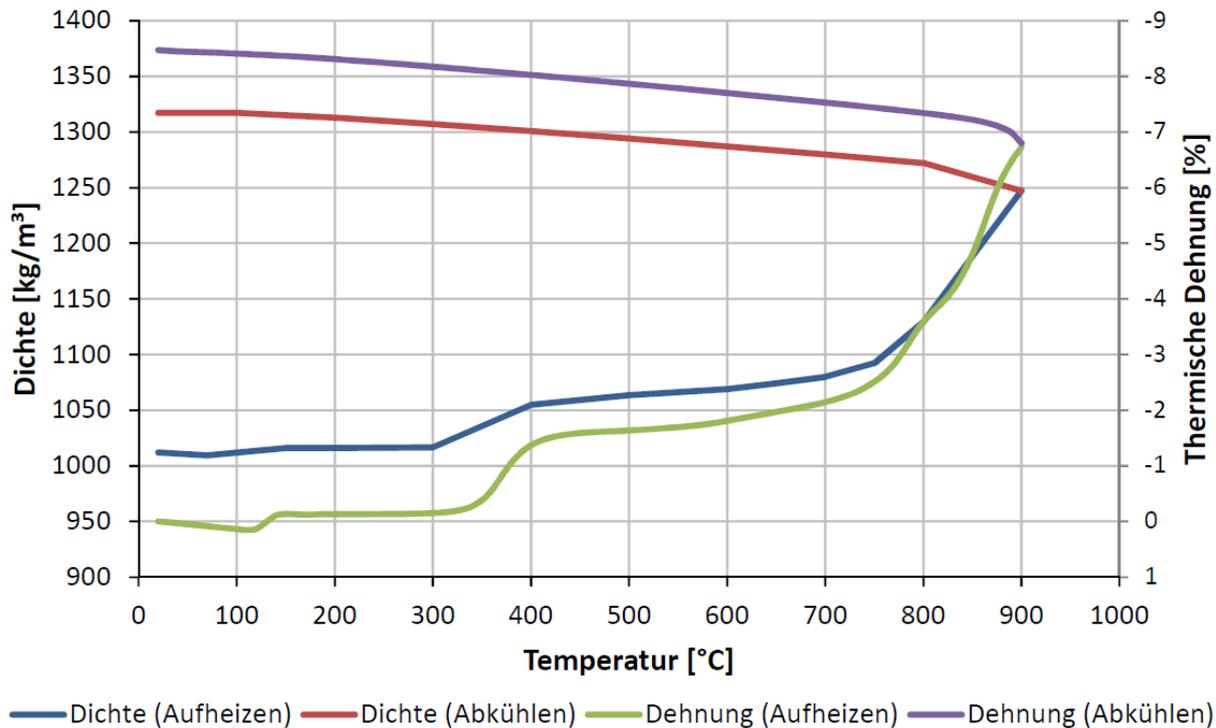


Abbildung 2.14: Temperaturabhängige Dichte und Dehnung von Gipsproben nach Langbauer (Aufwärm- und Abkühlkurven) [11]

Nach längeren Aufheizzeiten ist die mittlere Temperatur in den Proben höher, wodurch sich niedrigere Elastizitätswerte ergeben. Als relevanter Fall für die Simulation der Leichtbauwände kommt nur der Verlauf mit der längsten Aufheizzeit infrage, da das Aufwärmen auch in der Wandkonstruktion langsam und kontinuierlich erfolgt. Allerdings ist der wahre Betrag tendenziell etwas höher<sup>8</sup>, da die Annahme der Linearität bis zum Biegespannungsmaximum nicht ganz zutrifft. Im hohen Temperaturbereich verliert der Gips seine Festigkeit völlig, was sich auch durch Beobachtungen der realen Brandversuche bestätigen lässt.

Die Querkontraktionszahl ist mit einem konstanten Wert von 0,3 eine reine Annahme.

## 2.4.5 Stahl

Das Materialmodell für Stahl ist jenes, welches auch von Pletzer [2] für die Berechnung der Türverformung eingesetzt wurde. Es handelt sich dabei um einen Baustahl mit der Bezeichnung S355. Der Kohlenstoffgehalt beträgt ca. 0,2%. Dieses Modell wurde auch für die verzinkten Stahlprofile in den Leichtbauwänden angewendet.

**Thermische Eigenschaften** Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität von Stahl sind stark mit den Veränderungen des Kristallgitters beim Erwärmen verbunden. Für

<sup>8</sup>Durch vereinfacht linear angenommene Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Kurve, werden mit den aus den Heißbiegeprüfungen gewonnenen Werten tendenziell kleinere Elastizitätswerte (geringere Steigungen) berechnet, als tatsächlich vorhanden.

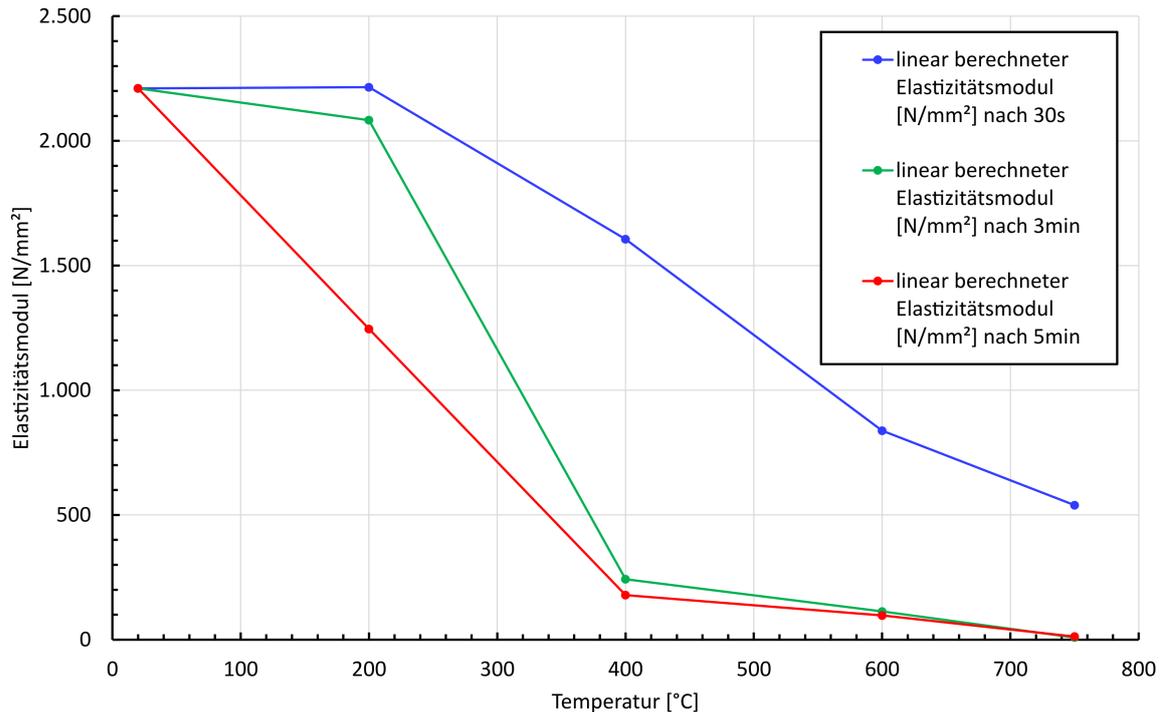


Abbildung 2.15: Temperaturabhängiger Elastizitätsmodul von Gips bei verschiedenen Aufheizzeiten (30 s, 3 min, 5 min)

einen Stahl mit 0,2 % Kohlenstoffgehalt beginnt, wie dargestellt in Abbildung 2.16, bei 723 °C die Umwandlung von einem Ferrit-Perlit Gefüge in Austenit. Dabei klappt das kubisch-raumzentrierte (krz) Ferritgitter in das kubisch-flächenzentrierte (kfz) Austenitgitter um [20]. Diese Gefügeveränderungen sind endotherme Vorgänge, benötigen also Energiezufuhr. Dadurch ergeben sich Knicke im Verlauf der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität.

Wie in Abbildung 2.17 gezeigt, sinkt die Wärmeleitfähigkeit von Stahl bis in den Bereich der Gefügeumwandlung allmählich ab. Bei 723 °C erfährt sie einen Knick um bei 825 °C, wo nur noch Austenit im Gefüge vorhanden ist, ihr Minimum zu erreichen. Danach steigt sie bei weiterer Erwärmung wieder an. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass Stahl von allen relevanten Materialien im Brandversuch jenes mit der besten Wärmeleitfähigkeit ist. Sie ist im Ausgangszustand (Raumtemperatur) mit ungefähr 50 W/mK ca. 90-fach höher als jene von gebranntem Ton (0,4-0,7 W/mK) und sogar 200-fach höher als jene von Gips (0,25 W/mK).

Auch die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität wird durch die Gitterumwandlungen beeinflusst. Sie steigt in Abbildung 2.17 bis ca. 723 °C überproportional an, fällt aber sobald nur noch kfz-Austenitgefüge vorhanden ist, stark auf nur noch ca. die Hälfte des Höchstwertes ab. Mit sich weiter erhöhender Temperatur steigt auch die spezifische Wärmekapazität wieder an.

Der Koeffizient der thermischen Ausdehnung des Stahls wächst von einem Ausgangswert von ca.  $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  bei Raumtemperatur auf ca. das Doppelte an. Die charakteristischen Knicke finden sich auch hier (siehe Abbildung 2.18).

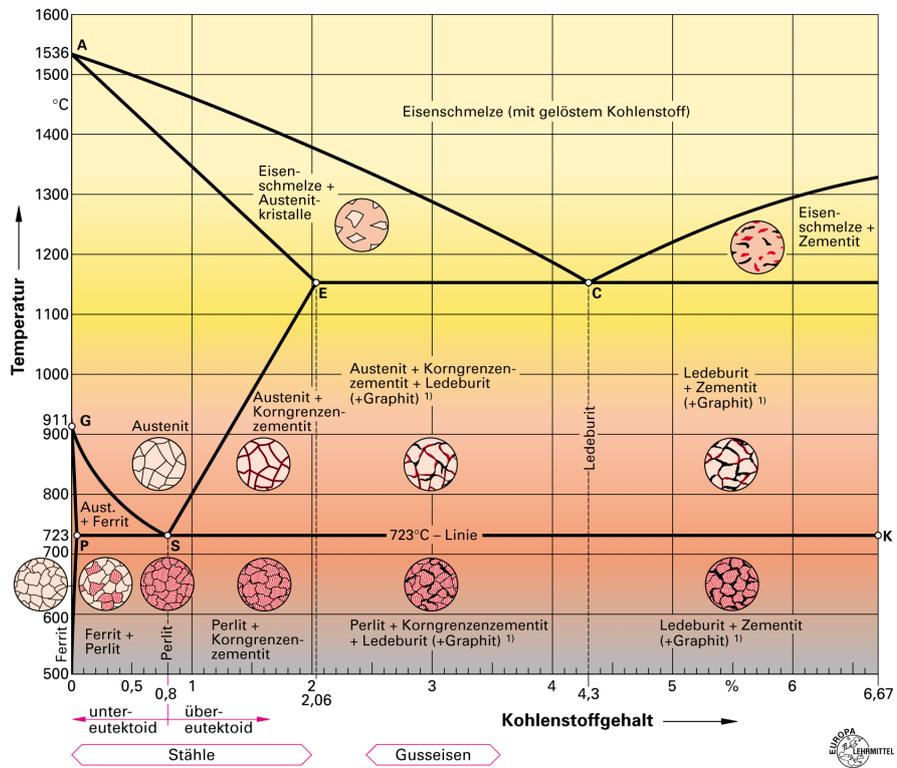


Abbildung 2.16: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [20]

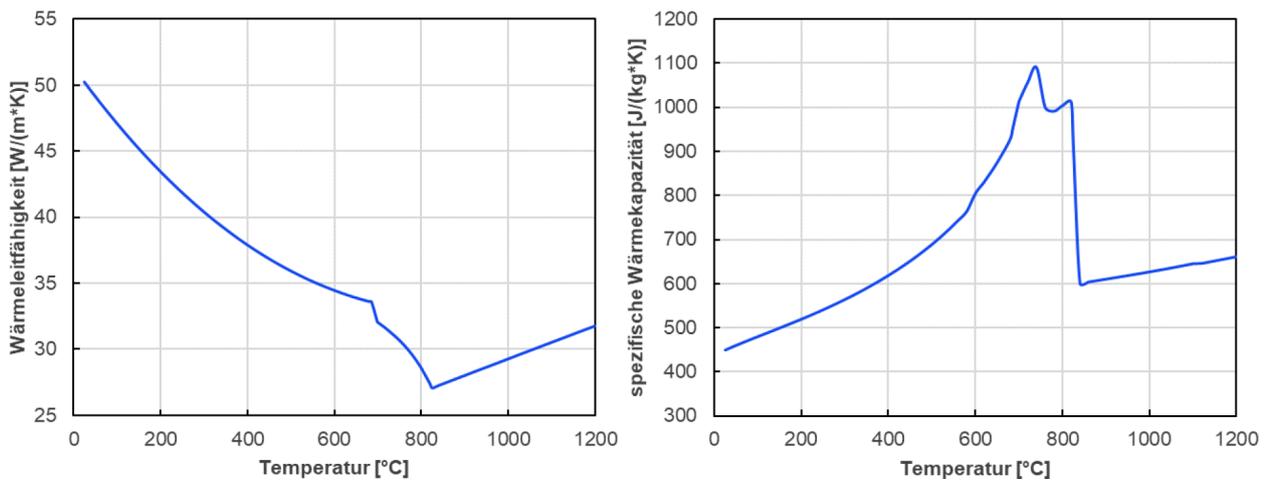


Abbildung 2.17: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von S355 [2]

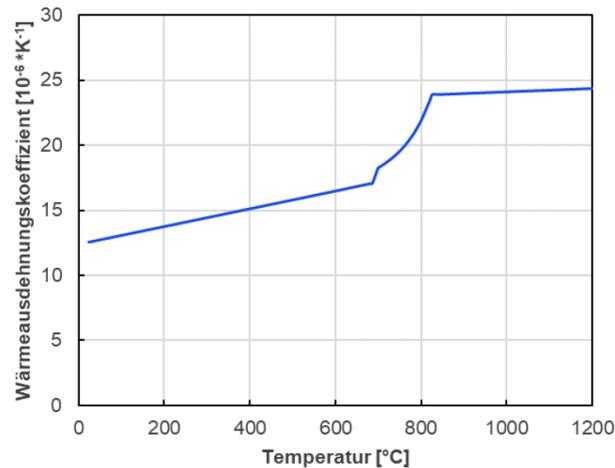


Abbildung 2.18: Temperaturabhängiger Wärmeausdehnungskoeffizient von S355 [2]

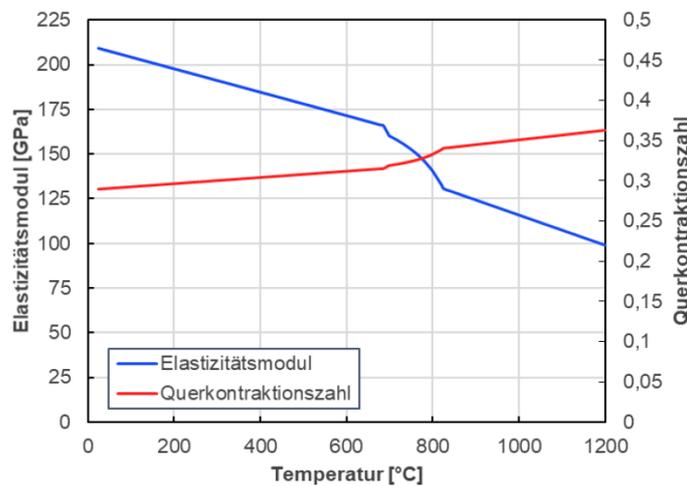


Abbildung 2.19: Temperaturabhängige Stoffdaten: Querkontraktionszahl und Elastizitätsmodul von S355 [2]

**Mechanische Eigenschaften** Zur Modellierung der thermischen Verformung werden noch der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl benötigt. Um darüber hinaus auch plastische Verformungseffekte zu berücksichtigen, wird ein temperaturabhängiges Modell für multilineare Verfestigung verwendet.

Der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl zeigen nach Abbildung 2.19 in ihrer Temperaturabhängigkeit gegenläufiges Verhalten. Während der Elastizitätsmodul mit steigender Temperatur abfällt, erhöht sich die Querkontraktionszahl. Auch bei diesen Stoffwerten sind die Gefügeumwandlungen als Unregelmäßigkeiten in den Verläufen zu erkennen.

Das Modell für die multilineare Verfestigung basiert auf der Arbeit von Zhang et al. [21] und ist in Abbildung 2.20 abgebildet. Dort ist ersichtlich, dass bei höheren Temperaturen bereits geringere Spannungen ausreichen, um eine plastische Dehnung hervorzurufen. Bei 600 °C ist schließlich kaum mehr eine Verfestigung mit steigender Dehnung erkennbar.

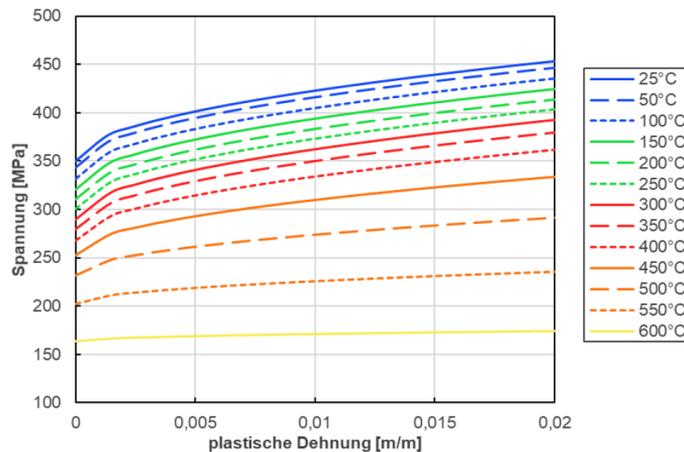


Abbildung 2.20: Temperaturabhängige multilineare Verfestigung von S355 [21]

### 2.4.6 Mineralwolle

Mineralwolle dient sowohl in der Leichtbauwand als auch in der Tür (zusammen mit Gipsplatten) als Dämmmaterial. Die gute Dämmfähigkeit erklärt sich durch die vielen Hohlräume in ihrer Struktur. In der Leichtbauwand wird Mineralwolle vom Typ *Thermarock50*® eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine nicht brennbare und thermisch hochbelastbare Dämmplatte für Brandschutzkonstruktionen im Innenausbau mit einer Mindestrohdichte von  $50 \text{ kg/m}^3$ . Da sie kaum nennenswerte Festigkeit besitzt, wird auf eine Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Mineralwolle an dieser Stelle verzichtet.

**Thermische Eigenschaften** Die thermisch relevanten Daten für die Mineralwolle wurden von Pletzer übernommen [2]. Abbildung 2.21 zeigt die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der Mineralwolle. Die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von nur  $0,036 \text{ W/mK}$  steigt überproportional auf einen Wert von ca.  $0,625 \text{ W/mK}$  bei  $900 \text{ °C}$  an. Die spezifische Wärmekapazität hingegen unterliegt in dem betrachteten Temperaturbereich nur geringen Schwankungen.

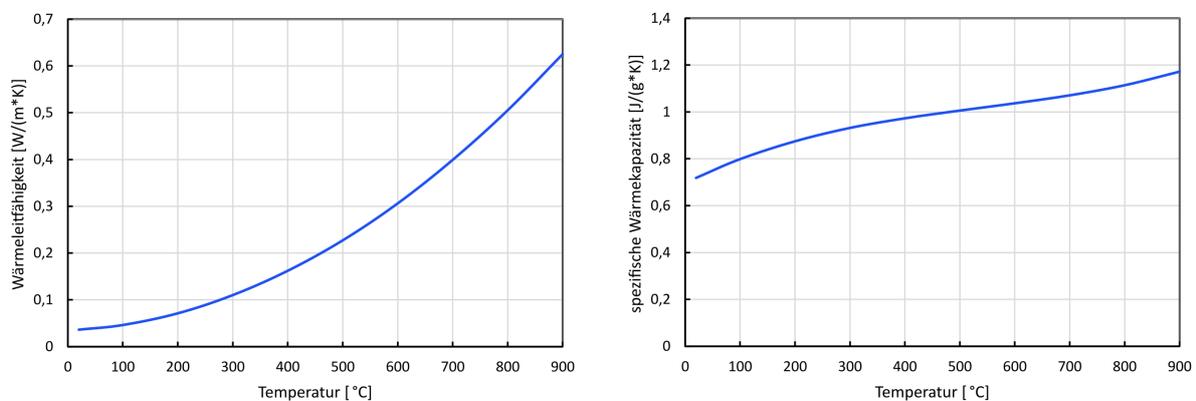


Abbildung 2.21: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der Mineralwolle in Abhängigkeit von der Temperatur [2]

## 3 Numerische Verfahren

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen der zur Bearbeitung dieser Arbeit notwendigen numerischen Verfahren vorgestellt werden. Nachdem die Verbrennungs- und Strömungssimulation bereits Gegenstand von Vorarbeiten (siehe z. B. Pletzer [2]) war, fokussiert sich diese Ausarbeitung auf die Finite-Elemente-Simulation.

### 3.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine Fluidsimulation im eigentlichen Sinne durchgeführt. Die Wärmeleitung durch die Leichtbauwand wurde dennoch mit *ANSYS Fluent* berechnet. Fluent ist im Stande, die Temperaturentwicklung in Festkörpern auf Basis der Finiten-Volumen-Methode zu bestimmen. Auf dieses Werkzeug wurde deshalb zurückgegriffen, weil am Institut für Wärmetechnik bereits Polynomfunktionen in Form von UDFs<sup>1</sup> für die spezifische Wärmekapazität von Gips aus Vorarbeiten vorhanden waren [2][11].

Auf eine Zusammenfassung der Grundgleichungen, der Diskretisierung (Finite-Volumen) und der Lösungsverfahren wird an dieser Stelle verzichtet. Stattdessen sei auf Fachliteratur wie beispielsweise *Numerische Strömungsmechanik* von Ferziger et al. [24] verwiesen.

### 3.2 Finite-Elemente-Methode (FEM)

In diesem Abschnitt wird ein Einblick in das Prinzip der Finite-Elemente-Methode gegeben. Zunächst wird ausgehend von physikalischen Grundgleichungen das Konzept der FEM-Berechnung erläutert. Danach wird auf Aspekte der Nichtlinearität eingegangen, welche für diese Arbeit relevant waren. Als Literaturquellen für die folgenden Ausführungen dienten die Werke *The finite element method* von Zienkiewicz et al. [25], *Nichtlineare Finite Elemente Berechnungen* von Rust [26] sowie das Vorlesungsskriptum *Numerische Verfahren in der Energietechnik* von Hochenauer [9].

#### 3.2.1 Grundlagen

Die FEM ist ein häufig für numerische Berechnungen in der Strukturmechanik eingesetztes Werkzeug. Die Grundidee liegt darin, das Lösungsgebiet in diskrete Abschnitte, die finiten Elemente, aufzuteilen. Dadurch wird eine näherungsweise Lösung von analytisch nicht mehr

---

<sup>1</sup>engl. *User-Defined-Functions*

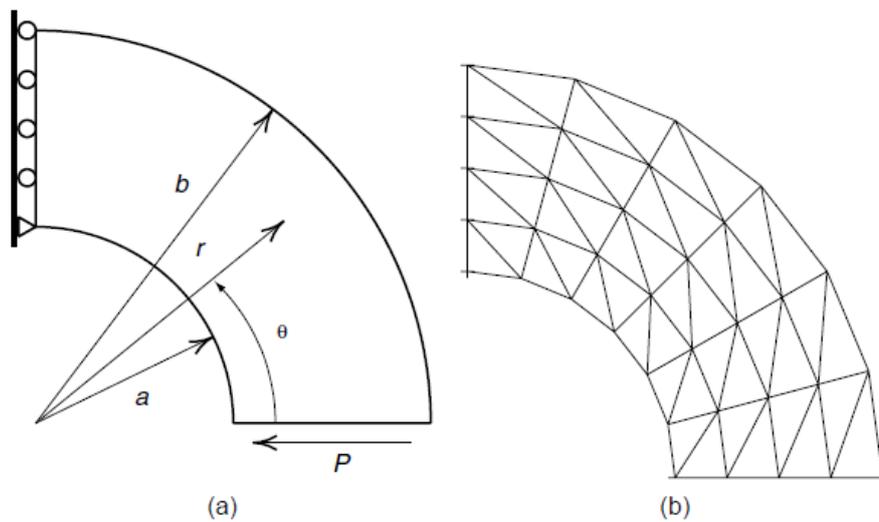


Abbildung 3.1: a) Originalgeometrie b) FEM-vernetzte Geometrie [25]

handhabbaren Problemstellungen ermöglicht. Wie beispielhaft in Abbildung 3.1 gezeigt, wird eine gegebene Geometrie mit endlich großen Elementen vernetzt. Im Gegensatz zur Finiten-Volumen-Methode, wo die gesuchten Werte in den Zellmittelpunkten ausgewertet werden, werden in der FEM die Zellränder ausgewertet.

**Grundgleichungen** Neben den physikalischen Erhaltungsgleichungen, namentlich der Impulserhaltung in differentieller Form (Gleichung 3.1)

$$\rho \vec{a} = \vec{f} + \nabla S \quad (3.1)$$

und der Drehimpulserhaltung, welche auf die Symmetrie des Spannungstensors  $\mathbf{S}$  gemäß Gleichung 3.2 führt, werden noch kinematische Gleichungen und ein Materialgesetz benötigt, um Verformungen und Spannungen berechnen zu können. Erstere beschreiben einen Zusammenhang zwischen Verzerrungen  $\epsilon$  und Verschiebungsgradienten  $\nabla \mathbf{u}$ . Unter der Annahme von kleinen Deformationen ist dieser Zusammenhang mit Gleichung 3.3 gegeben.

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}^T \quad (3.2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \} \quad (3.3)$$

Die einfachste Variante eines Materialgesetzes ist durch das Hookesche Gesetz gemäß Gleichung 3.4 gegeben. Damit wird ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Verzerrung beschrieben.

$$\mathbf{S} = \mathbf{C} : \nabla \mathbf{u} \quad (3.4)$$

Neben diesen vereinfachten Definitionen für kinematische Zusammenhänge und Materialgesetz gibt es noch weitere Möglichkeiten, welche auf nichtlineare Gleichungssysteme führen. Auf die nichtlinearen Aspekte von FEM-Berechnungen wird mit Unterabschnitt 3.2.2 eingegangen.

**FEM** Die zuvor angeführten Grundgleichungen führen auf ein partielles Differenzialgleichungssystem. Dieses gilt es nun in ein System algebraischer Gleichungen zu überführen und zu lösen. Dazu wird die exakte Lösung mit sogenannten Ansatzfunktionen  $N_m$  wie in Gleichung 3.5 angenähert.

$$\Phi \cong \hat{\Phi} = \Psi + \sum_{m=1}^M a_m N_m \quad (3.5)$$

Darin entspricht  $\Phi$  einem Vektor aus noch unbekanntenen Größen, wie beispielsweise den gesuchten Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung.  $\Psi$  steht für die Berücksichtigung von Randbedingungen. Die Parameter  $a_m$  gilt es nun in geeigneter Weise zu bestimmen, sodass der mittlere Fehler (Gleichung 3.6) verschwindet.

$$R_\Omega = \Phi - \hat{\Phi} \quad (3.6)$$

Dazu werden vorerst noch Gewichtungsfunktionen  $W_l$  eingeführt (Gleichung 3.7). Bei der Methode von Galerkin<sup>2</sup> werden diese Gewichtungsfunktionen ident mit den Ansatzfunktionen gewählt (Gleichung 3.8). Dies ist nur eine Möglichkeit der Wahl von Gewichtungen, reduziert aber den Rechenaufwand und wird daher häufig angewendet.

$$\int_{\Omega} W_l R_\Omega d\Omega = \int_{\Omega} W_l (\Phi - \hat{\Phi}) d\Omega = 0 \quad \text{mit } l = 1, 2, \dots, M \quad (3.7)$$

$$W_l = N_l \quad (3.8)$$

Somit kann ein System von linearen Gleichungen wie in Gleichung 3.9 gefunden werden. Darin ist  $\bar{K}$  die Koeffizientenmatrix mit den Einträgen  $a_m$ ,  $\Phi$  der Vektor mit unbekanntenen Parametern (Verschiebungen oder Temperaturen)<sup>3</sup> und  $\bar{f}$  der Lastvektor.

$$\bar{K}\Phi = \bar{f} \quad (3.9)$$

Die Einträge der Matrix und des Lastvektors berechnen sich gemäß Gleichung 3.10 bzw. Gleichung 3.11. Nun können die gesuchten Größen berechnet werden.

$$K_{lm} = \int_{\Omega} N_l N_m dx \quad \text{mit } 1 \leq l, m \leq M \quad (3.10)$$

<sup>2</sup>Boris Grigorjewitsch Galjorkin (transkribiert mit Galerkin) 1871-1945, sowjetischer Ingenieur und Mathematiker.

<sup>3</sup>Im Fall von Temperatur als gesuchter Größe ist  $\Phi$  eine Skalar

$$f_l = \int_{\Omega} N_l (\Phi - \Psi) d\Omega \quad \text{mit} \quad 1 \leq l \leq M \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Nichtlinearitäten

Durch die oben beschriebene Vorgehensweise entsteht ein lineares Gleichungssystem, das z. B. mit dem Gauß-Algorithmus gelöst werden kann. Größere Systeme aus nicht linearen Gleichungen sind im Allgemeinen nicht direkt lösbar. Deshalb kommt meist das Newton-Raphson-Verfahren zum Einsatz. Im eindimensionalen Fall lautet dafür die Iterationsvorschrift [9][26]:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (3.12)$$

Darin steht der Index  $i + 1$  für den nächsten Iterationsschritt,  $i_0$  für den Startwert. Diese Art der Nullstellenbestimmung lässt sich auf den  $n$ -dimensionalen Fall mit folgender Notation verallgemeinern [26]:

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i - \left( \frac{\partial \mathbf{d}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \Big|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i} \right)^{-1} (-\mathbf{d}(\mathbf{u}_i)) = \mathbf{u}_i + \mathbf{K}_T^{-1} (-\mathbf{d}(\mathbf{u}_i)) \quad (3.13)$$

$\mathbf{K}_T$  wird Tangentenmatrix oder Tangentensteifigkeitsmatrix<sup>4</sup> genannt. Das Newton-Raphson-Verfahren läuft für mehrere Variablen nach folgendem Algorithmus ab [26].

Wähle Startvektor  $\mathbf{u}_0$ ,  $i = 0$

1. Berechne rechte Seite  $-\mathbf{d}$
2. Berechne  $\mathbf{K}_T$
3. Löse Gleichungssystem  $\mathbf{K}_T \Delta \mathbf{u} = -\mathbf{d}$
4. Berechne  $\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + \Delta \mathbf{u}$

$i \leftarrow i + 1$ , weiter mit 1) bis Konvergenz

Angewendet auf das Problem der Schnittpunktfindung zweier Ellipsen, erkennt man in Abbildung 3.2 folgende Zusammenhänge (gemäß [26]):

- Ein nichtlineares Problem führt nicht unbedingt auf eine eindeutige Lösung.
- Das mit dem Newton-Verfahren erhaltene Ergebnis ist vom Startwert abhängig (falls es mehrere Lösungen gibt). In Abbildung 3.2 führt der Startwert 1 zum rechten Schnittpunkt, der Startwert -6 zum linken Schnittpunkt.
- Die Zwischenlösungen können sich vom gesuchten Ergebnis weit entfernen. Das birgt die Gefahr schlechter Konvergenz bzw., dass gar keine Lösungen gefunden werden können.

<sup>4</sup>In der Mathematik auch Hesse- oder Jacobi-Matrix

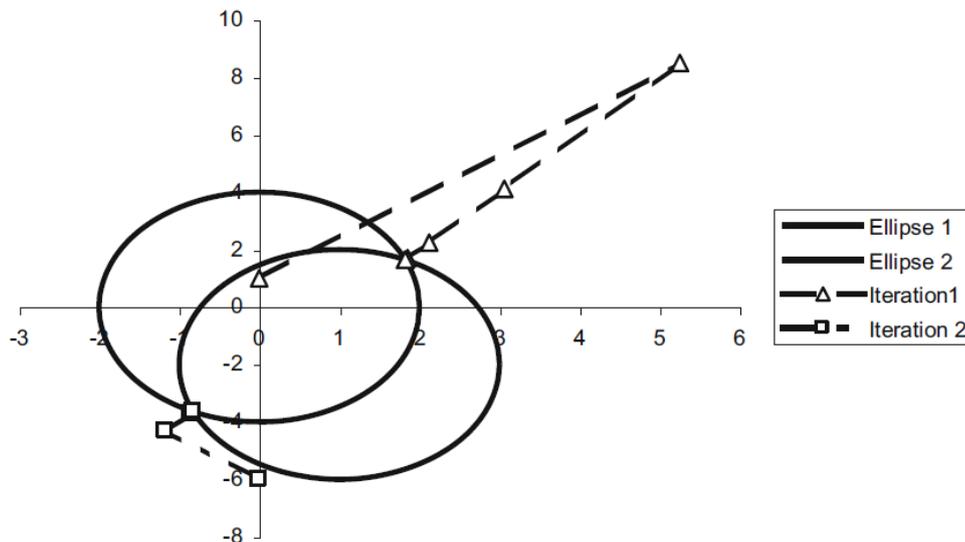


Abbildung 3.2: Newton-Verfahren zur Schnittpunktfindung zweier Ellipsen [26]

Zur Stabilisierung des iterativen Lösungsverfahrens kann das Newton Verfahren gedämpft werden. In Gleichung 3.12 wird dazu ein Parameter  $d$  eingeführt, welcher mit Hilfe von *line search* ermittelt wird. So lässt sich der Konvergenzbereich erweitern. Nachteilig ist dabei jedoch der höhere Rechenaufwand durch nur noch lineare Konvergenz [9].

Rust [26] teilt die große Fülle an möglichen Nichtlinearitäten in drei Hauptabschnitte ein: geometrische Nichtlinearitäten, nicht lineares Materialverhalten und Kontakte.

**Geometrische Nichtlinearität** Bei einer geometrisch nicht linearen Berechnung geht man vom Gleichgewicht am verformten System aus. Dieses bildet die Grundlage für die Eulersche Knicktheorie. Im Kontext dieser Arbeit kam es bei den Simulationen der Leichtbauwand zu Nichtlinearitäten aufgrund Beulen oder Knicken der dünnwandigen Profile. Durch geeignete Randbedingungen und Kontaktwahl konnte dieses Problem weitgehend vermieden werden.

**Nichtlineares Materialverhalten** Bei einem linearen Materialmodell, welches z. B. dem Hooke'schen Gesetz genügt, gibt es eine lineare Korrelation zwischen Spannung und Dehnung. Für nicht lineare Elastizität ist dieser Zusammenhang durch einen nicht linearen zu ersetzen. Wenn diese Funktion eindeutig ist, würden Be- und Entlastung aber immer noch demselben Pfad im  $\sigma - \epsilon$  Diagramm folgen. Für plastisches Materialverhalten bedarf es eines Modells wie in Abbildung 3.3. In dieser Arbeit wurde ein nicht lineares Materialmodell in Form einer temperaturabhängigen multilinearen Verfestigung von Stahl vorgesehen (siehe Abbildung 2.20).

**Kontakt** Eine weitere Ursache für Nichtlinearitäten stellt der Kontakt zwischen Körpern dar. Nur bei der Berührung zwischen zwei Bauteilen können Kräfte übertragen werden. Eine Möglichkeit der Kontaktberücksichtigung stellt das mit Abbildung 3.4 dargestellte System dar. Darin wird ein Zielkörper (Master) und Kontaktkörper (Slave) definiert. Bei jeder Iteration muss

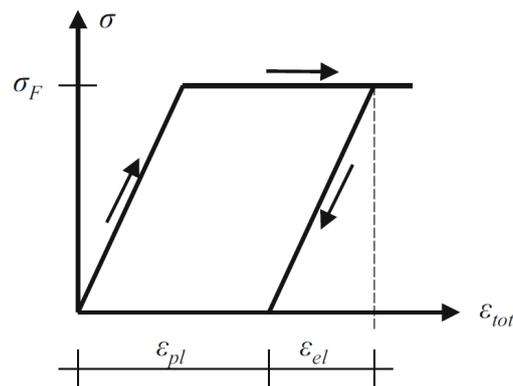


Abbildung 3.3: Ideal plastisches Materialverhalten bei Be- und Entlastung [26]

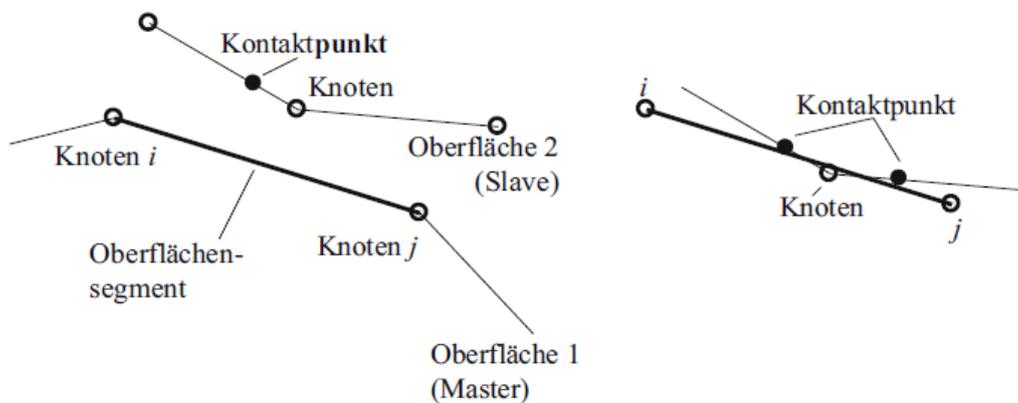


Abbildung 3.4: Kontakte in der FEM [26]

überprüft werden, ob Knoten des Kontaktkörpers die Oberfläche des Zielkörpers durchdrungen haben oder nicht.

Die Wahl von Ziel- und Kontaktkörper ist nicht völlig beliebig, da das Ergebnis der Kontaktabfrage, je nachdem welcher Körper als Kontaktkörper definiert ist, ein anderes Resultat haben kann. Einige Richtlinien zur Definition sind [26]:

1. Bei deutlichen Größenunterschieden sollte der größere Körper als Zielkörper definiert werden.
2. Liegen gekrümmte Körper vor, so sollten konkave, schwächer gekrümmte oder ebene Körper als Zielkörper definiert werden.
3. Überstehende Körper werden als Zielkörper definiert.
4. Die Geometrie mit höherer Ansatzordnung wird als Zielkörper definiert.
5. Bei unterschiedlichen Steifigkeiten sollten die steiferen Körper als Ziel definiert werden.

Werden durch die Kontaktabfrage Überschneidungen festgestellt, so wird abhängig von der Eindringtiefe und der Steifigkeiten der beteiligten Körper eine Rückstellkraft berechnet. Dafür stehen eine Vielzahl von Algorithmen zur Verfügung, wie beispielsweise das Penalty-Verfahren oder das Lagrange-Verfahren. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser sei auf die Fachliteratur von Rust [26] verwiesen.

### 3.2.3 Thermische Expansion

Aufgrund der besonderen Bedeutung, die der Definition des thermischen Expansionskoeffizienten innerhalb dieser Arbeit zukommt, sollen einige Begriffe mit Bezug zur numerischen Berechnung geklärt werden. So bietet kommerzielle FEM-Software grundsätzlich zwei Möglichkeiten, thermische Expansionskoeffizienten (*thermal expansion coefficient, TEC*) als Materialeigenschaft anzugeben: den Sekantenmodul (*instantaneous TEC*) und den Tangentenmodul (*mean TEC* oder auch *secant TEC*).

Wie der Name schon vermuten lässt, ist der Tangentenmodul jener Wert, welcher gemäß Gleichung 3.14 die thermische Dehnung - errechnet mit der gesamten Temperaturdifferenz zwischen dem aktuellen Zustand und einem Referenzwert - ergibt.

$$\epsilon_T = \alpha_{sec} \cdot (T - T_0) \quad (3.14)$$

Diese Definition erfordert zusätzlich die Eingabe der Referenztemperatur  $T_0$ , bei der es keine thermische Dehnung gibt. Sie ist die am häufigsten in der Literatur zu findende Definition, weil sie aus Dilatometermessungen erhalten werden kann [27].

Im Gegensatz dazu existiert auch die alternative Definition des TEC als Tangente der Dehnungs-Temperaturkurve gemäß Gleichung 3.15. Die beiden Varianten können mit Gleichung 3.16 umgerechnet werden.

$$\alpha_{inst} = \frac{d\epsilon_T}{dT} \quad (3.15)$$

$$\alpha_{sec} = \frac{1}{T - T_0} \cdot \int_{T_0}^T \alpha_{inst}(T) dT \quad (3.16)$$

Der Unterschied wird durch Abbildung 3.5 verdeutlicht. Demnach ist die Abweichung besonders bei stark temperaturabhängigen Stoffwerten von Bedeutung. Vor der Eingabe entsprechender Werte in die FEM-Software ist also immer zu klären, welche Art der Ausdehnungsdefinition vorliegt.

### 3.2.4 Numerische Simulation von Wärmetransport

Die Anwendung der FEM beschränkt sich nicht auf strukturmechanische Berechnungen, sondern ist auch auf Wärmeleitungsprobleme anwendbar. In diesem Unterabschnitt sollen einige dafür relevante Aspekte zusammengefasst werden.

**Wärmeleitung** Tritt in den Gleichungen 3.5 ff. die Temperatur anstelle der Verschiebungen, so lässt sich eine FEM-Beschreibung der Wärmeleitungsgleichung (Gleichung 2.5) angeben.

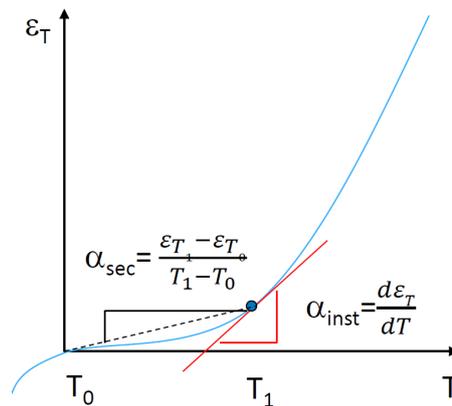


Abbildung 3.5: Unterschied zwischen Sekanten- und Tangentenmodul zur Berechnung der thermischen Ausdehnung [28]

**Randbedingungen** Als Randbedingungen für die Wärmeleitungsgleichung sind folgende Varianten denkbar:

- Eine direkte Temperaturvorgabe auf dem Rand (Dirichlet-Randbedingung)
- Eine Vorgabe des über den Rand fließenden Wärmestroms (Neumann-Randbedingung)
- Vorgabe einer konvektiven Randbedingung (Robin-Randbedingung)
- Eine allgemeine Randbedingung, die bei der Berücksichtigung von Strahlung zur Anwendung kommt.

Die letzten beiden sind für Konvektion- und Strahlungsrandbedingungen der vorliegenden Arbeit von Relevanz. Bei der Temperaturfeldberechnung der Leichtbauwand erfolgte der Lösungsweg über eine direkte, auf Messergebnissen basierende, Temperaturvorgabe.

**Wärmestrahlung** Die Strahlungstransportgleichung (RTE<sup>5</sup>), die mit Gleichung 3.17 angegeben ist, stellt eine allgemeine Gleichung zur Beschreibung der Energieübertragung durch Strahlung dar. Die optische Dichte  $(a + \sigma_s)L$  ist ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl möglicher Strahlungsmodelle. Für viele Anwendungen ist die Annahme, dass der Streukoeffizient  $\sigma_s$  sehr klein ist, gerechtfertigt [9].

$$\frac{\partial I(s, \omega)}{\partial s} = -(a + \sigma_s) I(s, \omega) + a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(s, \omega) \Phi d\omega \quad (3.17)$$

In dieser Arbeit kam das Surface-to-Surface (S2S) Modell zum Einsatz, um die Wärmestrahlung in den Ziegelhohlräumen zu modellieren. Eventuell vorhandener Wasserdampf, der in den Kavitäten vorkommen könnte<sup>6</sup>, wurde dadurch nicht berücksichtigt. Das S2S Modell ist ausschließlich für nicht strahlende Fluide mit einer optischen Dicke von null geeignet. Allein die Oberflächen stehen im Strahlungsaustausch. Eine weitere Einschränkung ist, dass nur graue, diffuse und undurchlässige Flächen modelliert werden können.

<sup>5</sup>engl. *Ray Transfer Equation*

<sup>6</sup>Durch Austreten aus den sich erwärmenden Mörtelschichten.

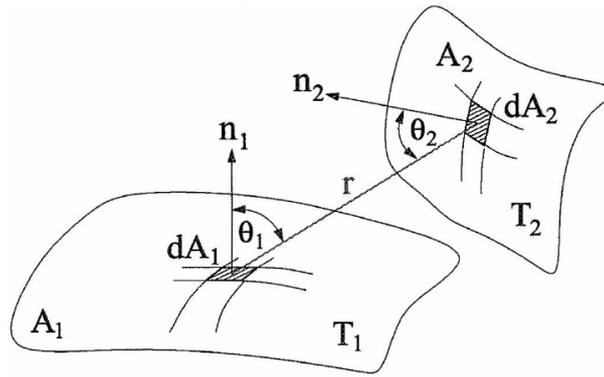


Abbildung 3.6: Im Strahlungsaustausch stehende Flächen [10]

Das S2S Modell basiert auf der Berechnung sogenannter Sichtfaktoren (view factors). Der Faktor  $\phi_{ij}$  ist dabei jener Anteil der von der Fläche  $A_i$  emittierten Strahlungsleistung, welcher auf  $A_j$  auftrifft.

$$\phi_{ij} = \frac{1}{A_i \cdot \pi} \cdot \iint_{A_i A_j} \frac{\cos(\Theta_i) \cdot \cos(\Theta_j)}{r^2} dA_i dA_j \quad (3.18)$$

Als Prinzipskizze dient dazu Abbildung 3.6. In Gleichung 3.18 ist  $A_i$  eine mit  $A_j$  im Strahlungsaustausch stehende Fläche,  $r$  der Abstand zwischen ihnen und  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  die Winkel zwischen den jeweiligen Normalvektoren der Oberflächen und ihrer Verbindungsgerade. Unter Kenntnis dieser Sichtfaktoren, der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen und deren Temperaturen lässt sich ein lineares Gleichungssystem aufstellen und lösen.

Die Sichtfaktordatei muss vor der eigentlichen CFD Berechnung erstellt werden. Bei vielen miteinander in Verbindung stehenden Oberflächen kann dies sehr aufwendig sein. In den Simulationen dieser Arbeit gibt es zwar über 80 Kavitäten pro Ziegel zu berücksichtigen, jedoch stehen in jeder Kavität nur vier Flächen im Strahlungsaustausch. Der Berechnungsaufwand hält sich somit in Grenzen. Mehr dazu im Kapitel zur Modellbildung.

Neben dem S2S-Modell gibt es noch viele weitere Strahlungsmodelle für numerische Berechnungen, insbesondere für die Anwendung bei Strömungsberechnungen. Darunter fallen das Discrete-Ordinates-Modell, das P1-Modell, das DTRM sowie das Rosseland-Modell. Die Wahl ist stark vom Anwendungsfall abhängig. Für weitere Informationen gibt es umfangreiche Fachliteratur.



# 4 Versuchswände und Messergebnisse

In diesem Kapitel soll die Versuchssituation erläutert werden. Dazu erfolgt eine kurze Beschreibung des Prüfofens und der benötigten Messeinrichtungen zur Bestimmung der Temperaturen und Verschiebungen. Das für alle Feuerwiderstandsprüfungen verwendete Prüfobjekt (Brand-schutztür) wird kurz vorgestellt.

Anschließend wird jeweils der Aufbau der Ziegel- und Leichtbauwände im Versuch geschildert. Einen wichtigen Teil des Kapitels stellt die Präsentation und Interpretation der Verschiebungsmesswerte dar. Die Deutung dieser Versuchsergebnisse ermöglicht Rückschlüsse, die für die Modellbildung von Relevanz sind. Diese werden am Ende der jeweiligen Unterkapitel zusammengefasst.

## 4.1 Prüfofen

Abbildung 4.1 bietet einen Blick in den Ofen vor der Montage der Wand. Der Ofen hat eine Breite von ca. vier Metern. Die Höhe ist verstellbar, um unterschiedliche Szenarien abbilden zu können. Für die Versuche, die Gegenstand dieser Arbeit sind, beträgt die eingestellte Höhe 4,5 m.

Über vier seitlich angeordnete Brenner wird der Brennstoff (Erdgas) zugeführt und verbrannt. Die Auswirkungen der dazugehörigen Leitbleche waren ein Teil der Untersuchungen von Mayrhofer [29]. Über einen Auslass in der unteren Hälfte des Ofens verlassen die Rauchgase das System.

### 4.1.1 Versuchsablauf

Die Wände inkl. der Prüfkörper werden im Vorfeld der Versuche - meist im zeitlichen Abstand von einem Tag vor dem Versuchsstart - aufgebaut. Eine gewisse Wartezeit ist notwendig, um die erforderliche Konditionierung zu gewährleisten. Der Stahlrahmen mit den Wänden wird von einem Kran zum Ofen transportiert. Nach der Montage wird der Ofen durch die Wandkonstruktion nach vorne hin abgeschlossen.

Während des gesamten Versuchsverlaufs werden Temperaturen im Ofen und im Prüfkörper sowie die Verschiebungen von Messpunkten aufgezeichnet. Die Brenner werden geregelt, um Abweichungen von der ETK gering zu halten. Bei Erfüllung der Anforderungen, oder bei Versagen des Prüfkörpers, wird der Versuch beendet.

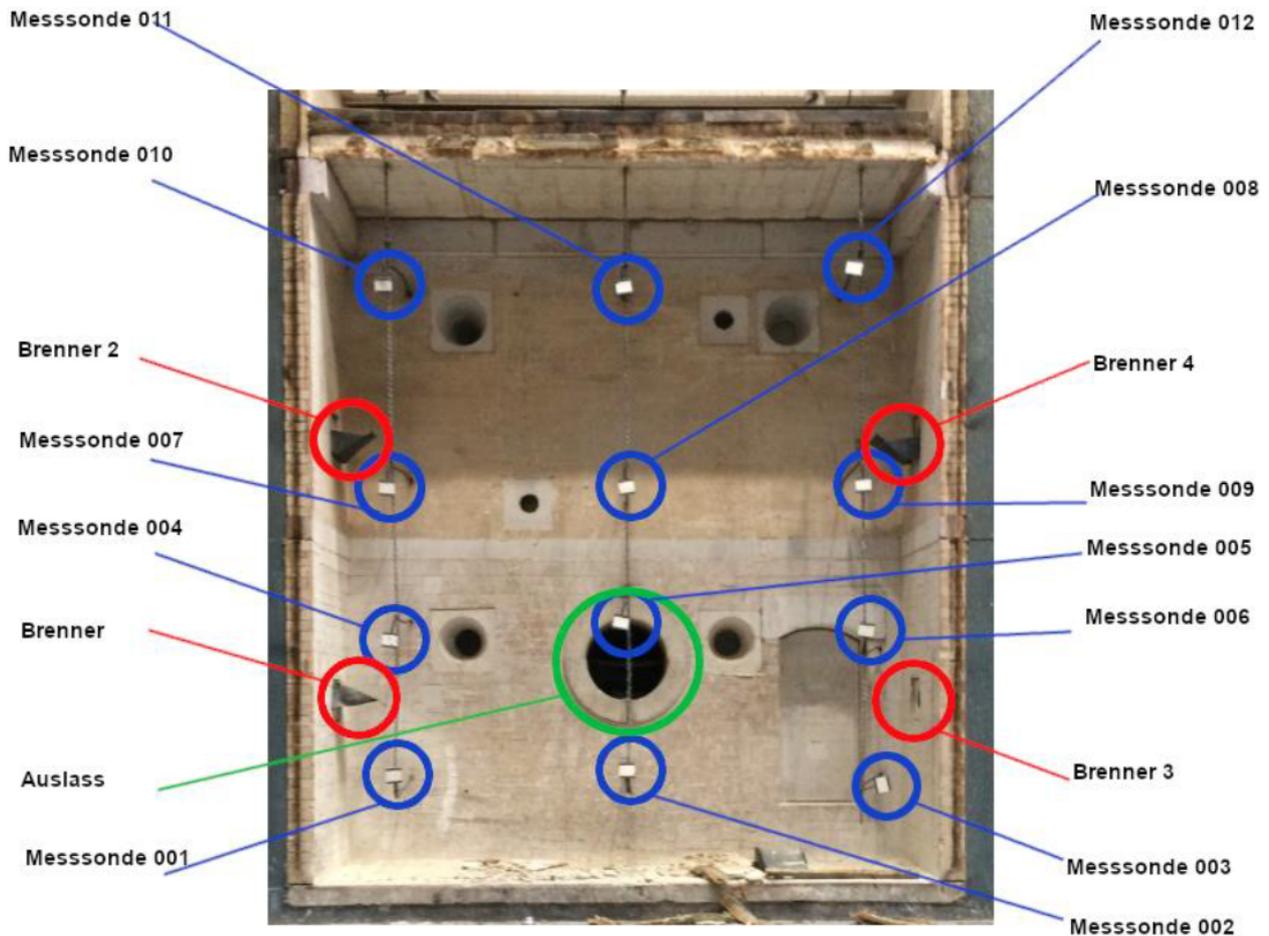


Abbildung 4.1: Blick in den Versuchsofen ohne Wand [2]

### 4.1.2 Messeinrichtungen

**Plattenthermoelemente im Ofen** Innerhalb des Ofens gibt es zur Bestimmung des zeitlichen Temperaturverlaufs zwölf Plattenthermoelemente, welche in Abbildung 4.1 als Messsonden bezeichnet werden. Pletzer beschreibt in seiner Arbeit ein gutes generelles Übereinstimmen der Temperaturmessergebnisse im Ofen [2] mit der ETK und insbesondere kein Unter- oder Überschreiten der Grenzkurven in allen Messsonden, was zur Modellbildung für die Wärmeübertragung auf die Wände genutzt wurde.

**Verschiebungsmessung mit Kamera** Die Verschiebungsmessung erfolgt in den Versuchen optisch mithilfe einer Kamera. Diese kann durch eine geeignete Software Markierungen auf der Wand (die aufgeklebten weißen Punkte auf schwarzem Grund in Abbildung 4.4) erkennen und deren Verschiebung aufzeichnen. Auf eine Beschreibung des Messprinzips (Photogrammetrie) wird an dieser Stelle verzichtet.

Besonders bei kleinen Verschiebungen kommt es häufig zu starken relativen Schwankungen in der Aufzeichnung, deshalb wurden alle Messwertverläufe geglättet, was anhand des Messpunktes A der Ziegelwand mit Tür in der Mitte in Abbildung 4.2 dargestellt wird.

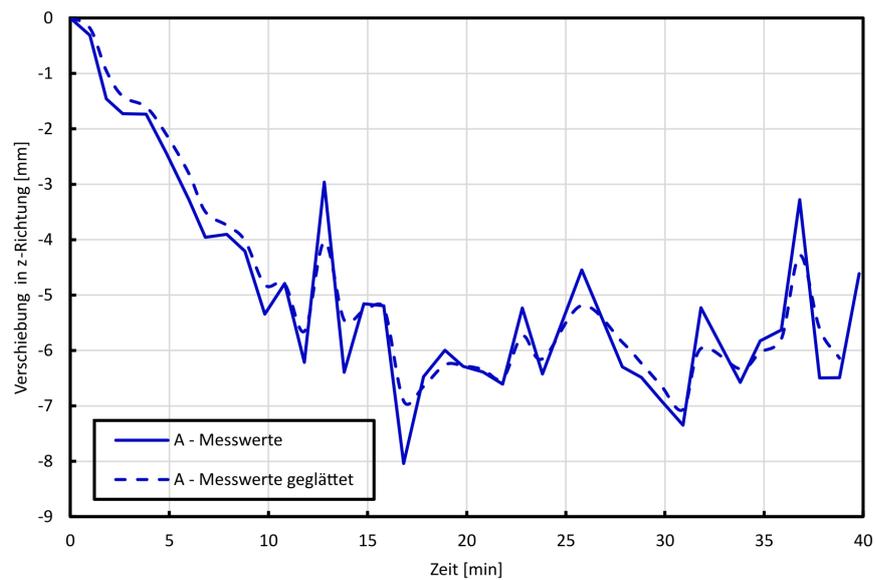


Abbildung 4.2: Originalmesswerte und geglättete Kurve am Beispiel von Messpunkt A bei Ziegelwand mit Tür mittig

**Temperaturmessungen auf Außenseite der Tür** Auf der Außenseite der Türen erfolgt nicht nur eine Verformungsmessung, sondern auch eine Temperaturmessung an insgesamt 31 Messpunkten. Der obere Teil der Tür ist dabei mit einer größeren Zahl von Messstellen versehen, weil dort ein Rauchgasaustritt zu erwarten ist, welcher Auswirkungen auf die Temperaturen in den entsprechenden Punkten haben wird.

## 4.2 Prüfobjekt - Tür mit Zarge

Bei der Tür handelt es sich um eine Brandschutztür vom Typ *Novo Porta Premio T90-1* der Firma *Novoferm Riexinger*. Die lichten Maße des Zargendurchgangs betragen für diese Tür 1291x2458 mm. Das Türblatt besitzt eine Dicke von 64 mm [30]. Mit einer Spezifikation von "EI90" soll die Tür für 90 min eine Sicherheit bezüglich Wärmedämmung und Raumabschluss gewährleisten.

Abbildung 4.3 zeigt das FEM-Modell der Türe, welches auch für die vorliegende Arbeit verwendet wurde. Es stammt aus der Arbeit von Pletzer. [2] Darin liegt die Hauptursache für das asymmetrische Verformungsverhalten der Wände, welches in den folgenden Messergebnissen beobachtet werden konnte. Auf der linken Seite der Türe gibt es insgesamt fünf Verbindungen zwischen Tür und Zarge, während es rechts nur ein Schloss die gesamte Kraft übertragen muss.

Im Teilschnitt A-A wird neben dem Schloss auch noch der initiale Spalt zwischen den Körpern dargestellt. Schnitt B-B zeigt die Verstärkungswinkel innerhalb der Türe, welche oben und unten in der Tür verbaut sind.

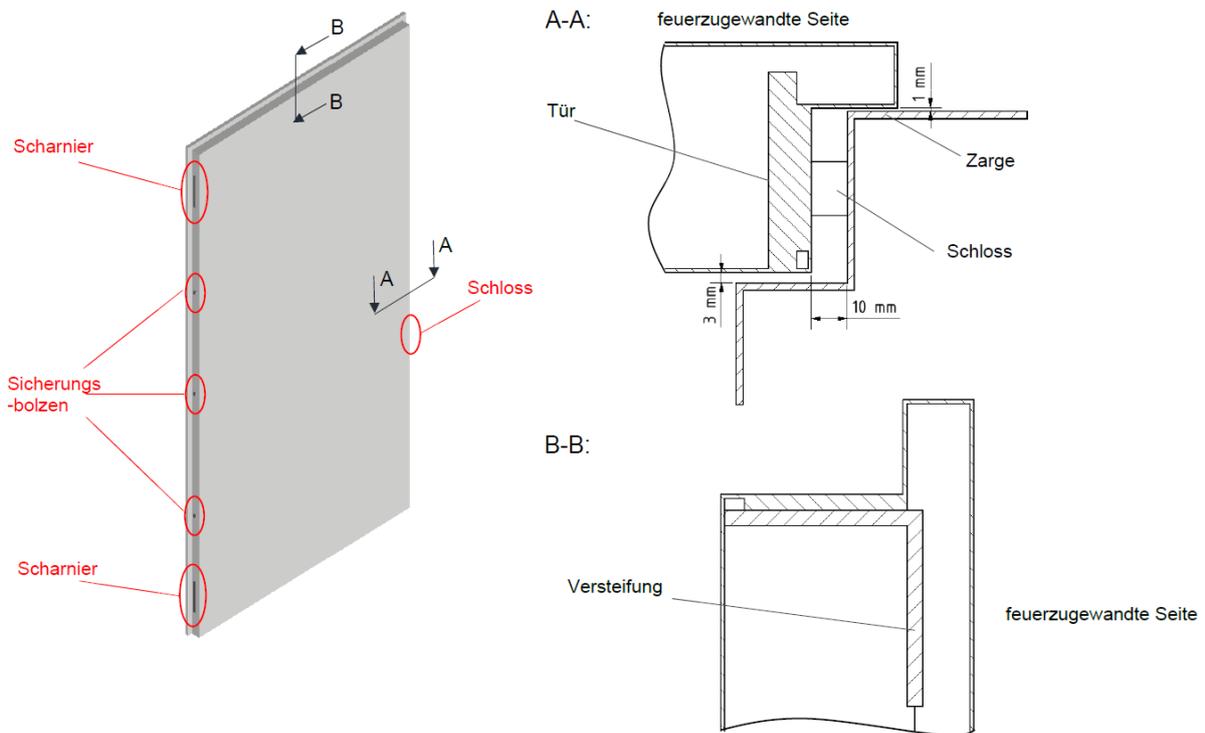


Abbildung 4.3: Aufbau der Tür mit Schnittdarstellungen um Verstärkungen sichtbar zu machen [2]

## 4.3 Aufbau der Ziegelwand im Versuch

Für den Versuch verbleiben die Ziegelwände im Rohbauzustand, es wird also keine Putzschicht aufgetragen. Der in den Tests verwendete Ziegel ist ein Hochlochziegel des Herstellers *Bauhütte Leitl-Werke GmbH*. Die dazugehörige Produktbezeichnung lautet *Ökotherm HLZ 17/50/23,8*. Damit hat der Ziegel eine Dicke von 17 cm, eine Länge von 50 cm und eine Höhe von 23,8 cm. Der Ziegel verfügt über 84 Hohlräume. Die Versuchswand besteht aus ca. 188 Ziegeln, je nach Zuschnitt und Großzügigkeit mit Mörtel kann das aber in geringfügigem Maße variieren.

Die Verbindung der Ziegel wird durch eine ca. 1,5-2 cm dicke Mörtelschicht sichergestellt. Diese ist nach außen hin sichtbar. Es ist zu erwähnen, dass zusätzlich Mörtel aus der Zwischenschicht in die vertikalen Ziegelkavitäten einfließen kann. Wie viel davon in die Hochlöcher eindringt, ist von außen nicht mehr erkennbar. Diese Tatsache stellt in weiterer Folge eine Schwierigkeit bei der Modellbildung dar.

Der Hohlraum zwischen Zarge und Ziegelwand wird bei den Versuchen ebenfalls mit Mörtel ausgefüllt. Eine Kraftübertragung zwischen Wand und Türe beschränkt sich somit nicht allein auf die Verschraubungen.

In der Abbildung 4.4 ist die äußere Stahlschweißkonstruktion gut zu erkennen, die als Rahmen für die Versuchswand dient. Die Wände werden im Vorfeld des Versuches innerhalb dieses Rahmens aufgebaut und können dann mithilfe eines Kranes am Ofen montiert werden. Schätzungsweise beträgt das Gewicht einer Wand (ohne Rahmen) um die 4.000 kg<sup>1</sup>.

Die im Folgenden präsentierten Messergebnisse beziehen sich auf Auswertepunkte in unmittelbarer Umgebung des Türrahmens, welche in Abbildung 4.4 dargestellt sind. Die Punkte L, G und A liegen auf der linken Seite des Türrahmens. F, K und P sind rechts davon angeordnet. Mit dem Punkt C gibt es einen zusätzlichen Messpunkt in der Mitte der Türöffnung im Bereich des Sturzes<sup>2</sup>.

### 4.3.1 Messergebnisse

Auf den folgenden Seiten erfolgt eine vereinfachte Darstellung der Verformungszustände aller versuchsrelevanten Ziegelwandkonfigurationen (links, mittig und rechts eingebaute Türen). Zu allen Grafiken ist anzumerken, dass sie eine Momentaufnahme nach 30 min zeigen. Dieser Zeitpunkt wurde aufgrund seiner Aussagekraft als geeignet angesehen, denn nach 30 min haben die Verformungen eine ausreichende Größenordnung erreicht und die Verhältnisse der Messpunkte zueinander haben sich bereits ausgebildet.

Die Angaben "links" und "rechts" beziehen sich immer auf die Blickrichtung auf die Wand von außen. Außerdem sind alle Grafiken mit zehnfach vergrößerter Verschiebung in z-Richtung dargestellt, um die Deformationen besser sichtbar zu machen. Aus den Relationen der Verformungen in den unterschiedlichen Messpunkten werden Rückschlüsse auf die Tür- und Wandeinflüsse gezogen, was wiederum für die Modellbildung relevant ist.

<sup>1</sup>Eigene Schätzung basierend auf Ziegelgewicht und Anzahl, Mörtelschichtdicke und Tür

<sup>2</sup>Die Benennung der Messpunkte basiert auf den zur Verfügung stehenden Messergebnissen und wird im Sinne einer späteren Nachvollziehbarkeit nicht geändert



Abbildung 4.4: Messpunkte auf den Ziegelwänden am Beispiel der Wand mit links eingebauter Tür

**Ziegelwand mit Tür links** Abbildung 4.5 zeigt den prinzipiellen Verformungszustand einer oben beschriebenen Ziegelwand mit linksseitig eingebauter Tür zum Zeitpunkt von 30 Minuten nach dem Versuchsstart. Alle Messpunkte weisen eine Verformung zum Feuer hin auf, wobei der Maximalwert im Messpunkt K bei  $-41$  mm liegt.

Im Randbereich der Wand (Messpunkte A, G, L) sind die Verschiebungen wesentlich geringer als in der Mitte der Wand (Messpunkte F, K, P). Der Sachverhalt, dass der Punkt K die maximale Verformung aufweist, deutet auf die Relevanz der Kraftwirkung der Türe aufgrund ihres Temperaturfeldes hin. Die ausgeprägten Verschiebungen in der Wandmitte weisen auf eine deutliche Relevanz des asymmetrischen Einbaus hin.

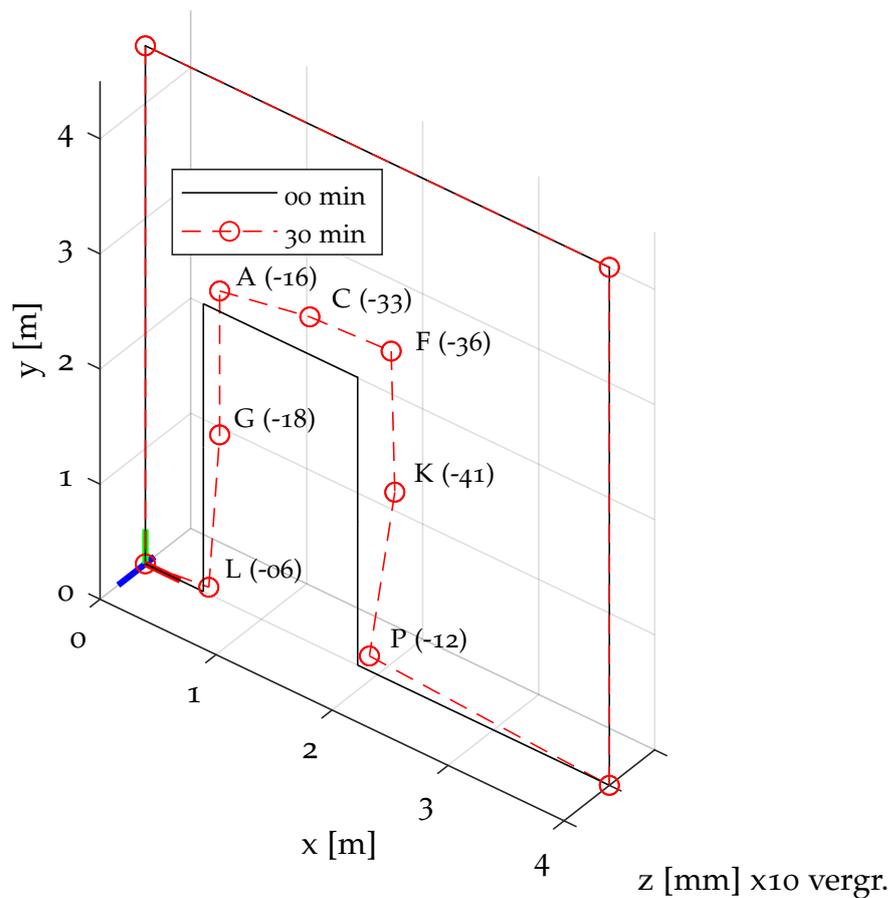


Abbildung 4.5: Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand links eingebauter Tür (30 min)

Am Boden (Messpunkte L, P) sind die Verschiebungen zum Feuer hin wesentlich geringer, wobei sie im Punkt P mit immerhin  $-12$  mm deutlich beobachtbar sind. Dies deutet darauf hin, dass eine Verschiebung - mag sie auch gering sein - der gesamten Wand im Bodenbereich hin zum Feuer erfolgt.

**Ziegelwand mit Tür mittig** Bei mittig eingebauter Tür sind die gemessenen Verformungen wesentlich geringer. Abbildung 4.6 zeigt schematisch das Verformungsbild der Wand mit einem Maximalwert auf halber Türhöhe von -20 mm im Messpunkt G.

Es fällt auf, dass die Verformungen links (Punkte A, G, L) etwas größer als jene auf der rechten Seite (Messpunkte F, K, P) sind. Dies deutet auf eine Asymmetrie im System hin, und zwar in Gestalt der nur linksseitig verbauten Sicherungsbolzen, die eine Spaltbildung zwischen den Scharnieren der Tür verhindern sollen. Somit gibt es auf der linken Seite der Tür an insgesamt fünf Stellen Kontakt mit der Zarge, wohingegen rechts lediglich eine Verbindung in Form des Schlosses vorhanden ist. Am Boden sind die Deformationen äußerst klein, eine relevante Deformation der unteren Ziegelreihe hin zum Feuer scheint nicht stattzufinden. Auffälligerweise sind die Verschiebungen im Bereich des Sturzes (Messpunkte A, C, F) auch sehr gering.

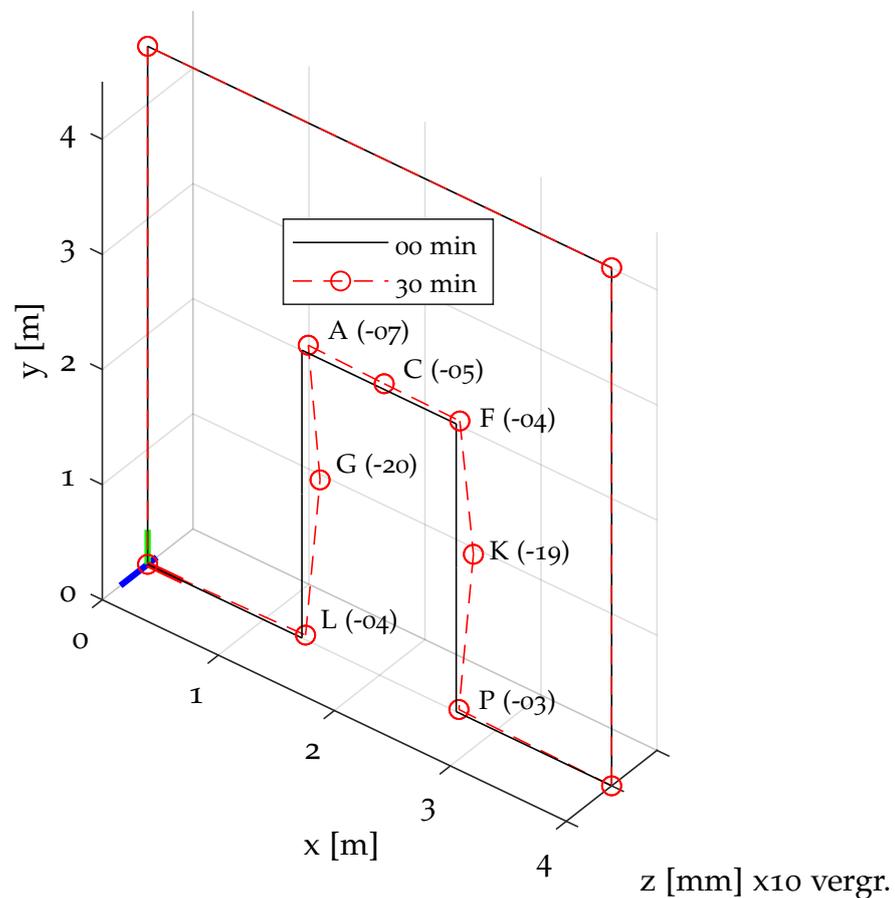


Abbildung 4.6: Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand mit Tür mittig eingebaut (30 min)

Generell erweckt das Verformungsbild mit mittig verbauter Tür den Eindruck, dass die Tür selbst - aufgrund ihrer Kraftwirkung (durch thermische Verformung) - hier dominiert. Insbesondere deshalb, weil die Deformationen auf halber Türhöhe am größten sind. Die wesentlich kleineren Verschiebungen im Vergleich zu den Wänden mit links- und rechtsseitig eingebauten Türen sind sehr auffällig.

**Ziegelwand mit Tür rechts** Die letzte Ziegelwandkonfiguration ist jene mit rechts eingebauter Tür. In der dazugehörigen Abbildung 4.7 erkennt man ein ähnliches Verhalten wie bei der Ziegelwand mit links verbauter Tür. In dieser Konfiguration werden die gemessenen Verformungen am größten. Der Ort mit maximaler Verschiebung<sup>3</sup> ist der Messpunkt G mit einer beachtlichen Deformation von -50 mm zum Feuer hin.

Generell sind die Verformungen in den Messpunkten A, G und L größer als in den äquivalenten Punkten bei der Ziegelwand mit Tür links verbauter Tür<sup>4</sup>, wieder erklärbar durch die nur auf der linken Rahmenseite vorhandenen Scharniere und Sicherungsbolzen, wogegen rechts des Rahmens ausschließlich ein Schloss die Zarge mit der Tür verbindet.

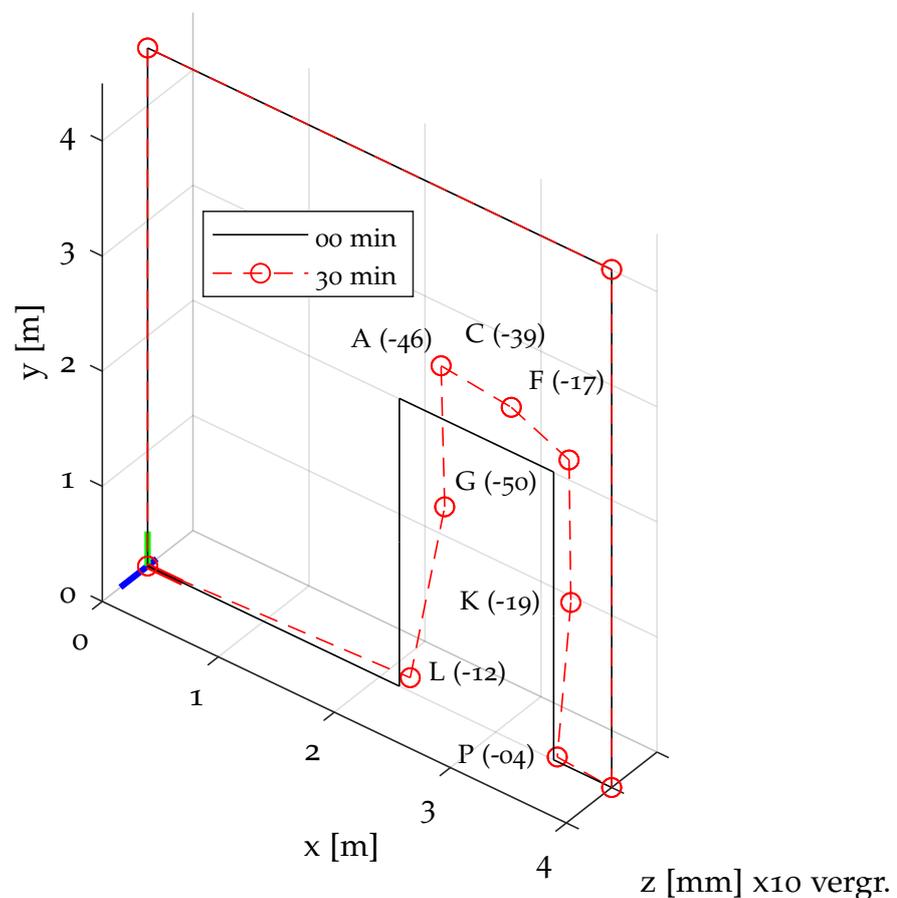


Abbildung 4.7: Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand mit Tür rechts eingebaut (30 min)

Der Messpunkt L verschiebt sich deutlich mehr in Richtung des Ofens als der Punkt P, somit scheint eine Verschiebung der links größeren Wandfläche nach innen zu geschehen. Im Verhältnis zu den Maximalwerten sind die Deformationen am Boden jedoch gering.

<sup>3</sup>Von den Orten, in denen ein Messwert existiert

<sup>4</sup>Messpunkte F, K und P

### 4.3.2 Schlussfolgerungen für die Modellbildung

Zusammenfassend können folgende Schlüsse aus den Versuchen und den dabei erhaltenen Messergebnissen mit den Ziegelwänden gezogen werden:

- Die Größenordnungen der Verformungen mögen im Vergleich zur Wandgröße klein sein (Nur ca. 1% der Wandhöhe macht die Verschiebung zum Feuer hin im Extremfall - Tür rechts - aus) - für die Verformungsmessung an der Brandschutztüre sind die Größenordnungen aber sehr wohl von Relevanz. Die maximale Verformung der Türe ergab sich bei den Messungen im Bereich von -40 mm bei rechts verbauter Türe.
- Die Größe der Verschiebungen ist bei links und rechts verbauter Türe wesentlich höher. Dies könnte auf eine Verspannungssituation hinweisen oder auf steifere Randbedingungen, da ja die Temperatur für alle Versuche in etwa gleich ist.
- Eine Symmetrieausnutzung ist aufgrund des Türverhaltens nicht möglich. Die Tendenzen, welche aufgrund der nicht symmetrischen Tür verursacht werden, spiegeln sich in den Messungen wider.

## 4.4 Aufbau der Leichtbauwände im Versuch

Eine exemplarische Darstellung einer Leichtbauwandkonstruktion inkl. der Markierungen der Verschiebungsmesspunkte sei mit Abbildung 4.8 gegeben. Dabei handelt es sich um die Leichtbauwand mit rechts verbauter Tür.

Der Aufbau der grundsätzlich nichttragenden Leichtbauwände für die vorliegenden Untersuchungen entspricht der *ÖNORM B 3415 - Planung und Ausführung von Trockenbauarbeiten*<sup>5</sup>. Auf diese beziehen sich auch die folgenden Ausführungen.

Der Aufbau der Wände gestaltet sich nun folgendermaßen: Am Boden und an der Decke werden dünnwandige UW-Profile über die gesamte Breite verschraubt. An den seitlichen Rändern der Wand werden CW-Profile in die UW-Profile gestellt. Im Abstand von 625 mm werden weitere vertikale CW-Profile eingesetzt. Dieses Muster wird auch von einer eingebauten Tür nicht unterbrochen. Im Bereich der Türöffnung werden UA-Profile mit einer Blechstärke von 2 mm eingesetzt und oben und unten mit Befestigungswinkeln der gleichen Dicke verschraubt. Steht dieses aus Profilen bestehende Ständerwerk, wird es auf einer Seite mit Rigipsplatten von 12,5 mm Wandstärke verkleidet.

In die Hohlräume wird aus Dämmungs- und Schallschutzgründen Mineralwolle - hier vom Typ *Thermarock50* - eingelegt. Danach wird die zweite Seite ebenfalls mit Gipsplatten verkleidet. Einen Blick in den inneren Aufbau der Leichtbauwand ermöglicht Abbildung 2.6.

### 4.4.1 Messergebnisse

Auf den folgenden Seiten werden Verformungsmessdaten für die Leichtbauwände präsentiert und diskutiert. Davon lassen sich Randbedingungen und Zusammenhänge für die Modellbildung ableiten. Es stehen pro Wandkonfiguration wie schon bei der Ziegelwand nur sieben Messpunkte im Bereich des Türrahmens zur Verfügung. Deshalb sind die gezogenen Rückschlüsse auf das Verformungsbild der Wände mit Unsicherheit behaftet.

Darüber hinaus zeigen die folgenden Abbildungen alle ausschließlich den Verformungszustand zum Zeitpunkt von 30 min nach Versuchsstart. Dieser Zustand ist jedoch als einigermaßen repräsentativ anzusehen, da die Verformungen bis dahin bereits deutlich ausgeprägt sind und sich die Unterschiede zwischen linker und rechter Türseite, oben und unten etc. bis dahin schon herausgebildet haben.

---

<sup>5</sup>Die Wandhöhe in den vorliegenden Versuchen ist mit 4,5 m deutlich über der im Trockenbau üblichen Raumwandhöhen von ca. 2,5 m. Besonders in Altbauten oder Gewerbeanlagen können Wandhöhen von bis zu 4,5 m jedoch vorkommen.



Abbildung 4.8: Messpunkte auf den Leichtbauwänden am Beispiel der Wand mit rechts eingebaute Tür; Die Benennung der Messpunkte kann für die anderen Konfigurationen abweichen.

**Leichtbauwand mit Tür links** Die Messergebnisse für die Leichtbauwand mit linksseitig eingebauter Tür sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Es sind Verformungen in der Größenordnung von ca. 20 mm erkennbar.

Wie schon bei der Ziegelwand mit links verbauter Tür ist die gemessene Verschiebung am Randbereich der Wand (Messpunkte A, J, Q) geringer als in der Mitte (I, P, W). Allerdings ist der Randeinfluss im Vergleich zur Ziegelwand deutlich kleiner. Die minimalen Verformungen am Boden (Messpunkte Q, W) deuten darauf hin, dass die Profile sich unten nicht nennenswert zum Feuer hinbewegen.

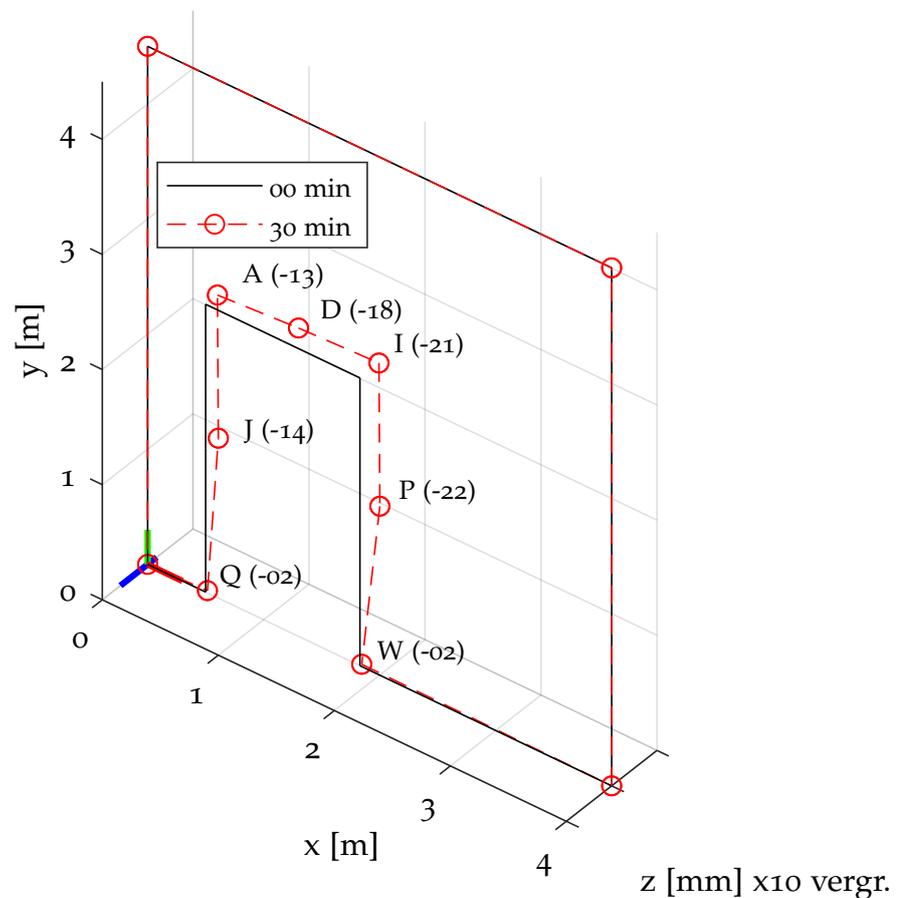


Abbildung 4.9: Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür links eingebaut (30 min)

Auffällig sind die - wenn auch geringeren - Überhöhungen der Verformung auf halber Türhöhe gegenüber jenen im Sturzbereich. Diese Überhöhung gibt es auch bei der Ziegelwand und deutet auf den Einfluss der Tür hin. Bei linksseitig verbauter Tür ist dies bedingt durch die Verbindung der Tür über das Schloss mit der Zarge und damit der Wand.

**Leichtbauwand mit Tür mittig** Abbildung 4.10 zeigt die Messwerte für die Leichtbauwand mit Tür in der Mitte an den relevanten Messpunkten rund um den Türrahmen. Dabei handelt es sich wie immer um eine Darstellung der Verformung 30 Minuten nach dem Beginn der Feuerwiderstandsprüfung.

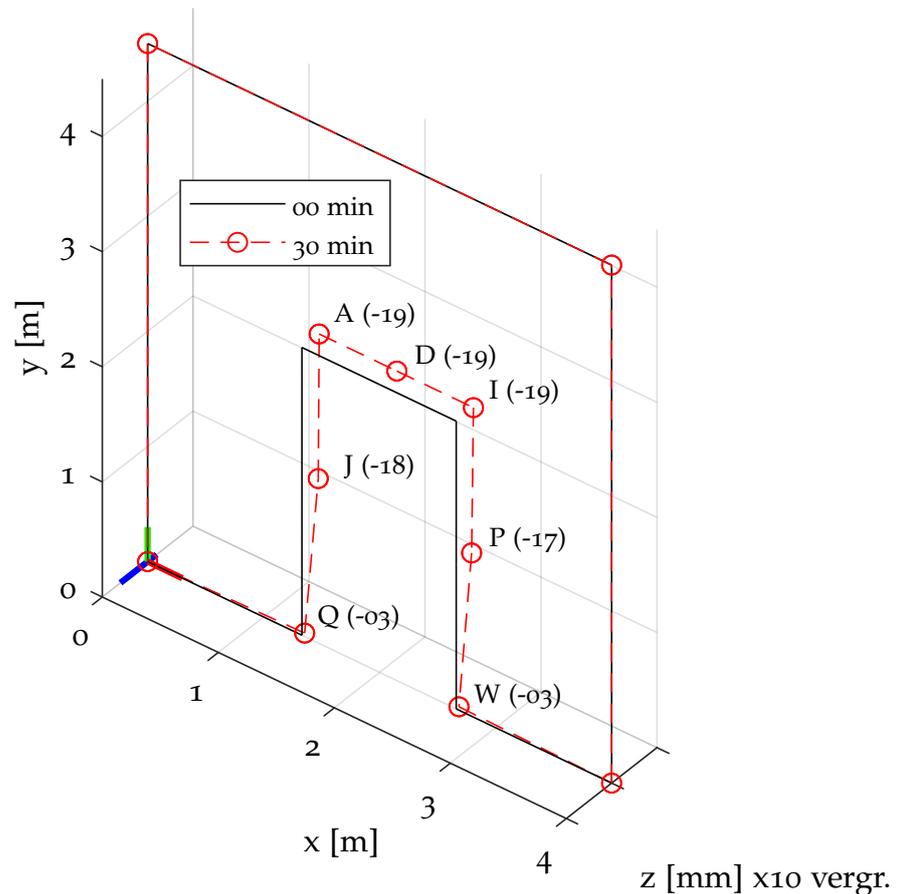


Abbildung 4.10: Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür mittig eingebaut (30 min)

Bei mittig in der Leichtbauwand eingebauter Tür ergeben sich dabei gemessene Verformungen im Bereich von maximal 20 mm. Dabei sind auffälligerweise auf halber Türhöhe (Messpunkte J, P) in etwa dieselben Größenordnungen zu erkennen wie oben (Messpunkte A,D,I). Der Ort mit maximaler Verschiebung ist sogar eher im Bereich der Türoberkante zu finden. Dies deutet darauf hin, dass sich die Verformung aufgrund der Tür als mechanischer Last in der Wand, und jene die durch das Temperaturfeld in der Wand selbst bedingt ist, sich in etwa die Waage halten. Die sehr geringen Messwerte am Boden (Messpunkte Q, W) weisen darauf hin, dass eine nennenswerte Verschiebung der Bodenprofile zum Feuer nicht stattfindet.

Wie schon bei der Ziegelwand mit mittiger Tür, wirkt sich die linksseitige Verstärkung durch die Sicherungsbolzen insofern auf die Messergebnisse aus, dass die Verschiebungswerte in den Punkten A und G über jenen von I und P liegen. Interessant ist auch, dass sich die Messpunkte A, D und I alle um ca. 19 mm zum Feuer hinverschieben. Die Durchbiegung der Querprofile (horizontale UA- und UW-Profile) hat also scheinbar keine große Auswirkung auf das Messergebnis.

**Leichtbauwand mit Tür rechts** Die letzte Leichtbauwandkonfiguration ist jene mit rechtsseitig eingebauter Türe. In Abbildung 4.11 erkennt man wiederum Verformungen im Bereich von ca. 20 mm hin zum Feuer. Wieder sind die Verschiebungen im Randbereich der Wand (Messpunkte H, O, V) deutlich kleiner als in der Mitte der Wand (Messpunkte A, I, P). Wie schon bei allen anderen Leichtbauwänden sind die Verformungen am Boden gering.

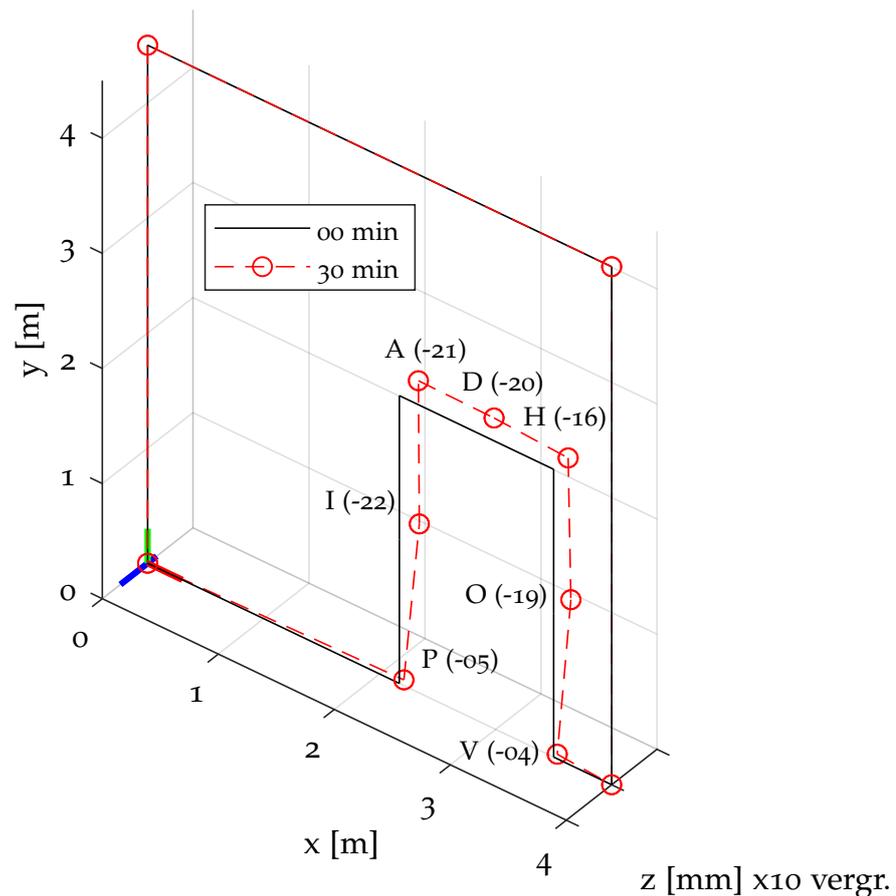


Abbildung 4.11: Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür rechts eingebaut (30 min)

Interessanterweise sind die Messergebnisse in A, I und P nicht größer als jene der Punkte I, P und W bei linksseitig eingebauter Tür (siehe Abbildung 4.9). Die bei jeder Wandkonfiguration links der Türe verbauten Scharniere und Sicherungsbolzen würden dies nämlich (ähnlich wie bei der Ziegelwand) erwarten lassen. Dadurch lässt sich vermuten, dass die Anordnung der vertikalen CW-Profile, die ja immer im Abstand von 625 mm verbaut werden, eine signifikante Rolle spielen.

Nach Betrachtung aller Leichtbauwandkonfigurationen stellt man fest, dass sich die Größenordnungen der Verformungen stets im selben Bereich um die 20 mm bewegen. Bei den Ziegelwänden hingegen gab es starke Unterschiede zwischen links bzw. rechts und mittig eingebauter Tür. Dies legt einen großen Einfluss der im Türbereich stärkeren UA-Profile mit 2mm Blechstärke nahe, deren mechanische Wirkung also deutlich über jener der sehr dünnen CW-Profile zu liegen scheint.

### 4.4.2 Schlussfolgerungen für die Modellbildung

Wie schon bei der Ziegelwand folgen kurz zusammengefasst einige Erkenntnisse aus der Betrachtung der Versuchsergebnisse:

- Die Größenordnung der Verformungen ist im Gegensatz zur Ziegelwand für alle Wandkonfigurationen ca. gleich und liegt im Bereich um die -20 mm.
- Auf halber Türhöhe sind die Verformungen ca. gleich groß wie an der Türoberkante.
- Da die Asymmetrie in der Leichtbauwand zusätzlich durch die Aufteilung der Profile entsteht, ist eine Symmetrienausnutzung nicht möglich.

Bei den zuvor geschilderten Interpretationen der Messergebnisse handelt es sich um rein qualitative Feststellungen für das Wandverformungsbild zum Zeitpunkt von 30 min nach dem Versuchsstart. Das zeitabhängige Verhalten wurde an dieser Stelle völlig außer Acht gelassen. Einige Bemerkungen dazu folgen im Unterabschnitt 5.4.2, da für deren Erklärung erst auf den Wärmetransport eingegangen werden muss.

# 5 Modellbildung

Das Ziel der Modellbildung ist es, möglichst einfache, aber dennoch aussagekräftige Modelle für das Verformungsverhalten der Versuchswände zu entwickeln. Obwohl die Berechnung der temperaturabhängigen Verformung von Wänden zunächst nicht wie eine allzu komplexe Aufgabe erscheint, so geben sich bei näherer Überlegung einige Schwierigkeiten zu erkennen. Einige für die Ziegelwand relevante Punkte sind:

- Mehrere und sehr unterschiedliche Materialien sind beteiligt.
- Die Stoffdaten der Materialien unterliegen großen Unsicherheiten.
- Die vielen Hohlräume in den Ziegeln erzwingen ein feines Rechenetz.
- Die Definition der Randbedingungen ist schwierig.
- Die Vielzahl von Kontakten zwischen den Ziegeln führen zu hohen Anforderungen an den Arbeitsspeicher.
- Der Import von Temperaturdaten für jeden Ziegel führt zu hohen Anforderungen an den Arbeitsspeicher.
- Grobe Montagetoleranzen im Ziegelbau (Schichtdicke von Mörtel variiert, Spalten zwischen Ziegeln könnten vorhanden sein).

Auch die Modellierung einer Leichtbauwand bringt Schwierigkeiten mit sich, wovon einige hier vorab genannt werden sollten:

- Dünne Stahlprofile mit vor allem zu Beginn großen Temperaturgradienten.
- Der Wärmetransport wird stark durch die Gipsreaktionen beeinflusst.
- Großflächige Gipsplatten müssen mit dünnen Stahlprofilen verbunden werden.
- Randbedingungen haben große Auswirkungen auf die Ergebnisse, sind aber wie bei der Ziegelwand schwierig zu identifizieren.
- Eine fixe Einspannung der Stahlprofile an den Enden führt numerisch zu Stabilitätsproblemen (Knicken).

Diese Schwierigkeiten und Probleme haben zu den in diesem Kapitel vorgestellten Abstraktionen und Vereinfachungen geführt.

## 5.1 Wärmeübertragung auf die Wände

Für die Wärmeübertragung von den Verbrennungsgasen im Ofen auf die in dieser Arbeit zu untersuchenden Wände ist selbstverständlich der Verbrennungsvorgang im Ofen von großer Bedeutung. In diesem Unterabschnitt soll auf die Möglichkeiten der Koppelung zwischen Verbrennungs-, Strömungs- und Verformungsberechnung eingegangen werden.

### 5.1.1 Schon bestehendes CFD-Modell des Versuchsofens

In Vorarbeiten wurden bereits detaillierte CFD-Simulationsmodelle für die Verbrennung und Strömung im betrachteten Versuchsofen erstellt. Diese Modelle wurden optimiert und in weiterführenden Arbeiten erfolgreich angewendet [2][29][31]. Die Genauigkeit<sup>1</sup> hinsichtlich Temperaturen und Wärmetransport, die durch diese Modelle erreicht wurde, ist bereits sehr gut. Beispielsweise erzielt Pletzer im zeitlichen Mittel nur noch einen Fehler von 1,2% gegenüber den gemessenen Temperaturen in der Gasphase. [2].

Die Erstellung eines mit der Wandsimulation gekoppelten Modells kann zu einem späteren Zeitpunkt (im Zuge von Folgearbeiten) stattfinden. Auf eine erneute CFD-Modellierung des Prüfofens und der Verbrennung wird für diese Arbeit verzichtet und stattdessen der folgend beschriebene Weg gewählt.

### 5.1.2 Vereinfachungen für die Temperaturfeldberechnung

Mit Kenntnis der in der Einleitung zu Kapitel 5 erwähnten Unsicherheiten und Schwierigkeiten in der Verformungsmodellbildung scheint der erzielbare Genauigkeitsgewinn durch eine gekoppelte CFD-FEM Berechnung sehr gering. Auch Nguyen ging für seine Simulationen den Weg, die Gasphasenverbrennung mit Randbedingungen (Konvektion und Strahlung) für die Wärmeleitung durch die Wand zu abstrahieren [15].

Vorarbeiten haben des Weiteren mit einer detaillierten Beschreibung der Temperaturmessergebnisse im Versuchsofen gezeigt, dass eine Homogenität des Temperaturfeldes im Ofen eine zulässige Annahme ist. Insbesondere hat Klemm in seiner Arbeit eine gutes Übereinstimmen der Temperaturmessungen mit der geforderten ETK<sup>2</sup> beschrieben. So liegen die Temperaturverläufe in allen Messpunkten innerhalb der einzuhaltenden Grenzkurven. Der zeitliche Verlauf der mittleren Temperatur aus 12 im Ofen verteilten Thermoelementen wird durch die Simulationen sogar noch besser wiedergegeben [31].

Darüber hinaus beschreibt Mayrhofer in seiner Arbeit Möglichkeiten, die Homogenität des Temperaturfeldes im Ofen und damit ein generelles Übereinstimmen mit der ETK noch weiter zu verbessern. Die möglichen Parameter dazu waren die Ofentiefe, Brennerumlenkwinkel und Brennstoffmassenströme. [29].

---

<sup>1</sup>Das Übereinstimmen mit Messergebnissen

<sup>2</sup>Bei Versuchen mit der Ziegelwand

Deshalb scheint es gerechtfertigt, den Wärmeübergang von den Verbrennungsgasen im Ofen auf die im Detail zu simulierende Wand in Form von Strahlungs- und Konvektionsrandbedingungen zu abstrahieren. Das dazugehörige Vorgehen wird mit Abbildung 5.1 dargestellt. Im entsprechenden Bild links ist die dem Feuer ausgesetzte Seite zu sehen. Die dazugehörigen Eingabeparameter (Richtwerte) für die numerische Simulation wurden von Nguyen [16] übernommen und entsprechen einem Wärmeübergangskoeffizient von  $25 \text{ W/mK}$  und einem Oberflächenemissionsvermögen<sup>3</sup> von 0,9 auf der dem Feuer zugewandten Seite. Innerhalb der Ziegel sind die Wärmeleitung in den Materialbrücken und die Hohlraumstrahlung in den Hochlöchern für den Wärmetransport maßgeblich. Auf der dem Feuer abgewandten Seite finden sich dieselben Randbedingungen wie innen. Der Wärmeübergangskoeffizient liegt außen bei  $4 \text{ W/mK}$ , das Emissionsvermögen bleibt unverändert.

Die verwendete Software zur Berechnung des Wärmetransportes ist *Ansys Workbench* mit dem Subsystem *Transient Thermal*. Für einfache Berücksichtigung der temperaturabhängigen Stoffwerte von Gips kommt bei der Leichtbauwand *Ansys Fluent* zum Einsatz.

Zusammenfassend wird der Wärmetransport in den Wänden wie folgt berechnet:

- Konvektion und Strahlung auf der dem Feuer ausgesetzten Seite (Randbedingungen)
- Wärmeleitung und Hohlraumstrahlung<sup>4</sup> in der Wand
- Konvektion und Strahlung auf der dem Feuer abgewandten Seite (Randbedingungen)

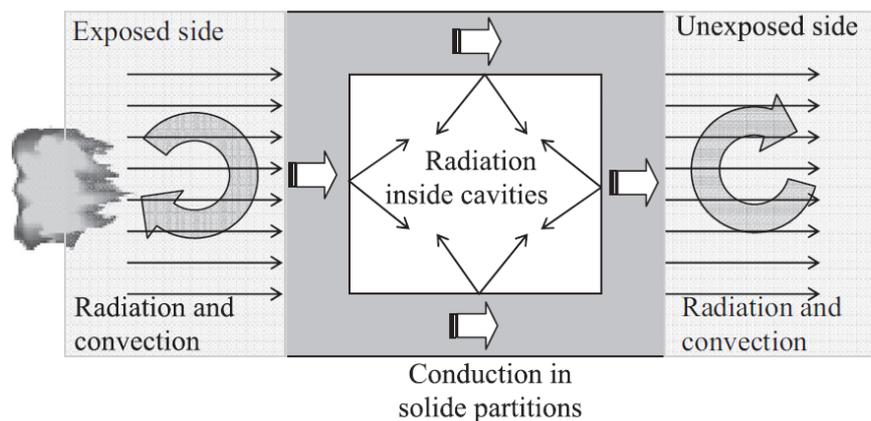


Abbildung 5.1: Schema für die numerische Berechnung des Wärmetransports in einem Ziegel mit Konvektions- und Strahlungsrandbedingungen [16]

<sup>3</sup>Die dem Feuer ausgesetzten Flächen werden im Laufe des Versuches verrußen, insofern wird sich der Wert des Emissionsgrades  $\epsilon$  mit der Zeit ändern

<sup>4</sup>Strahlung in den Hohlräumen wird nur bei der Ziegelwand berücksichtigt.

## 5.2 Temperaturen im Prüfobjekt

Das zugrunde liegende FEM-Modell der Brandschutztür stammt von Pletzer [2]. Die Temperaturen im Prüfobjekt wurden jedoch erneut mit *Ansys Mechanical* berechnet, um den Modellierungsaufwand für die vielen Wandkonfigurationen zu reduzieren<sup>5</sup>.

Auf der direkt dem Feuer ausgesetzten Seite bleibt die Temperatur demnach sehr nahe an der ETK, weil auch hier Strahlungs- und Konvektionsrandbedingungen zur Anwendung kommen. Eine Darstellung der Temperaturen im Prüfobjekt nach 30 min Simulationszeit erfolgt mit Abbildung 5.2. Außen erreicht die Temperatur in der Simulation auf einem großen Bereich des Türblattes ca. 40 °C nach 30 min Simulationszeit. Dies liegt deutlich unter den gemessenen Werten (ca. 100 °C in der Mitte des Türblattes). Die Temperaturen auf der abgewandten Seite der Tür steigen durch Gipsreaktionen (Calcination) bedingt schneller an.

Dieser Effekt wurde innerhalb dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die maximalen Temperaturwerte (Feuerseite) und die Werte an den Rändern (maßgeblich für thermische Verformung der Tür) wurden aber aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Stahl gut nachgebildet. Zur exakten rechnerischen Bestimmung der Temperaturen im Prüfobjekt wären noch genauere Untersuchungen nötig. Die allgemeinen Auswirkungen der Prüfobjektverformung lassen sich durch die Beschriebene Vorgehensweise dennoch berücksichtigen.

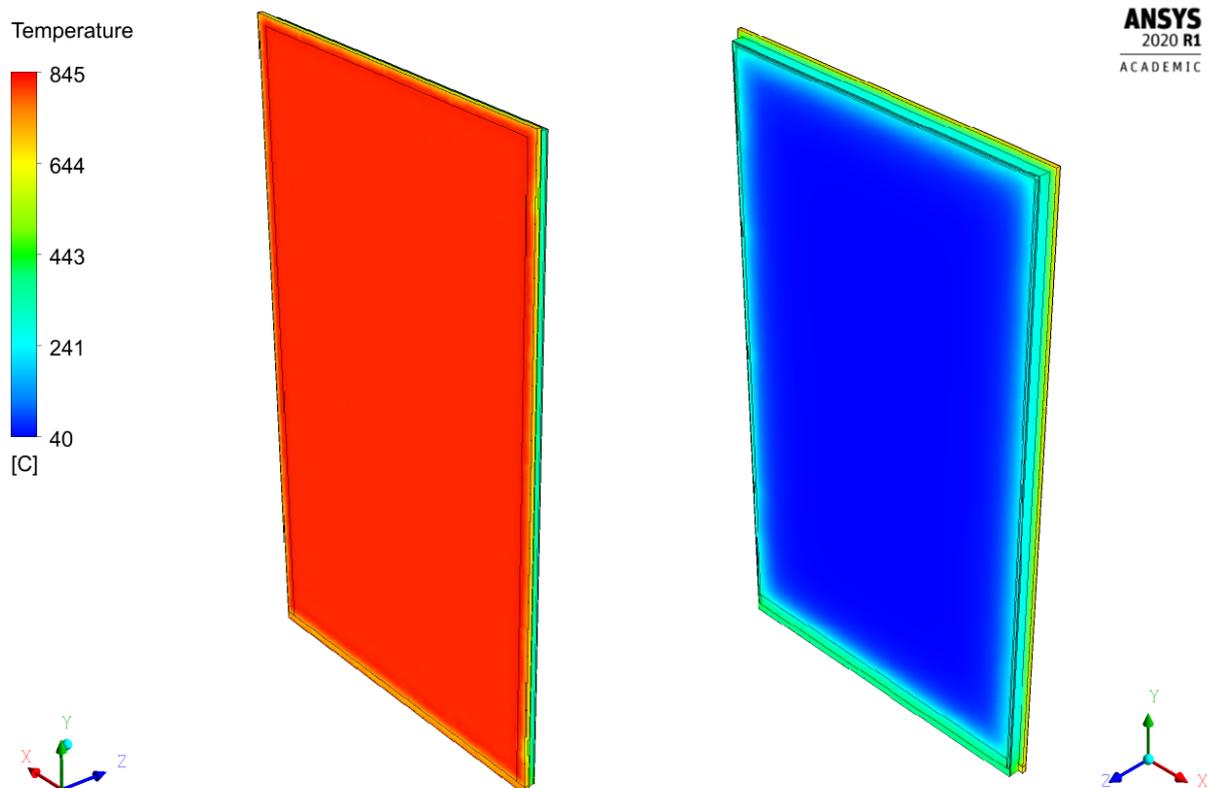


Abbildung 5.2: Temperaturen im Prüfobjekt nach 30 min Simulationszeit an der dem Feuer zugewandten Seite (links) und auf der abgewandten Seite (rechts)

<sup>5</sup>Aufwendiger Import der tabellarischen Temperaturfelddaten von Pletzer [2]

## 5.3 FEM-Modell der Ziegelwand

Auf den folgenden Seiten wird die schrittweise Modellierung der Ziegelwand erläutert. Sie orientiert sich stark an bereits durchgeführten Studien [15][16][32]. Sie musste aber, um auf unsere Versuchswände anwendbar zu sein, deutlich verändert werden, besonders im Hinblick auf die mechanischen Randbedingungen und die Berücksichtigung der Prüfkörper (Türen). Eine weitere Schwierigkeit ist die Vergleichbarkeit der angegebenen Stoffwerte und ihre Anwendbarkeit für die Zwecke dieser Arbeit.

Die verwendete FEM-Software ist *Ansys Mechanical*. Mit der *Ansys Workbench*-Umgebung lässt sich das Wärmetransportergebnis einfach in das FEM-Modell für die Verformungsberechnung importieren.

### 5.3.1 Wärmetransport

Zunächst soll auf die Modellierung des Wärmetransportes eingegangen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Ziegel den mit Abstand größten Massen- und auch Flächenanteil an der Wandkonstruktion haben, fokussiert sich die folgende Betrachtung auf die Ziegel.

Besonderes Augenmerk sei auf die Berücksichtigung Strahlungseffekten beim Wärmetransport durch die Ziegel gelegt. Das stationäre Temperaturfeld in einem Referenzziegel bei Beachtung der Strahlung in den Kavitäten, ergibt Abbildung 5.5 links. Ohne Strahlungswärmetransport hingegen ergibt sich ein stationäres Bild wie in Abbildung 5.5 rechts. Noch deutlicher wird der Unterschied bei Darstellung der Temperaturverteilung auf der dem Feuer abgewandten Außenfläche. Mit Strahlung sind die heißesten Bereiche dort aufzufinden, wo Hohlräume direkt dahinter liegen (vgl. Abbildung 5.6). Ohne Strahlungsberücksichtigung liegen dort tatsächlich die kältesten Bereiche, wie Abbildung 5.6 zeigt. Diese großen Unterschiede machen eine Berücksichtigung der Hohlraumstrahlung unverzichtbar.

In nur einem Ziegel gilt es 84 Hohlräume zu modellieren, die gesamte Wand enthält somit ca. 9.500 Kavitäten, in denen Strahlungseffekte zu berücksichtigen wären. Die transiente Temperaturfeldberechnung von nur einem Ziegel dauerte auf einem Simulationsrechner mit 12-Kernprozessor und 64 GB RAM ca. eine Stunde. Eine zunächst angedachte 2-wegige CFD-FEM-Koppelung für die Simulation des Wandverhaltens wird dadurch unrealistisch.

### 5.3.2 Netzgitter für die drei Einbausituationen der Türe

**Wärmetransport** Der Wärmetransport durch die Ziegelwand wird nur einmal berechnet und daraus eine für alle Konfigurationen (links, mittig rechts verbaute Türe) gültige Temperaturfeldgleichung in Abhängigkeit von der Position im Ziegel und der Zeit entwickelt. Das Rechenetz hat die mit Tabelle 5.1 gezeigten Spezifikationen und wird mit Abbildung 5.3 dargestellt.

| Modell                    | Elementanzahl | mittleres Seitenverhältnis (AR) |
|---------------------------|---------------|---------------------------------|
| Wärmetransport Ziegelwand | 19.120        | 2,36                            |

Tabelle 5.1: Rechenetz für die Wärmeleitung durch die Ziegelwand

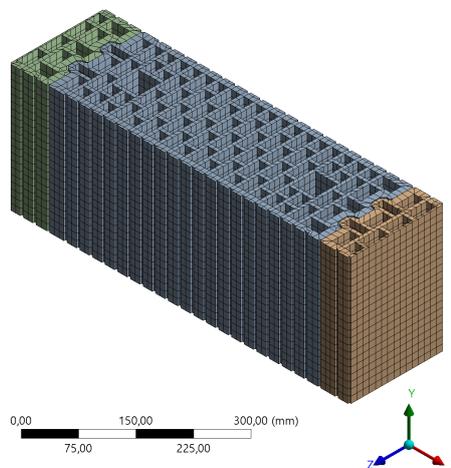


Abbildung 5.3: Rechenetz für die Wärmeleitung durch die Ziegelwand

**Verformung** Die Rechnetze sind für alle drei Ziegelwandkonfigurationen sehr ähnlich. Ihnen zugrunde liegende Geometriemodelle gehen prinzipiell nur durch Verschieben der Türe (siehe Abbildung 1.3 auseinander hervor. Dennoch können sich dabei kleine Unterschiede in den Elementanzahlen, wie in Tabelle 5.2 ersichtlich, ergeben.

| Modell     | Elementanzahl | mittleres Seitenverhältnis (AR) |
|------------|---------------|---------------------------------|
| Tür links  | 178.000       | 17,4                            |
| Tür mittig | 178.651       | 15,9                            |
| Tür rechts | 178.472       | 15,9                            |

Tabelle 5.2: Rechnetze der Ziegelwandmodelle für die Verformung

Als Qualitätskennzahl wurde das mittlere Seitenverhältnis ausgewertet. Dabei ergeben sich sehr hohe Maximalwerte, für die hauptsächlich die Vernetzung Türgeometrie (geringe Dicke im Verhältnis zur Länge) verantwortlich ist. Weil das Türmodell bereits von Pletzer erfolgreich verwendet wurde [2], wird das Netz als ausreichend angesehen. Der Maximalwert betrifft zudem nur sehr wenige Zellen innerhalb der Tür. Eine Darstellung sei repräsentativ für alle Ziegelwandmodelle mit Abbildung 5.4 gegeben.

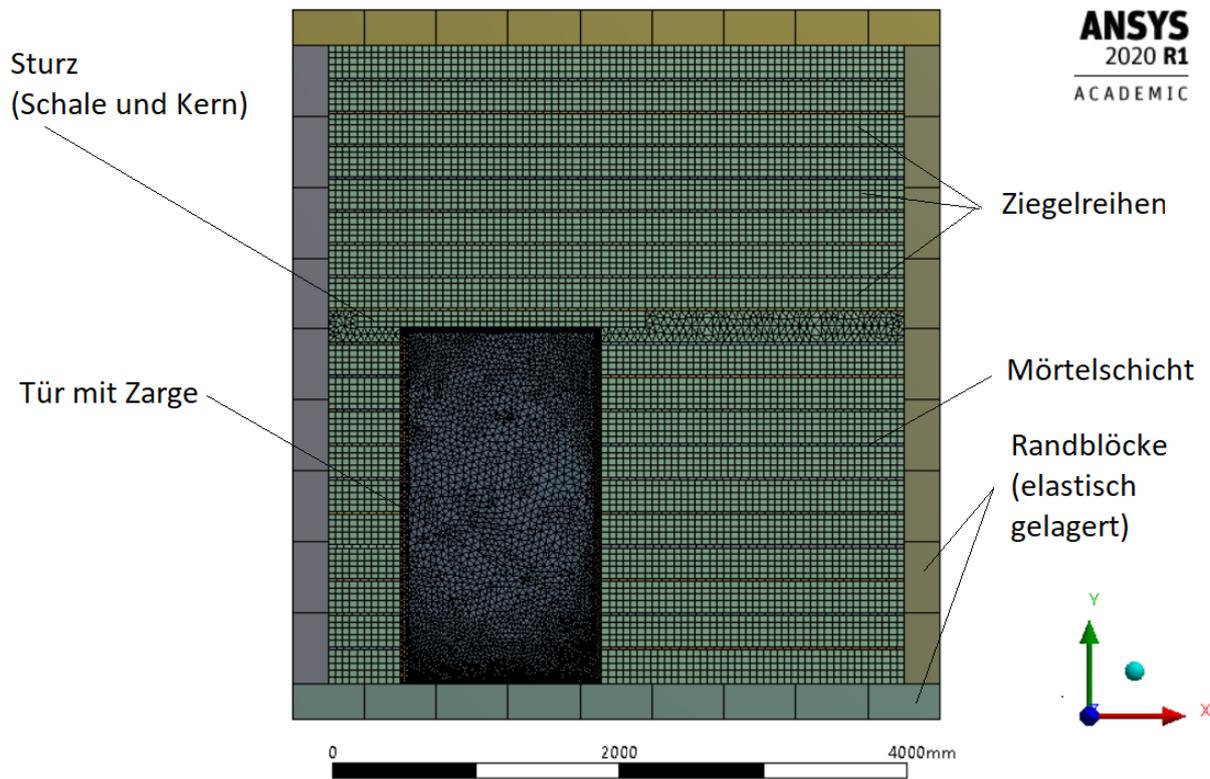


Abbildung 5.4: Modell inkl. Rechennetz für die Ziegelwand mit Tür links

### 5.3.3 Überprüfung der Wärmetransportrechnung mittels Referenzmodell

Bei den vorliegenden Feuerwiderstandsprüfungen haben keine Temperaturmessungen in den Ziegeln stattgefunden. Somit ist es erforderlich, sich bezüglich der Wärmeleitung in der Wand an einem Referenzmodell zu orientieren. T.D. Nguyen hat (im Rahmen einer Dissertation) Versuche und Simulationen zum Thema Wandverformung in Brandsituationen - sowohl mit tragenden als auch nichttragenden Wänden - durchgeführt [15]. Teil der Untersuchungen von Nguyen war die Erstellung eines kalibrierten Simulationsmodells für die Wärmeleitung und Wärmestrahlung im Ziegel. Dieses von ihm publizierte Modell dient als Referenz, um das in dieser Arbeit erstellte Wärmetransportmodell zu validieren.

Das mit dieser Arbeit entstandene Wärmetransportmodell soll anhand der Daten der Referenzstudie überprüft werden. Abbildung 5.7 zeigt die Temperaturverläufe im Referenzziegel zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Es ist ersichtlich, dass es deutliche Abweichungen des Temperaturverlaufs im Vergleich zum kalibrierten Referenzmodell gibt. Jedoch ist die Übereinstimmung vor allem im betrachteten Temperaturbereich bis 40 min ausreichend.

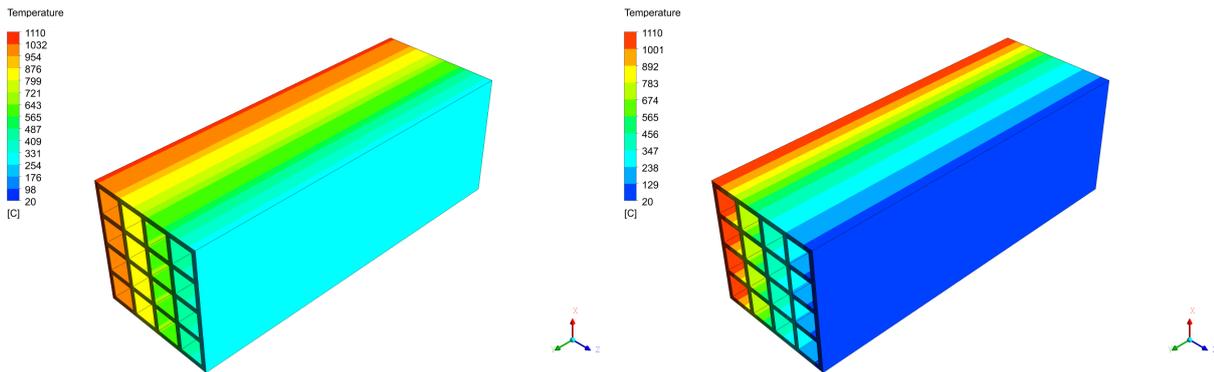


Abbildung 5.5: Stationäre Temperaturverteilung im Referenzziegel mit (links) und ohne (rechts) Hohlraumstrahlung

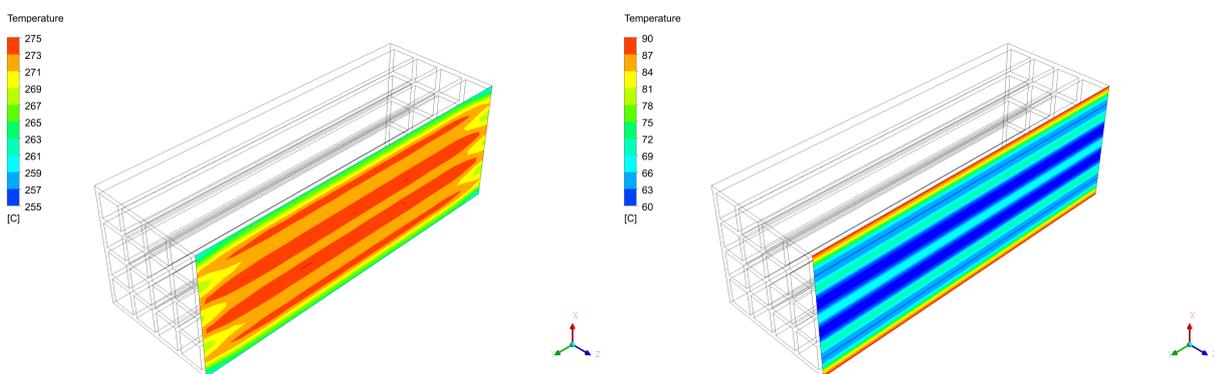


Abbildung 5.6: Stationäre Temperaturverteilung auf der abgewandten Seite mit (links) und ohne (rechts) Hohlraumstrahlung

### 5.3.4 Temperaturfeld als Polynom mittels MATLAB Curvefit

Ein direktes Importieren der zeitabhängigen Temperaturfelder in die FEM-Modelle wäre prinzipiell möglich, ist aber sehr arbeitsspeicherintensiv. Nachdem sich die Temperaturen in den Ziegeln hauptsächlich in  $z$ -Richtung und mit der Zeit ändern, bietet es sich an, die Temperaturen in der Wand als "thermische Bedingung" zu modellieren. Die thermische Bedingung in *Ansys Mechanical* akzeptiert die Zeit und die Position als unabhängige Variablen einer vorzugebenden Polynomfunktion. Es soll eine Funktion in  $z$ -Richtung (Wanddicke) und  $\tau$  (Versuchsdauer) gefunden werden, die das Wandtemperaturfeld möglichst genau abbildet. Dafür bietet das in *Matlab* integrierte Curve-Fit-Tool das ideale Werkzeug.

Als Referenz für die Polynomentwicklung in *Matlab* wurden im Abstand von zu Beginn 10 Sekunden, später 30 Sekunden und zu fortgeschrittener Simulationszeit 120 Sekunden aus den Temperaturfeldberechnungen ausgelesen. Der Grund für die steigenden Zeitschritte ist die anfangs stark ansteigende Temperatur gemäß der ETK. Die nun erhaltenen Temperaturprofile sind für jeden Zeitpunkt nur noch von der Position im Ziegel abhängig. Diese Daten können in Form einer Tabelle an *Matlab* übergeben werden.

Abbildung 5.8 zeigt die Vorgabepolynomwerte als schwarze Punkte sowie die von *Matlab* ermittelte Regressionsfläche. Vor allem im mittleren Zeitbereich von 10 bis 40 min, wo mehr Punkte vorgegeben wurden, ist die Übereinstimmung ausreichend. Bei  $z = 0$  erkennt man gut die Wirkung

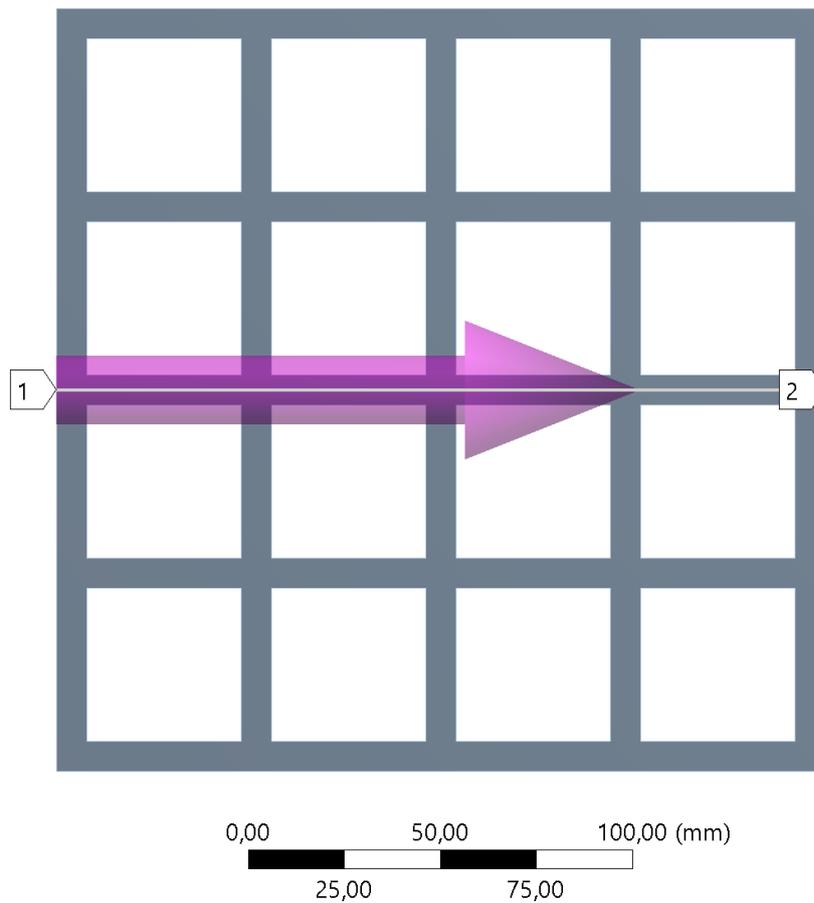
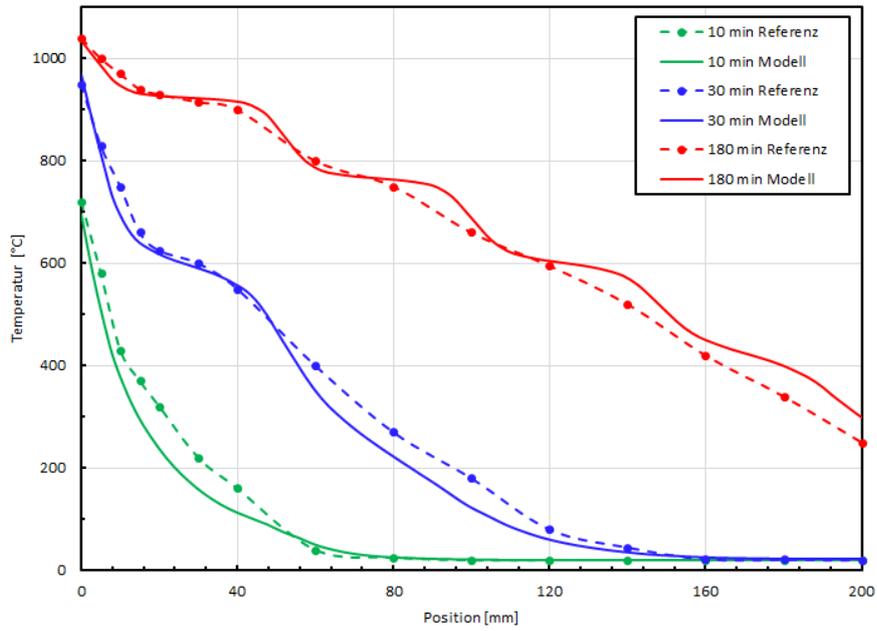


Abbildung 5.7: Temperaturverläufe im Ziegel - Vergleich des Simulationsmodell mit Referenz [15] (oben), Pfad, entlang welchem obige Temperaturverläufe ausgewertet wurden (unten)

der ETK als Randbedingung an der Ziegeloberfläche. Insgesamt bietet das erhaltene Polynom, welches in Zeitrichtung dritten Grades und in  $z$ -Richtung vom Grad fünf ist, einen  $R^2$ -Wert (Bestimmtheitsmaß) von 0,9836 und hat damit eine ausreichende Übereinstimmung mit dem simulierten Temperaturfeld in der Wand.

Problematisch sind die großen Gradienten zu Simulationsbeginn. Diese liegen in der schnell ansteigenden ETK und den anfangs ebenso großen Gradienten der Temperatur in der Wand ( $z$ -Richtung) begründet. Dies führt zu Auffälligkeiten in der Verschiebungsberechnung, wie später im Abschnitt Ergebnisse näher beschrieben wird.

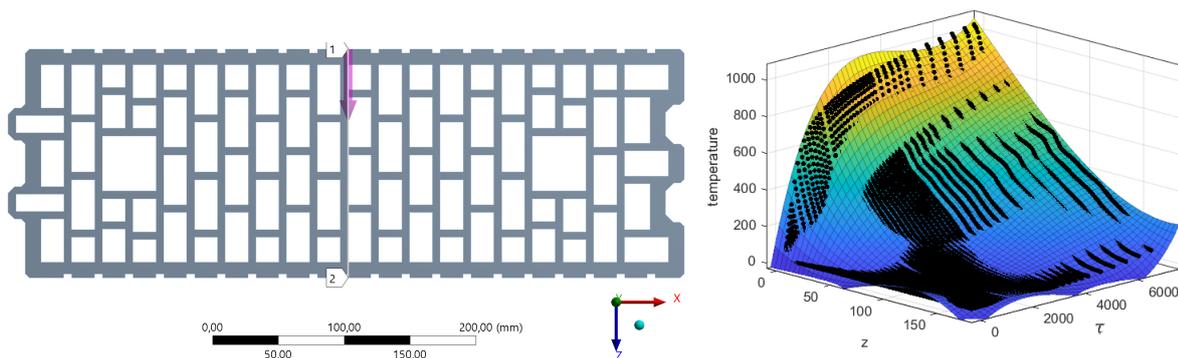


Abbildung 5.8: Links: Pfad entlang welchem die Temperaturen ausgewertet wurden; Rechts: Daraus folgende Vorgabe für das Curve-Fitting (Punkte) und Resultat (3D-Fläche)

### 5.3.5 Kontakte zwischen den Ziegeln (Testsimulation)

Für eine Testsimulation wurde eine Ziegelreihe, bestehend aus acht Ziegeln, vollständig mit reibungsbehafteten Kontakten und Randbedingungen modelliert. Die Mörtelschichten bleiben zunächst unberücksichtigt. Als thermische Bedingung für die Ziegel wurde das zuvor als Gleichung entwickelte Temperaturfeld angewendet.

Als Randbedingung dient eine elastische Einspannung mit einem Steifigkeitswert von  $2,1 \text{ N/mm}^3$  an den links und rechts vorhandenen Seitenflächen. Zusätzlich wurden die äußersten vorderen Ecken im Raum fixiert, um eine Starrkörperbewegung auszuschließen.

Durch die primär an der Innenseite wirkende thermische Ausdehnung verformt sich die Ziegelreihe, wie in Abbildung 5.9 oben gezeigt, hin zu Seite mit höherer Temperatur. Die Verformung nach innen bewirkt aber auch, dass sich ebenso an der Außenseite kein Spalt zwischen den Ziegeln bildet. Zu jedem Zeitpunkt herrscht ein positiver Kontaktdruck auf den miteinander in Verbindung stehenden Flächen. Es tritt kein Gleiten auf, was aufgrund der hohen Reibung zwischen den Ziegeln in der Realität nicht zu erwarten wäre.

Auch im realen Versuch, bei dem eine Verformung der Ziegelwand zum Feuer hin mit freiem Auge sichtbar ist, ist kein Auseinanderklaffen der Ziegel zu erkennen<sup>6</sup>, weder auf der Außen-

<sup>6</sup>Tatsächlich kann aufgrund der eher groben Toleranzen auf der Baustelle von vornherein ein Spalt zwischen den Ziegeln vorhanden sein, hier wird aber von ideal gemauerten Ziegeln ausgegangen.

noch auf der Innenseite. Abbildung 5.9 unten zeigt eine Detailaufnahme des Kontaktverhaltens zwischen zwei diskret modellierten Ziegeln.

Insofern bietet es sich an, die miteinander in Kontakt stehenden Ziegel zu einem Volumenkörper zu vereinen, um Rechen- und Modellierungsaufwand durch die Kontakte zu sparen, welche keinen Einfluss auf die Lösung hätten.

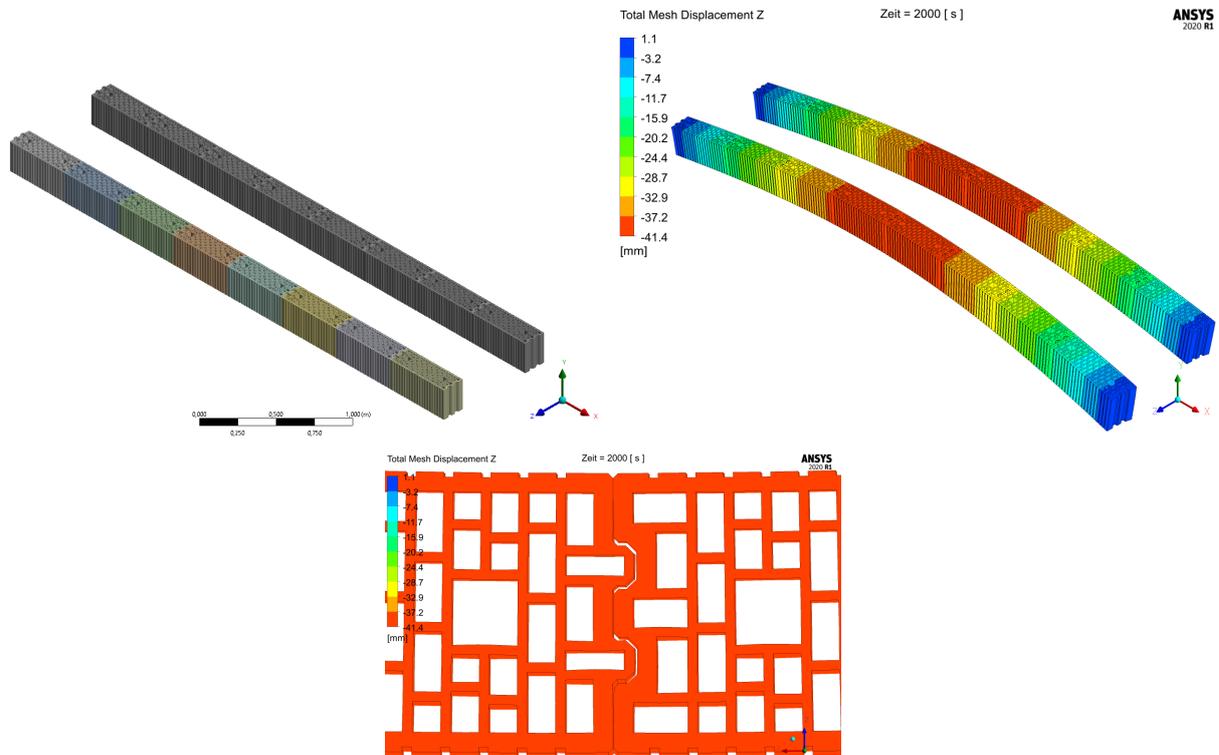


Abbildung 5.9: Oben: Verformungsbild einer Ziegelreihe für die Kontaktuntersuchung zum Zeitpunkt von ca. 33 min. Das Temperaturfeld wurde durch oben beschriebene Polynomdarstellung modelliert. Unten: Detail der Kontaktflächen zum entsprechenden Zeitpunkt.

### 5.3.6 Hohlräume und Mörtelschicht (Testsimulationen)

**Mörtelschicht** Zur Beurteilung, welche Geometriemerkmale relevant für die Modellbildung sind, wurden Testsimulationen durchgeführt. Bei den Testberechnungen, deren Ergebnisse mit Abbildung 5.10 zusammengefasst werden, wurde zunächst zwischen Temperatureinfluss und dem Einfluss einer mechanischen Last unterschieden. Das Temperaturfeld entspricht jenem der oben beschriebenen thermischen Bedingung. Die mechanische Last wurde allerdings im Sinne einer Verkürzung der Rechenzeit nicht mit der vollen Türgeometrie und deren Verformung, sondern mit einer fiktiven Kraft nachgebildet, welche im Bereich des Sturzes angreift<sup>7</sup>. Der Angriffspunkt der Kraft ist in den Unterabbildungen c) und d) in Abbildung 5.10 dargestellt.

<sup>7</sup>Hier geht es rein um das Abschätzen von Auswirkungen von Mörtelschicht und Hohlräumen, nicht um exakte Ergebnisse

## 5 Modellbildung

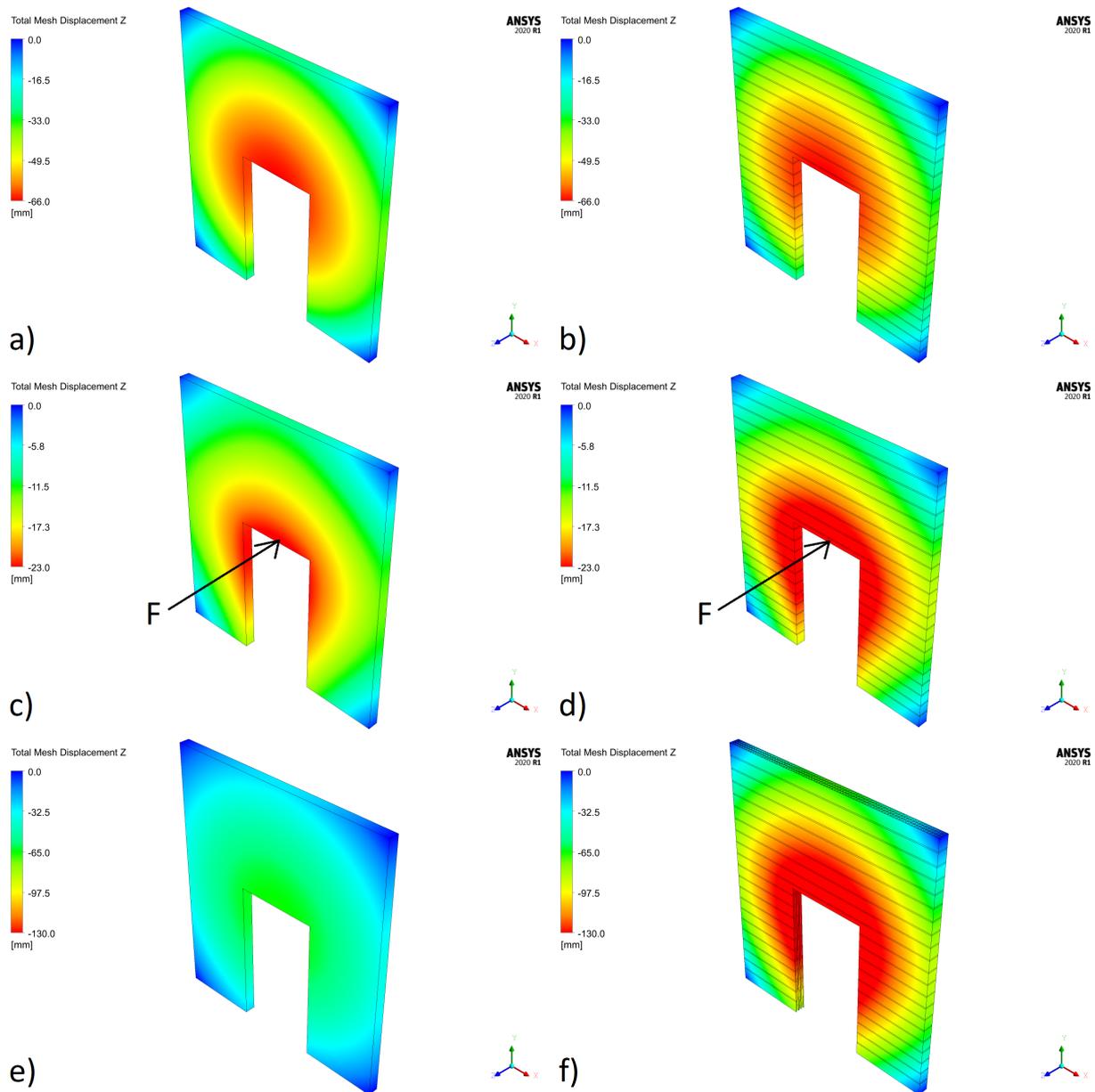


Abbildung 5.10: Auswirkungen der Mörtelschicht und der Ziegelhohlräume - a) ohne Mörtel durch Temperaturfeld b) mit Mörtel durch Temperaturfeld c) ohne Mörtel durch Kräfteinwirkung d) mit Mörtel durch Kräfteinwirkung e) ohne Hohlräume im Ziegel durch Temperaturfeld f) mit Hohlräumen im Ziegel durch Temperaturfeld

Eine bedeutende Einflussmöglichkeit stellen die Mörtelschichten zwischen den Ziegelreihen dar. In der Tat hat das Vorhandensein dieser einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Grad der Deformation der Wand und muss in den Modellen eine Berücksichtigung finden. Allerdings hat die Mörtelschicht kaum eine Auswirkung auf das Verformungsbild, welches sich ausschließlich aufgrund des Temperaturfeldes ergibt. Dies wird durch die nahezu gleichen Verformungsergebnisse der Systeme a) und b) in Abbildung 5.10 untermauert. Bezüglich der mechanischen Last hat der Mörtel allerdings sehr wohl einen Einfluss, weshalb sich die Ergebnisse der Systeme c) und d) deutlich unterscheiden (mehr Verformung im System d) aufgrund des weicheren Mörtels). Letzteres ist aufgrund der wesentlich geringeren Festigkeitswerte von Mörtel zu erwarten. Eine

mögliche Erklärung für das Übereinstimmen von a) und b) ist, dass sich der Mörtel ebenfalls thermisch ausdehnt. Die unterschiedlichen Werte der Temperaturexpansionskoeffizienten werden durch die ebenfalls unterschiedlichen Festigkeitskennzahlen in etwa ausgeglichen.

**Hohlräume** Jeder Ziegel besitzt 84 Hohlräume. Diese spielen durch den Strahlungswärmetransport eine entscheidende Rolle in der Wärmeübertragung und wurden dafür in vollem Detail modelliert. Für die strukturmechanische Simulation stellt sich nun die Frage, inwieweit die Kavitäten für das Verformungsverhalten des Systems relevant sind. Eine detaillierte Auflösung aller Hohlräume würde ein äußerst feines Netz erfordern oder würde Zellen mit sehr schlechten Seitenverhältnissen (Aspect Ratios) verursachen. Die vereinfachte Hohlraumgeometrie (quadratische Hochlöcher in drei Reihen angeordnet) der Hochlochziegel wurde so gewählt, dass dieselbe Brutto-Trockenrohddichte erreicht wird. Das Verhältnis von Lochvolumen und Ziegelvolumen bleibt gleich wie beim Originalziegel.

Zur Klärung der Frage, ob die Hohlräume zu berücksichtigen sind, wurde zunächst ein Modell ohne Kavitäten erstellt, das Temperaturfeld aufgebracht und die sich einstellenden Verformungen ausgewertet. Anschließend wurden zum Vergleich vereinfachte Hohlräume ins Modell eingefügt. Nicht unerwartet ist das Ergebnis, dass die Kavitäten sehr wohl Auswirkungen auf die Steifigkeit des Systems haben. Allerdings bleibt es im Sinne des Berechnungsaufwandes bei der vereinfachten Hohlraumgeometrie. In Abbildung 5.10 sind die Unterschiede mit den Teilgrafiken e) und f) dargestellt.

### 5.3.7 Randbedingungen (Testsimulationen)

Wie bei jeder numerischen Simulation spielt die Definition der Randbedingungen eine bedeutende Rolle. Das Festlegen dieser ist jedoch für die vorliegenden Versuchswände nicht einfach.

Für die ersten Testsimulationen von temperaturabhängigen Wandverformungen liegt es nahe, die Ränder der Ziegelwand als fix eingespannt anzusehen. Auch im Zuge dieser Arbeit war dies der erste Ansatz. Dabei wurde schnell klar, dass sich eine typische Verformung zum Feuer hin äußerst schwach ausbildet. Es kommt zu hohen Druckspannungen in den Ziegeln und die simulierte Verschiebung<sup>8</sup> beträgt nur um die -2 mm nach 30 min Simulationszeit. Als Beispiel für eine solche Einspannung dient Teilsystem a) in Abbildung 5.11.

Eine weitere, zunächst plausible Möglichkeit liegt im anderen Extremfall - nämlich darin, die Verformung der Ziegelwand vollständig zuzulassen und nur wenige Punkte in den Ecken im Raum zu fixieren<sup>9</sup>. Das Verformungsverhalten wird dadurch zwar realistischer - es ergibt sich eine deutliche Verformung zur heißen Seite hin - jedoch führt dies zu wesentlich größeren Werten in der FEM-Simulation von über -80 mm.

Dadurch wird klar, dass die ideale Randbedingungen irgendwo dazwischenliegen muss. Die Versuchswand wurde in einem Stahlrahmen aufgebaut. Dieser hat zwar mit Sicherheit eine

<sup>8</sup>Ziel wäre eine Verschiebung ähnlich wie bei den Messergebnissen zu erhalten, also im Bereich zwischen -20 mm und -50 mm

<sup>9</sup>Eine Ecke fix, andere Ecken in ihren Freiheitsgraden entsprechend eingeschränkt, um eine Starrkörperbewegung zu verhindern.

## 5 Modellbildung

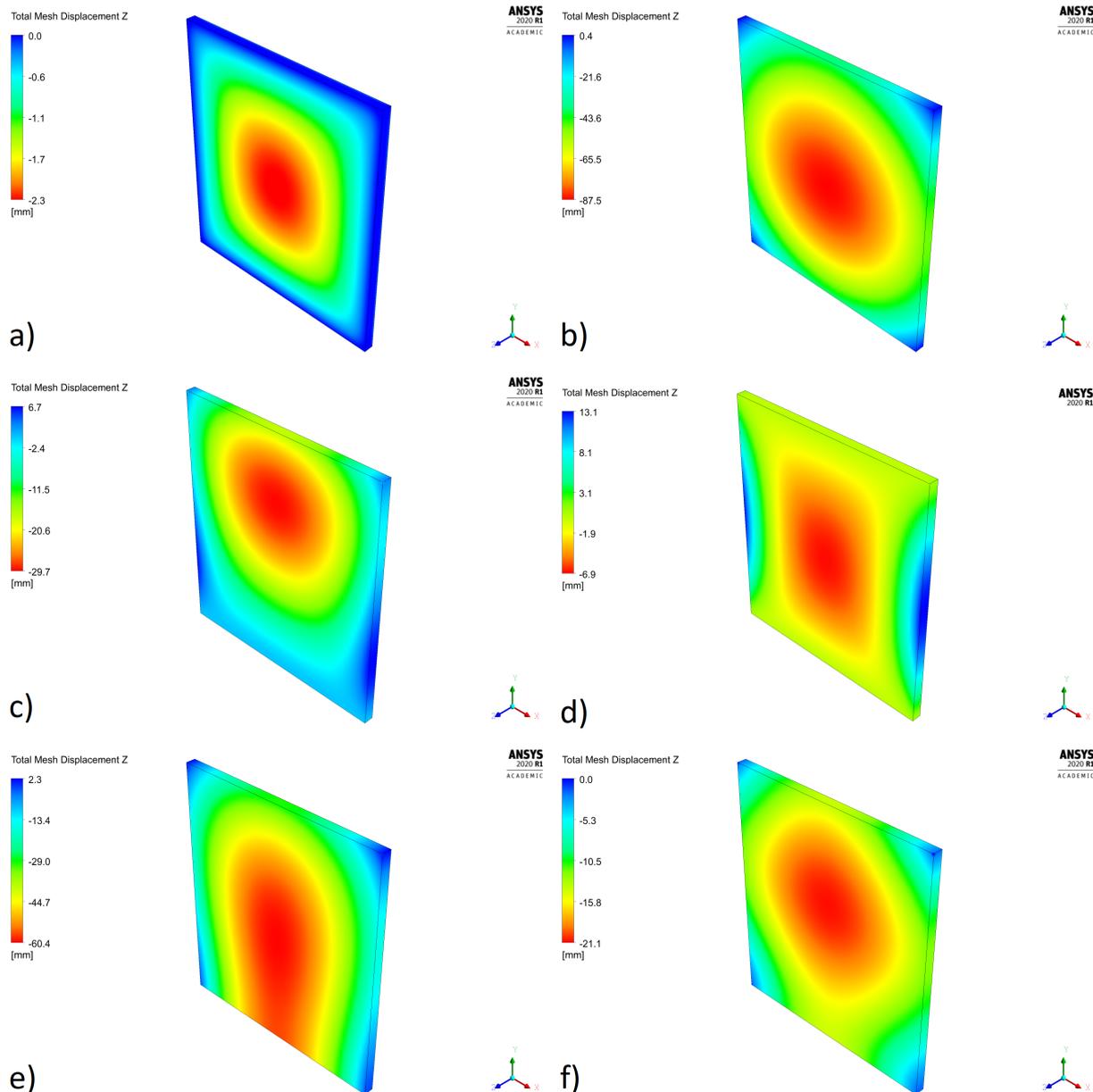


Abbildung 5.11: Auswirkung der gewählten Randbedingungen auf die Verformungsbilder - a) Rand fix b) komplett frei c) unten fix, sonst frei d) oben und unten fix e) unten mit Reibung f) unten mit Reibung, seitlich elastisch

hohe Steifigkeit, wird sich bei den Versuchen jedoch ebenfalls auf unbekannte Temperaturen erwärmen, ausdehnen und die Verformung der Wand in einem gewissen, unbekanntem Maße einschränken<sup>10</sup>. Eine einfache Möglichkeit, ein solches Verhalten abzubilden, ist die elastische Lagerung der Randflächen. Dabei muss eine Steifigkeit mit der Einheit  $N/mm^3$  vorgegeben werden. Die Verschiebung der elastisch gelagerten Fläche um einen gewissen Weg ergibt dann mit der Steifigkeit eine Rückstellkraft auf die Fläche im Modell. So soll der durch den Stahlrahmen verursachte Widerstand gegen das seitliche Ausdehnen der Wand (x- bzw. y-Richtung) modelliert

<sup>10</sup>Die thermische Ausdehnung von Stahl ist bei Raumtemperatur ca. 2,8 mal größer als jene von gebranntem Ton und wächst mit ansteigenden Temperaturen, allerdings ist der Rahmen kühler.

werden.

Um zusätzlich eine Widerstandswirkung des Stahlrahmens gegen eine Verschiebung in z-Richtung - also zum Feuer hin - zu ermöglichen, wurden Randblöcke eingefügt (ersichtlich in Abbildung 5.4). Diese sollen über einen reibungsbehafteten Kontakt die Wandverschiebung am Rand zulassen. Dies erscheint deswegen sinnvoll, um die in Kapitel 4 beschriebenen Verformungen des Türrahmens abzubilden, die sich in Randnähe der Wand befinden (z. B. Messpunkt K bei rechts eingebauter Tür).

Nach einigen Iterationen hat sich der Wert von  $0,05 \text{ N/mm}^3$  für die elastische Lagerung als tauglich erwiesen. Dieser wurde dann in allen Modellen der Ziegelwand angewendet. Zusammen mit der Größe der Fläche, für die diese Randbedingung gelten soll, ergibt sich dadurch zB. bei einer Verschiebung der Wand von 1 mm eine Rückstellkraft auf die Fläche von 150 kN. Dieser Wert ist allerdings theoretisch zu sehen. Vielmehr ermöglicht diese Art der Lagerung eine leichte Verdrehung der Ziegel im Randbereich, ohne große seitliche Verschiebungen zuzulassen. Es handelt sich nicht um die wirkliche Steifigkeit des Rahmens.

Abbildung 5.11 zeigt nur einige mögliche Randbedingungen und ihre Auswirkungen auf das Verformungsbild<sup>11</sup> der Wand. Darin erkennt man auch, dass mit einer elastischen Lagerung am Rand ähnliche Werte wie in der Messung, also im Bereich um die -20 mm, erreicht werden können.

Weil sie bei der schweren Ziegelwand eine Rolle spielen könnte, wurde die Erdanziehungskraft als zusätzliche Last aktiviert.

---

<sup>11</sup>Diese Simulationen wurden ohne Randblöcke durchgeführt, da sie nur zur Darstellung der Auswirkungen der Randbedingungen dienen. Die elastische Lagerung wurde direkt auf die Seitenflächen der Wand aufgebracht.

### 5.3.8 Kontakte

**Zwischen Ziegeln, Mörtel und Sturz** Im Gegensatz zu den Hochlochziegeln ist der Sturz ein massives, die darüber liegenden Ziegelreihen tragendes Bauteil in der Versuchswand und hat dadurch eine versteifende Wirkung auf das System. Innerhalb der Sturzschale gibt es einen Kern aus Beton. Für alle Kontakte innerhalb des Sturzes und mit den umliegenden Ziegeln und Mörtelschichten wurden Verbundkontakte angenommen.

**Zwischen Tür und Zarge** Die Tür kann durch ihre thermisch bedingte Verformung als mechanische Last in der Wand angesehen werden. Das Verhalten der Türverformung ist also auch für die Wandverformung relevant. Zwischen Wand und Zarge gehen wir in der Modellbildung dieser Arbeit von einem Verbundkontakt aus. Es bilden sich keine Risse und die Verbindung bleibt immer bestehen.

Zwischen der Tür und der Zarge ist die Implementierung eines zu Beginn des Versuches offenen und sich mit fortschreitender Zeit schließenden Kontaktes notwendig. Dieser Kontakt sorgt dafür, dass die Ecken der Türe zu einem gewissen Zeitpunkt die Zarge berühren und sich dort abstützen. Somit wird über die Zarge eine größere Kraft auf die Wand übertragen. Dieser Kontakt ermöglicht auch die Modellierung der Spaltbildung zwischen Tür und Zarge, die für den Rauchgasaustritt von Bedeutung ist. Auf der von außen betrachtet linken Seite, wo Sicherungsbolzen das System verstärken ist die Spaltbildung wesentlich kleiner als rechts, wo nur das Schloss eine Verbindung zwischen Tür und Zarge ist. Abbildung 5.12 zeigt die Spaltbildung an der dem Feuer ausgesetzten Seite nach 30 min für die Ziegelwand mit mittig eingebauter Tür. Über dem Spalt erkennt man eine Wellenbildung aufgrund der Temperatursausdehnung der Zarge.

Die Kontakteinstellungen werden mit Tabelle 5.3 zusammengefasst.

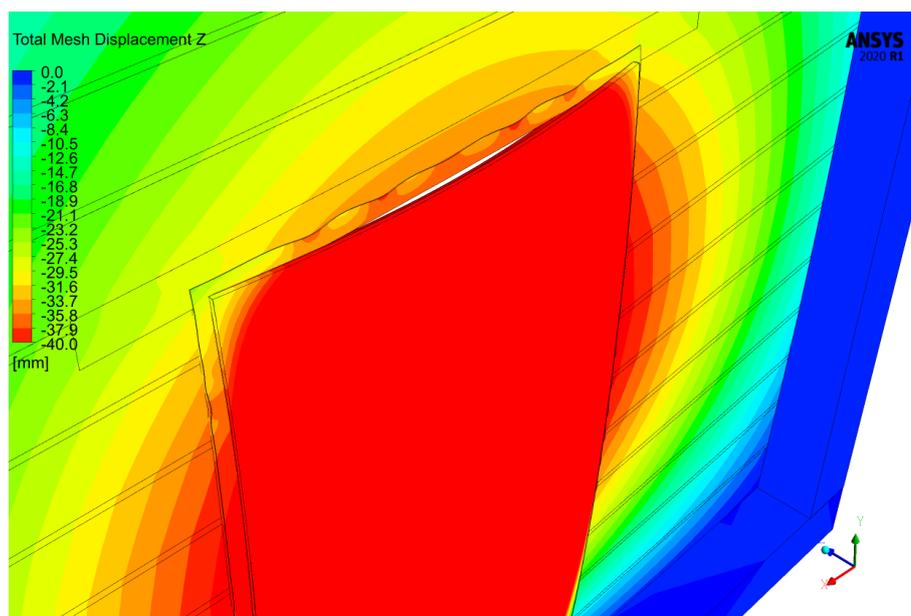


Abbildung 5.12: Spaltbildung zwischen Tür und Zarge an der dem Feuer zugewandten Seite der Versuchswand mit Tür in der Mitte (30 min); zweifach vergrößert; Das Simulationsmodell entspricht jenem von Abbildung 6.7

|                                    | Verbund            | Reibungsbehaftet                     |
|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Formulierung                       | Augmented Lagrange | Augmented Lagrange                   |
| Reibungskoeffizient                | -                  | 0,2                                  |
| Detektionsmethode                  | -                  | Knoten-Normal projiziert zum Kontakt |
| Durchdringungstoleranz             | -                  | Wert                                 |
| Durchdringungstoleranzwert         | -                  | 1 mm                                 |
| Kontaktsteifigkeit                 | -                  | Faktor                               |
| Kontaktsteifigkeitsfaktor          | -                  | 0,1                                  |
| Dämpfungsfaktor der Stabilisierung | -                  | 0                                    |

Tabelle 5.3: Kontakteinstellungen für alle Wandsimulationen (gilt für Ziegel- und Leichtbauwand)

## 5.4 FEM-Modell der Leichtbauwand

In der Leichtbauwand stellen hauptsächlich die Stahlprofile zusammen mit den Gipsverkleidungen die strukturell bedeutsamen Bauteile dar. Aufgrund der im Gegensatz zum gebrannten Ton besser bewährten Materialmodelle von Stahl würde man zunächst qualitativ und quantitativ genauere Simulationsergebnisse bei geringerem Aufwand erwarten.

Leider erschwert das Verhalten der Gipsplatten die Modellierung. Einerseits gibt es die in Kapitel 2 beschriebenen Gipsreaktionen, die sich enorm auf den Wärmetransport durch die Leichtbauwand auswirken, andererseits hat der Gips die Eigenschaft, sich bei Temperaturerhöhung zu kontrahieren, anstatt auszudehnen, was ebenso Unsicherheiten in die Modellbildung bringt. Die Kontraktion überlagert sich mit dem Festigkeitsverlust bei hohen Temperaturen und kann ohne geeignetes Schadensmodell nicht seriös in die Modellbildung implementiert werden<sup>12</sup>. Die wurde deshalb in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus bringt die Modellierung der Leichtbauwand das Problem mit sich, dass sehr dünne Stahlprofile (0,6 mm) mit großen Temperaturgradienten belastet werden. Ein Hinweis auf die Folgen einer solchen Belastung gibt Abbildung 5.12, indem bereits eine Wellenbildung durch die Wärmeausdehnung der Zarge zu sehen ist.

Wie auch schon bei der Ziegelwand ist die Modellierung der Randbedingungen und Kontakte von großer Bedeutung.

Die Simulationszeit wird auf den Zeitraum bis 30 Minuten nach dem Versuchsstart begrenzt, da in den realen Versuchen ca. nach dieser Zeit das Schloss aus seiner Verbindung mit der Zarge ausreißt (vgl. Abbildung 5.13). Dieser Effekt wurde in innerhalb dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

<sup>12</sup>Die Kontraktion führte in der Simulation ohne Schadensmodell zu großen Kräften auf die Profile und unrealistischem Verhalten, wurde in weiterer Folge nicht berücksichtigt.



Abbildung 5.13: Ausreißen des Schlosses bei fortgeschrittener Versuchsdauer (ca. nach 30min)

### 5.4.1 Netzgitter für die drei Einbausituationen der Türe

**Wärmetransport** Um Temperaturgradienten in z-Richtung (Wanddicke) auflösen zu können, wurden die Profile in entsprechender Richtung in 20 Abschnitte aufgeteilt. Die Gipsplatten erhielten eine Aufteilung in 5 Abschnitte. Für die Mineralwolle wurde eine Aufteilung in 10 Abschnitte als ausreichend angesehen. Da die Wärmetransportberechnung für die Leichtbauwandprofile mit *Ansys Fluent* erfolgte (auf FV-Methode basierend), handelt es sich um Volumenelemente. Die Ergebnisse lassen sich aber problemlos in die mit Schalenelementen vernetzten Modelle für die Verformungsberechnung importieren. Die Rechenetze<sup>13</sup> haben die mit Tabelle 5.4 gezeigten Eigenschaften. Eine Abbildung des typischen Querschnitts erfolgt mit Abbildung 5.14.

Weil für die Rahmenprofile der Abschnitt über dem Türrahmen und zusätzliche Gipsplatten (für die Abstrahlung im Türrahmen auf der abgewandten Seite) mit modelliert wurden, ist das Rechenetz für die Rahmenprofile deutlich größer.

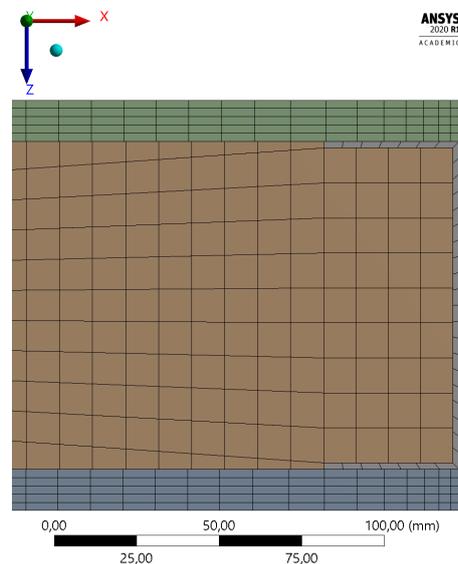


Abbildung 5.14: Rechenetz für den Wärmetransport durch die Leichtbauwand

| Modell        | Elementanzahl | mittleres Seitenverhältnis (AR) |
|---------------|---------------|---------------------------------|
| Rahmenprofile | 574.433       | 2,32                            |
| CW-Profile    | 107.860       | 1,17                            |

Tabelle 5.4: Rechenetze der Leichtbauwandmodelle für den Wärmetransport

**Verformung** Die Rechenetzgröße entspricht in etwa jener der Ziegelwandmodelle. Durch die Vernetzung der Gipsplatten mit nur einem Element in der z-Richtung (Dicke) bleibt das AR auf einem tendenziell hohen Wert. Tabelle 5.5 gibt eine Übersicht über die Leichtbauwandmodellnetze und ihre Kennzahlen.

<sup>13</sup>Die Berechnung wurde in jeweils ein Modell für die Rahmenprofile (UA-Profil und UW-Profil im Türrahmen) und die dünneren CW-Profile aufgeteilt.

| Modell     | Elementanzahl | mittleres Seitenverhältnis (AR) |
|------------|---------------|---------------------------------|
| Tür links  | 157.179       | 16,4                            |
| Tür mittig | 148.547       | 17,3                            |
| Tür rechts | 152.228       | 16,9                            |

Tabelle 5.5: Rechenetze der Leichtbauwandmodelle für die Verformung

### 5.4.2 Wärmetransport

Weil bereits UDFs für die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Gips vorhanden waren, wurde die Wärmeleitung durch die Leichtbauwand nicht mit *Ansys Mechanical* und dem Subsystem *Thermal* berechnet, sondern mit *Ansys Fluent*.

Im ersten Schritt wurde der Wärmetransport durch die Leichtbauwand als reine Wärmeleitung simuliert. Dies führte aber allgemein auf zu hohe Temperaturen und auch zu falschen zeitlichen Verläufen der Temperaturfelder in allen Bauteilen. Die sich so ergebenden Verformungen waren ca. um den Faktor 2-3 zu groß. Der Grund dafür liegt im komplexen Verhalten von Gips.

Der aus dem Gips austretende Wasserdampf kondensiert zunächst an kalten Stellen in der Wand. Diese Stellen werden damit frühzeitig auf an die 100 °C erwärmt, lange bevor dies durch die reine Wärmeleitung der Fall wäre. Im weiteren Verlauf verdampft das Kondensat wieder, weil die Temperatur der kondensatbenetzten Bereiche aufgrund von Wärmeleitung wieder über die 100 °C steigt. Die Auswirkungen dieses Effektes sind enorm. Prieler zeigt mit Abbildung 5.15 deutlich die Auswirkungen des Dampfes auf die Temperaturmessergebnisse [33]. Darin verweilt die Temperatur T<sub>GM2</sub> (gemessene Temperatur in einem anderem Brandversuch, nach zwei Gipsplatten mit Stärke 12,5 mm, die dem Feuer ausgesetzt sind. Für Details sei auf die entsprechende Publikation verwiesen) für längere Zeit auf einem Plateau bei ca. 100 °C.

Im zeitlichen Verlauf der gemessenen Verformungen der vorliegenden Leichtbauwand erkennen wir ebenfalls eine Plateaubildung (vgl. Abbildung 5.16), welche sich durch obige Effekte gut erklären lässt. Aufgrund der Tatsache, dass die Gipsplatten bei der Leichtbauwand direkt auf den Stahlprofilen aufliegen, wurde nun alternativ zur bisherigen Randbedingung<sup>14</sup> der messtechnisch ermittelte Temperaturverlauf T<sub>GM2</sub> (Construction 1) aus dem Versuch von Prieler direkt als Randbedingung auf den Stahlprofilen vorgeben. Die abgewandte Wandseite bleibt unverändert. Dadurch werden die Temperaturfelder in der Wand realistischer abgebildet. Eine Darstellung des Querschnitts der Geometrie des Leichtbauwandmodells bietet Abbildung 5.17. Darin ist der Ort der Temperaturvorgabe rot markiert.

Es sei nochmals angemerkt, dass diese Randbedingung nicht notwendigerweise dem wirklichen Temperaturverlauf an der genannten Stelle entspricht. Jedoch ist der zugrunde liegende Effekt mit einer vereinfachten Temperaturfeldsimulation wie bei der Ziegelwand nicht darstellbar.

Um den Festigkeitsverlust der Gipsplatten zu berücksichtigen, wurde auf diese eine thermische Bedingung angewandt. Die zugewiesenen Temperaturen an der Außenseite bleiben im Simulationszeitraum auf 20°C. Auf der Feuerseite steigt die mittlere Körpertemperatur von 20°C auf ca. 600°C an. Diese Werte stammen aus Vorsimulationen.

<sup>14</sup>Strahlung und Konvektion an der dem Feuer zugewandten Seite

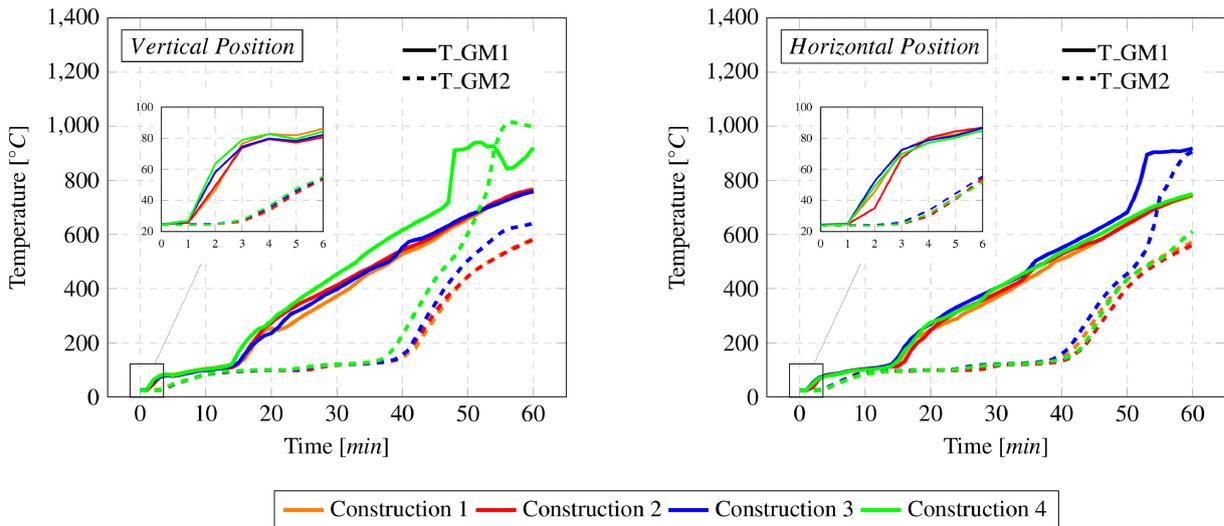


Abbildung 5.15: Auswirkungen der Gipsreaktionen und des dadurch entstehenden Wasserdampfs auf den Wärmetransport [33]

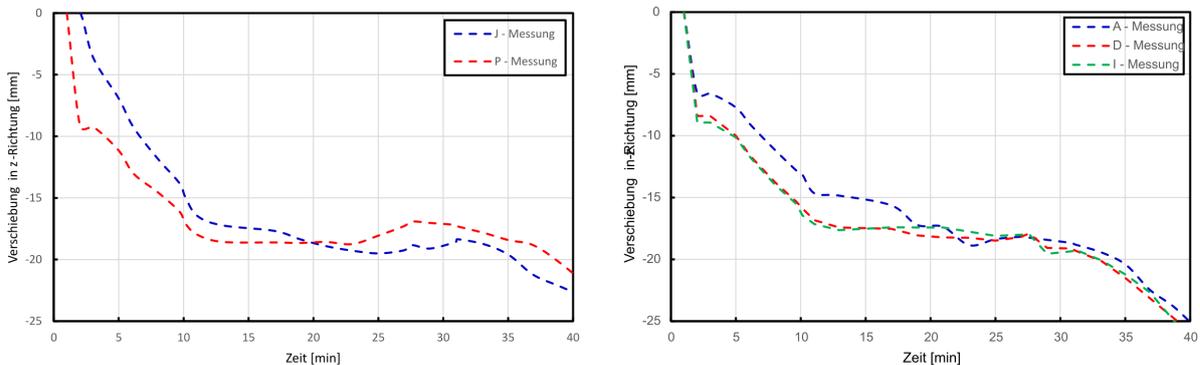


Abbildung 5.16: Verformungsmessdaten von Messpunkten auf der Leichtbauwand mit Tür mittig im zeitlichen Verlauf; Plateaubildung durch Wasserdampf aus den Gipsreaktionen

### 5.4.3 Verformungsmodellierung

Die dünnen Profile würden bei einer Volumenvernetzung zu schlechten Aspect-Ratios, zu einer hohen Elementanzahl und damit zu unnötig langer Rechenzeit führen. Daher fiel die Elementwahl zur Vernetzung der nur 2 mm und 0,6 mm dicken, aber 4,5 m langen (entspricht der Höhe des Ofens) Profile auf Schalenelemente. Diese ermöglichen keinen Temperaturgradienten in der Dicke und damit keine genaue Berechnung der thermischen Ausdehnung in dieser Richtung. Weil der Wärmetransport aber hauptsächlich in z-Richtung stattfindet, lässt sich die thermische Verformung auch mit Schalenelementen modellieren. Zur Überprüfung der Äquivalenz der Schalen und Volumenmodellierung wurde eine kleine Testsimulation mit nur einem Stahlprofil in Solid- und Schalenvariante durchgeführt. Dabei ergaben sich vernachlässigbare Abweichungen hinsichtlich Verformung und Kraftreaktionen in den Lagerungen (siehe Anhang).

Sowohl die 2 mm dicken UA-Profile, als auch die dünnen CW- und UW- Profile wurden im Modell berücksichtigt. Ohne Berücksichtigung blieben hingegen die Lochmuster in den Stahlprofilen. Diese würden zu einem hohen Vernetzungsaufwand führen. Da sie auch eher im Profilinneren

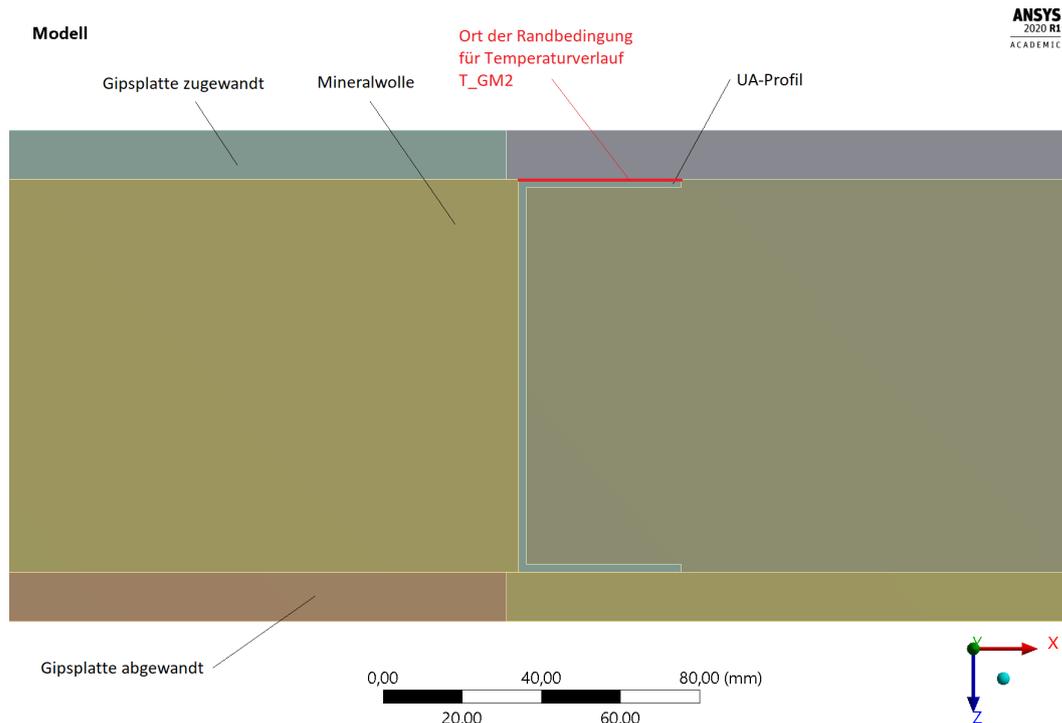


Abbildung 5.17: Querschnitt durch die Modellgeometrie der Leichtbauwand mit Ort der Aufbringung des von Prieler gemessenen Temperaturverlaufs (Construction 1) nach Gipsplatten [33]. Die inneren Gipsplatten wurden aus der Berechnung ausgenommen.

liegen (vgl. Abbildung 2.5) und für eine Durchbiegung vielmehr die Randfasern von Interesse sind, wird diese Vereinfachung als gerechtfertigt angesehen.

Das Türmodell ist identisch mit jenem der Ziegelwand, wobei die Kraftübertragung zwischen Wand und Tür hier durch elf am Türrahmen verteilte Befestigungslaschen, anstatt einer Ausfüllung des Hohlraums zwischen Tür und Zarge mit Mörtel, erfolgt. Dies entspricht der realen Situation bei den Versuchen.

### 5.4.4 Randbedingungen

Als Randbedingung wurde aufgrund der Einbausituation der Profile eine fixe Einspannung am Boden gewählt. Die Profile bleiben oben in y-Richtung (vertikal) frei, die anderen Richtungen wurden gesperrt. Dies wird damit begründet, dass die starke Kraftwirkung bei der thermischen Ausdehnung hier punktförmig auf den Rand des Rechengebietes angreift<sup>15</sup>. Außerdem wurden die seitlichen Ränder der Gipsplatten fixiert, um die Verschraubung mit den Fest mit dem Rahmen verbunden gedachten Profilen am Rand der Wand zu modellieren. Abbildung 5.18 zeigt das Geometriemodell der Leichtbauwand ohne Elementdarstellung. Die vorderen Gipsplatten wurden ausgeblendet, um einen Blick in den inneren Aufbau des Modells der Wand zu ermöglichen.

<sup>15</sup>Bei der Ziegelwand wurde, aufgrund des flächigen Kontaktes der Ziegel mit dem Rahmen, auch oben eine elastische Lagerung vorgesehen.

Bei der Leichtbauwand wurde auf eine Aktivierung der Erdanziehungskraft verzichtet, da die ihre Masse im Vergleich zur Ziegelwand klein ist, und die Schwerkraft deswegen höchstwahrscheinlich keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse hat.

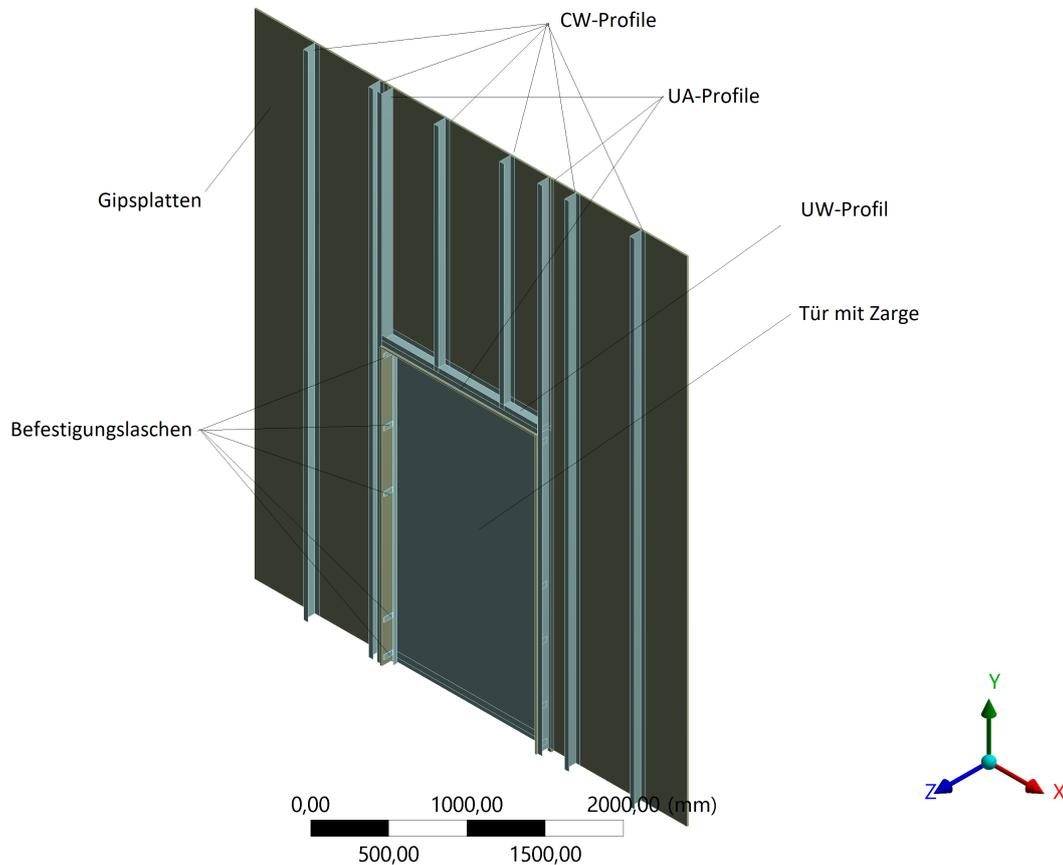


Abbildung 5.18: Leichtbauwandmodell mit Tür mittig (vordere Gipsplatten ausgeblendet)

### 5.4.5 Kontakte

Im gesamten Leichtbauwandmodell wird mit Verbundkontakten gearbeitet. Die einzige Ausnahme stellt der Kontakt zwischen Tür und Zarge dar, seine Definition ist identisch wie bei der Ziegelwand (siehe Absatz 5.3.8). Dies ermöglicht die korrekte Modellierung von im späteren Verlauf der Simulation auftretenden Kontakt und Spaltbildung.

Der Kontakt der dünnen Stahlprofile mit den Gipsplatten wird als Verbundkontakt modelliert, weil die Verbindung in der Realität mit Schrauben im Abstand von nur wenigen cm erfolgt. Zudem stabilisiert der flächige Kontakt das Aufwerfen von Wellen durch die Begrenzung der thermischen Ausdehnungen. Dies stabilisiert die Lösung und beschleunigt die Konvergenz (vgl. Effekt in Abbildung 5.12).

## 5.5 Zusammenfassung

Mit den Einstellungen und Randbedingungen, welche mit Tabelle 5.6 zusammengefasst werden wurden die Simulationsmodelle in *Ansys* berechnet.

|                     | Ziegelwand   | Leichtbauwand  |
|---------------------|--|--|
| Simulationszeitraum | 40 min   | 30 min   |
| Schrittsteuerung    | autom. Zeitschrittsteuerung, def. über Substeps (anfänglich 2.400, min. 240, max. 24.000)  | autom. Zeitschrittsteuerung, def. über Substeps (anfänglich 36.000, min. 180, max. 36.000)                             |
| Solver-Steuerung    | Typ: Programmgesteuert; Schwache Federn: aus, große Verformungen: ein  | Typ: Programmgesteuert; Schwache Federn: aus, große Verformungen: ein  |
| Temperaturfeld Wand | Thermische Bedingung (Gleichung)   | Direktimport aus <i>Ansys Fluent</i> für Stahlprofile, thermische Bedingung für Gips                                   |
| Temperaturfeld Tür  | Direktimport aus <i>Ansys Thermal</i> , ebenso für Sturz   | Direktimport aus <i>Ansys Thermal</i>  |
| Randbedingungen     | Elastisch gelagerte (verschiebliche) Randblöcke haben reibungsbehafteten Kontakt mit Ziegelwand; Eckpunkte gegen Starrkörperbewegung im Raum fixiert | Profile unten fixiert, oben in z-Richtung und x-Richtung fixiert; Gipsplatten am Rand fixiert                          |
| Kontakte            | reibungsbehaftet zwischen Tür und Zarge und zwischen Ziegelwand und Randblöcken, sonst Verbundkontakte   | reibungsbehaftet zwischen Tür und Zarge, sonst Verbundkontakte   |
| Sonstiges           | Erdanziehungskraft aktiviert   | vereinfachtes Materialmodell für Gips (nur E-Modul) aus Biegeversuchen bei 5 min Aufwärmzeit, keine Erdanziehungskraft |

Tabelle 5.6: Zusammenfassungen der Modellbildung für Ziegel- und Leichtbauwände

Die automatische Zeitschrittsteuerung wurde gewählt, weil die Schrittweite zu Beginn<sup>16</sup> sehr klein sein muss. Der Zeitpunkt, an welchem Kontakt zwischen Türblatt und Zarge stattfindet, ist darüber hinaus unbekannt und erfordert ebenfalls eine feinere zeitliche Auflösung.

Im späteren Simulationsverlauf hingegen werden durch die abflachende ETK und der bereits herausgebildeten Kontakte größere Zeitschritte möglich. Somit wird durch die automatische Zeitschrittsteuerung die Anzahl an Iterationen minimiert und die Lösung erfolgt möglichst schnell.

<sup>16</sup>Aufgrund schneller zeitlicher Temperaturänderungen; außerdem Sprung durch anfangs ungenaue Temperaturfeldgleichung (siehe Abbildung 5.8)

# 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

Auf den folgenden Seiten werden die Berechnungsergebnisse des Ziegelwandmodells präsentiert und den Messergebnissen der realen Feuerwiderstandsprüfungen gegenübergestellt. Zunächst sollen die Ergebnisse der Temperaturfeldberechnung erläutert und ihre Auswirkungen auf das Verformungsergebnis diskutiert werden. Danach folgen die Resultate der FEM-Berechnungen für die Ziegelwandverformungen.

## 6.1 Wärmetransport durch die Ziegelwand

Die Ergebnisse gelten für alle drei Einbaufälle<sup>1</sup> gleichermaßen, da - wie in Kapitel Kapitel 5 beschrieben - ein einheitliches Temperaturfeld, welches aus der detaillierten Berechnung eines Ziegels hervorgeht und als Funktion von z-Koordinate und Zeit vorliegt, als thermische Bedingung (Last) in die Simulation eingefügt wurde.

Als zu betrachtender Zeitraum für alle Ziegelwandsimulationen wurden die ersten 40 Minuten nach dem Versuchsstart gewählt, da bis dahin oft schon ein Versagen der Prüfkörper eingetreten ist. In Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass selbst bis zum Ende des Zeitraumes von ca. 40 min noch der größte Teil eines Ziegels kalt ist, also dass heiße Temperaturfronten nicht allzu weit in den Ziegel vorgedrungen sind. Der Ziegel zeigt dadurch lange keine signifikante Temperaturüberhöhung<sup>2</sup> an der Außenseite.

Für das physikalische Verhalten bedeutet dies, dass der Ziegel sich innen - an der dem Feuer zugewandten Seite - schneller und stärker thermisch ausdehnen wird. Dadurch ergibt sich die für alle Brandversuche charakteristische Verschiebung der Wände zum Feuer hin. Gleichzeitig wird dabei in Kombination mit der Randbedingung - der elastischen Einspannung an den Rändern - bewirkt, dass sich an keinem Punkt der Ziegelwand ein Spalt bildet. Dieser Effekt wurde für die Modellvereinfachung ausgenutzt.

Für die numerische Simulation erweckt es die Vermutung, dass die starken Gradienten im Temperaturfeld sich deutlich auf das Verformungsergebnis auswirken sollten. Allerdings beschreibt Nguyen, dass der Einfluss des Temperaturfeldes nicht so hoch ist wie man zunächst erwarten würde. Geringe Abweichungen im Temperaturfeld sorgen demnach nicht für allzu große Differenzen in der Verformungsberechnung [16]. Erklärbar ist dies durch das Vorhandensein der Hochlöcher, die eine komplexe Verformung auch nach innen zulassen.

---

<sup>1</sup>Türposition: links, mittig, rechts

<sup>2</sup>Gegenüber der Umgebungstemperatur

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

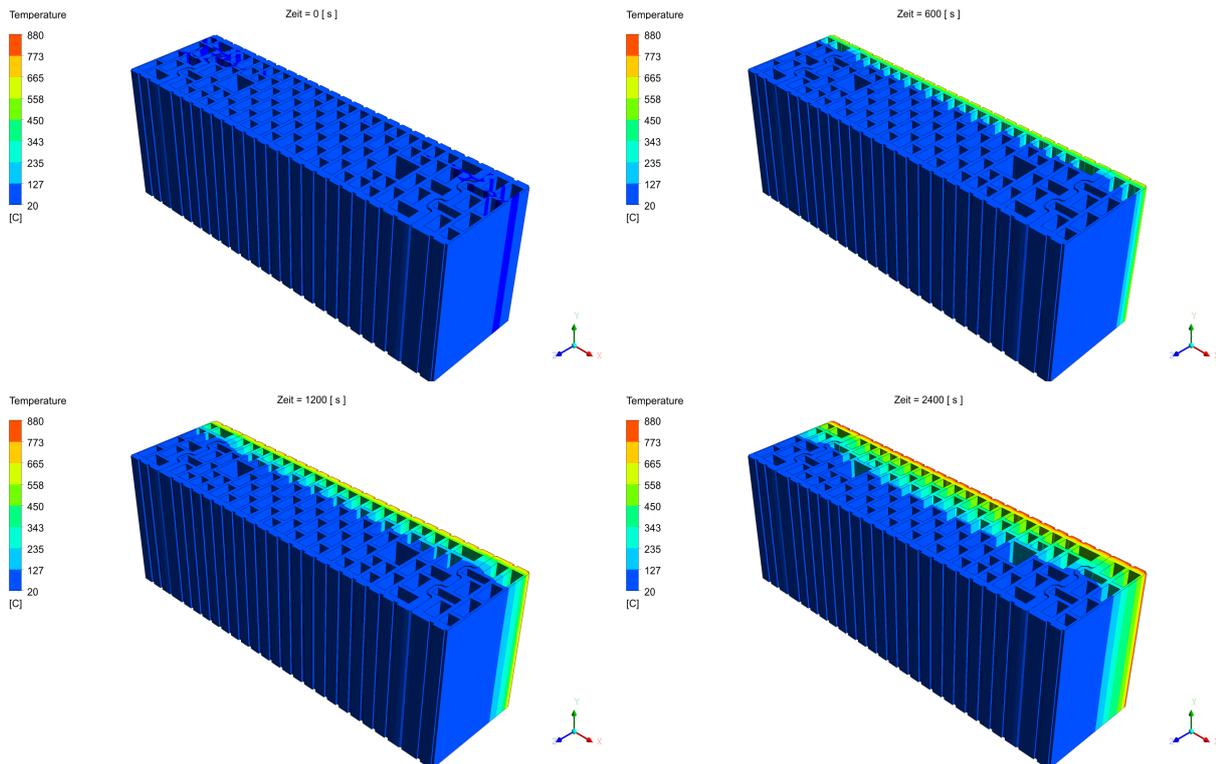


Abbildung 6.1: Temperaturfeld zu Beginn, nach 10 min, 20 min, und 40 min

Mit dem Betrachtungszeitraum von nur 40 min sind Temperaturen und Verschiebungen noch deutlich entfernt von einem stationären Zustand. Genau genommen gibt es diesen nicht, da aufgrund der ETK, die ja als Randbedingung angenommen wurde, die Temperaturen in der Simulation mathematisch gesehen immer, wenn auch degressiv, steigen. Natürlich ist dies im tatsächlichen Brandversuch nicht möglich. Abbildung 6.2 dient demnach als Ergänzung. Sie stellt den stationären Zustand des Temperaturfeldes in einem Ziegel nach ca. 180 min dar, wenn die Temperatur im Ofen nach dem initialen Anstieg gemäß ETK auf 1210 °C konstant gehalten werden würde. In der Praxis werden die Versuche früher abgebrochen, da nach dem Versagen des Prüfobjekts keine weiteren Erkenntnisse mehr gewonnen werden können.

Es liegen keine Messergebnisse für die wahre Temperaturverteilung in den Ziegeln vor. Aufgrund der obigen Überlegungen und der erfolgreichen Überprüfung des Simulationsmodells anhand des Referenzmodells, wie in Kapitel 5 dargestellt, werden diese Temperaturfeldergebnisse dennoch als plausibel angesehen und in die strukturmechanische Berechnung übernommen.

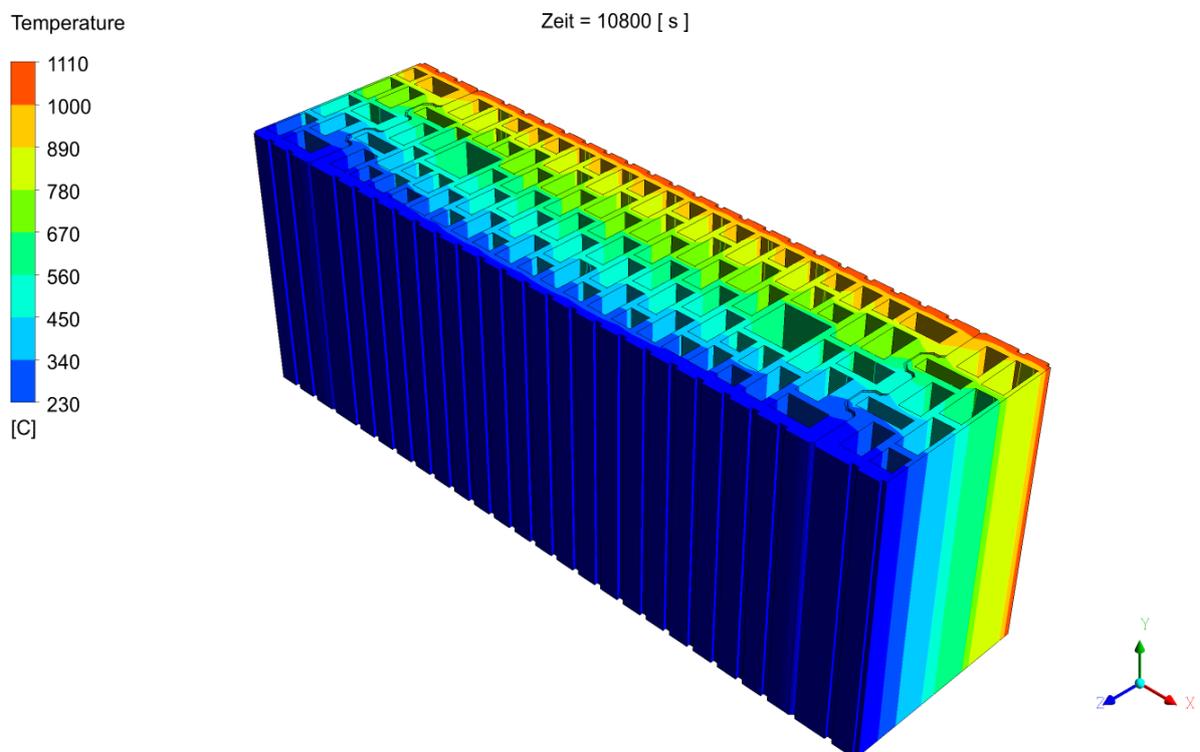


Abbildung 6.2: Stationäres Temperaturfeld nach ca. 180 min. Es wurden beidseitig noch einige Kavitäten mitsimuliert, um eine korrekte Temperaturverteilung an den Rändern zu erhalten.

## 6.2 Verformung

Nachdem das Wandtemperaturfeld als thermische Bedingung in das FEM-Modell der Wand implementiert wurde, soll nun vorab untersucht werden, welchen Einfluss Tür und Wandverformung aufeinander haben. Natürlich handelt es sich bei den vorliegenden Situationen um nicht lineare Probleme, demnach können Wand- und Türeinflüsse nicht zum Gesamtergebnis addiert werden. Dennoch lässt sich so erkennen, für welche beobachtbaren Phänomene die Wand und für welche die Tür verantwortlich ist und für welche Einbausituation welche Elemente dominieren.

Alle folgenden Ergebnisse entstanden durch Modelle in denen die Randbedingungen über elastisch gelagerte Randblöcke definiert wurden. Solver-Einstellungen, Rechenetz, Kontakte, Mörtelschichten und Hohlräume wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5 berücksichtigt.

### 6.2.1 Verformungsverhalten der kalten Wand aufgrund der Türtemperatur

Im ersten Schritt wird nur das Temperaturfeld der Tür in das FEM-Modell implementiert. Die Wand bleibt dabei noch ohne eigenes Temperaturfeld. Abbildung 6.3 zeigt das dadurch erhaltene Simulationsergebnis. Deutlich erkennbar ist, dass die Wand in einem beachtlichen Ausmaß von der sich verformenden Tür nach innen gezogen wird. Die maximale Verformung ergibt sich dabei ca. auf halber Türhöhe und liegt bei ca. 22 mm. Linksseitig (von außen betrachtet) sind die Verschiebungen etwas größer, was sich durch die an dieser Seite verstärkte Verbindung zwischen Tür und Zarge erklären lässt. Neben den beiden Scharnieren gibt es auf dieser Seite drei Sicherungsbolzen, die eine Spaltbildung verhindern sollen. So wird die Wand auf der linken Seite stärker belastet. Auf der rechten Seite hingegen ist das Schloss die einzige Verbindung mit der Zarge und die Wand wird etwas weniger verschoben.

Die Berechnungszeit beträgt ca. 20 Stunden, wobei ein großer Teil auf die Schreibvorgänge auf den externen Massenspeicher zurückzuführen ist. Auf einem anderen Rechner mit einer schnelleren Festplatte ist die Simulation nach ca. 15 Stunden beendet. Gegebenenfalls kann sich die Simulationszeit durch auftretende Bisektionen<sup>3</sup> deutlich verlängern.

### 6.2.2 Verformungsverhalten der heißen Wand ohne Tür

Im zweiten Schritt wird die Tür aus dem Simulationsmodell herausgenommen und nur die Wandverformung aufgrund des der Wand eigenen Temperaturfeldes betrachtet. Selbstverständlich wird die Systemsteifigkeit aufgrund der entfernten Türgeometrie verändert. Diese Vorgehensweise dient der Abschätzung von allgemeinen Tendenzen. Abbildung 6.4 zeigt das dazugehörige Simulationsergebnis. Eine Wand mit einer Öffnung in Türgröße würde sich demnach im Bereich über dem Türsturz am stärksten verformen. Das Verformungsbild wäre im Unterschied zu

---

<sup>3</sup>Lösungsversuch im iterativen Verfahren mit einer geringer skalierten Last, hier Temperatur; wird notwendig z. B. beim Auftreten von Kontakt zwischen Tür und Zarge; führt zu einer erhöhten Anzahl notwendiger Iterationen

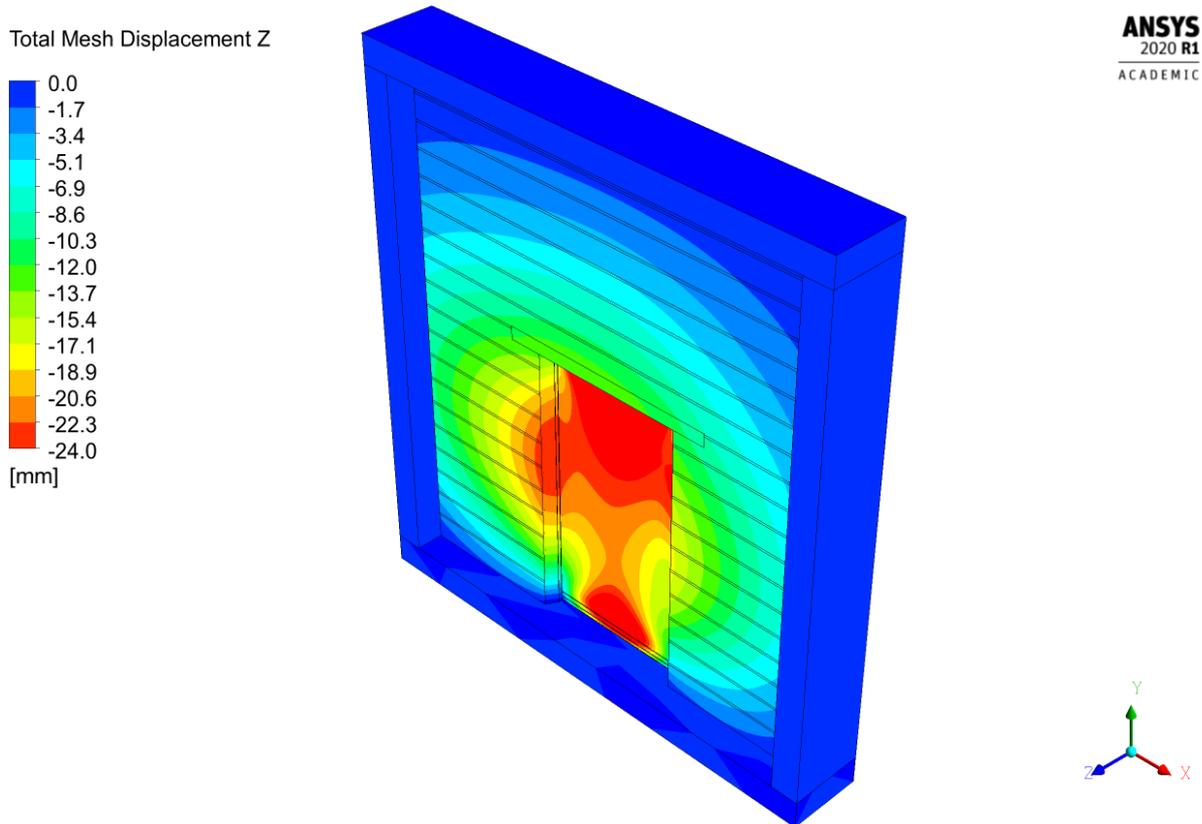


Abbildung 6.3: Simulationsergebnis für die Verformung einer kalten Wand durch die mechanische Last der Tür (30 min)

Unterabschnitt 6.2.1 grundsätzlich symmetrisch. Jedoch verhindert die beobachtete Asymmetrie aufgrund des Türverhaltens eine Ausnutzung der Symmetrie für die Modellbildung und damit eine Verkürzung der Berechnungszeit. Das Rechenetz ist aufgrund der entfernten Türe deutlich kleiner, damit auch die Rechenzeit. Jene beträgt für dieses Modell nur noch um 5 Stunden. Es lässt sich also sagen, dass ein Großteil der Berechnungszeit auf die Berücksichtigung der komplizierten Türgeometrie zurückzuführen ist. Gerade der Kontakt zwischen Tür und Zarge entfällt, wodurch die Simulation ohne Bisektionen und damit mit einer geringeren Anzahl von Iterationen auskommt.

Die Ergebnisse der getrennten Simulationen von Wand- und Türtemperaturfeld legen bereits nahe, dass für die Einbausituation mit Tür mittig eher die mechanische Last der Türe ausschlaggebend ist.

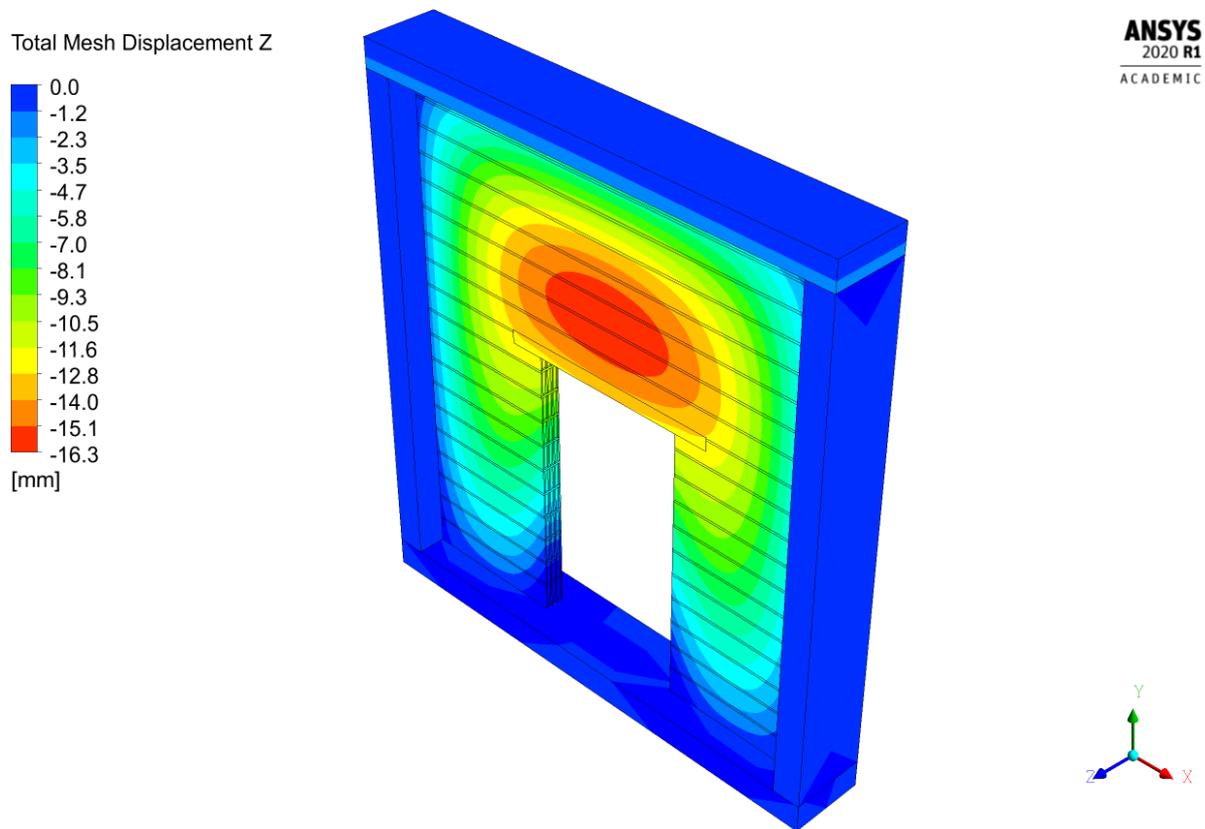


Abbildung 6.4: Simulationsergebnis für die Verformung einer heißen Wand ohne Türe (30 min)

### 6.2.3 Kombination von Wand- und Türtemperaturfeld

Im letzten Schritt erfolgt die Kombination von Wand- und Türeinfluss zum Gesamtsimulationsergebnis für die Ziegelwand mit mittig eingebauter Tür. Die maximale Verformung verschiebt sich durch den Wandeinfluss etwas nach oben, jedoch bleiben die Verschiebungen an der Oberkante der Tür geringer gegenüber jenen auf halber Türhöhe.

Abbildung 6.5 ist eine schematische Darstellung von simulierten und gemessenen Wandverschiebungen unter Einfluss von Wand- und Türtemperaturfeldern nach 30 min. Die dazugehörigen Werte wurden den entsprechenden Punkten im Konturplot gemäß Abbildung 6.7 entnommen. Man muss an dieser Stelle festhalten, dass die Zahlenwerte der Verformungen mit der Simulation wesentlich überschätzt werden. Abbildung 6.6 stellt zusammenfassend die deutlichen Unterschiede zwischen Berechnung und Messung dar (Beträge der Verschiebungen).

Durch Betrachten von Abbildung 6.5 kommt man zum Schluss, dass die Wandverformung im Simulationsmodell scheinbar übergewichtet wird<sup>4</sup>. Die bereits gut mit den Messwerten übereinstimmenden Simulationsergebnisse unter Vernachlässigung der Wandverformung legen nahe, dass die Wand oder ihre Randbedingung zu weich abgebildet werden. Von einer Erhöhung der Elastizitätswerte des gebrannten Tons ist abzusehen. Dadurch würde zwar die Wand weniger durch den Einfluss der Tür verschoben, gleichzeitig würde die Wandverformungen aufgrund Wandtemperatur aber dominieren. Es ist erkennbar, dass die Modellierung komplexer ist, als man zunächst annehmen würde. Mit veränderten Eingabedaten, vor allem jenen der Einspannung und der Temperaturexpansionskoeffizienten, käme man näher an das reale Verformungsbild heran.

Die Ursache dieses Sachverhaltes könnte auch darin begründet liegen, dass die thermische Ausdehnung der Ziegel nicht zu einer Verschiebung zum Feuer hin führt, sondern nur zu einer Verspannung der Wand unter den Ziegeln. Bei Vorsimulationen mit fix eingespannten Rändern konnte beobachtet werden, dass eine Deformation zum Feuer hin zwar stattfindet, aber viel geringer ausfällt als bei Versuchen mit einer elastisch gelagerten oder sogar freien Wand.

Mit anderen Worten bedeutet dies, dass die Verformung der Wände nicht nur von den zeitlich veränderlichen Temperaturfeldern in der Wand und im Prüfkörper und den Randbedingungen abhängt, sondern darüber hinaus auch vom Ausgangszustand (Einspannung und Anordnung der Ziegel im Versuch).

Zumindest konnten durch das vorliegende Modell die Rangordnungen von Verschiebungen in den interessanten Messpunkten nachgebildet werden. Darunter fallen z. B. die stärkere Verformung auf der linken Seite und der Ort der maximalen Deformation.

Abbildung 6.8 erweitert den Betrachtungsrahmen um die zeitliche Dimension. Offensichtlich ist die Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Werten auch in der zeitabhängigen Darstellung nicht beeindruckend, dennoch erkennt man ein Korrelieren der Trends. Die Messwerte wurden entsprechend Abbildung 4.2 geglättet, somit kann es leichte Abweichungen gegenüber den Balkendiagrammen geben, in denen die tatsächlichen, momentanen Verschiebungswerte verglichen werden.

<sup>4</sup>zu große Verschiebung oben in den Messpunkten A, C, und F - entspricht dem Verformungsbild bei heißer Wand ohne Tür, vgl. Abbildung 6.4

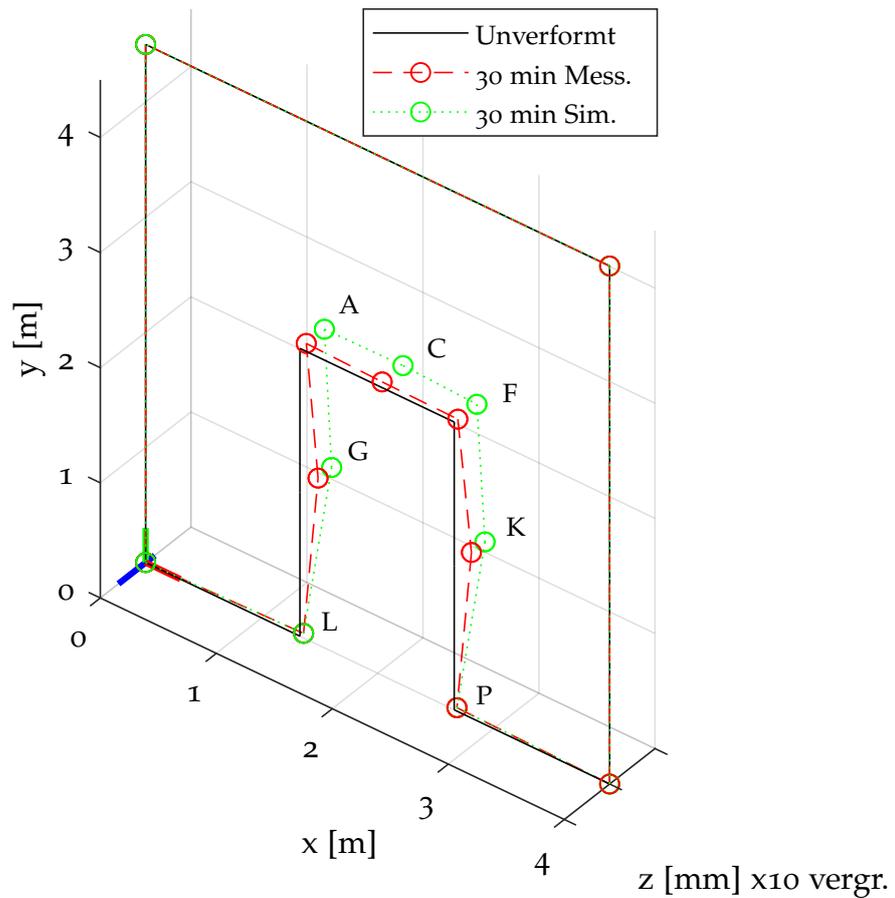


Abbildung 6.5: Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür mittig im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

Der Sprung auf ca. -2,5 mm, welcher gleich zu Beginn in allen der folgenden zeitabhängigen Simulationsergebnisse zu sehen ist, ist hauptsächlich auf die ungenaue Regression des Temperaturfeldes zurückzuführen. Die Abbildung 5.8 zeigt die anfangs noch stark abweichenden Werte der mathematischen Näherung für das Temperaturfeld. Dadurch ergibt sich selbst zum Zeitpunkt  $\tau = 0$  schon eine Verformung, die in der Realität nicht vorhanden ist. Im späteren Verlauf, bis 40 Minuten nach Versuchsstart, wird die Übereinstimmung besser, somit sollten die Verschiebungsergebnisse im weiteren Simulationsverlauf weniger stark durch diesen Fehler beeinflusst sein. Das Problem bei der Regression des Temperaturfeldes sind die großen Gradienten sowohl in der z- als auch in der Zeitrichtung. Dadurch können die erhaltenen Polynome das Temperaturfeld vor allem zu Beginn unzureichend annähern.

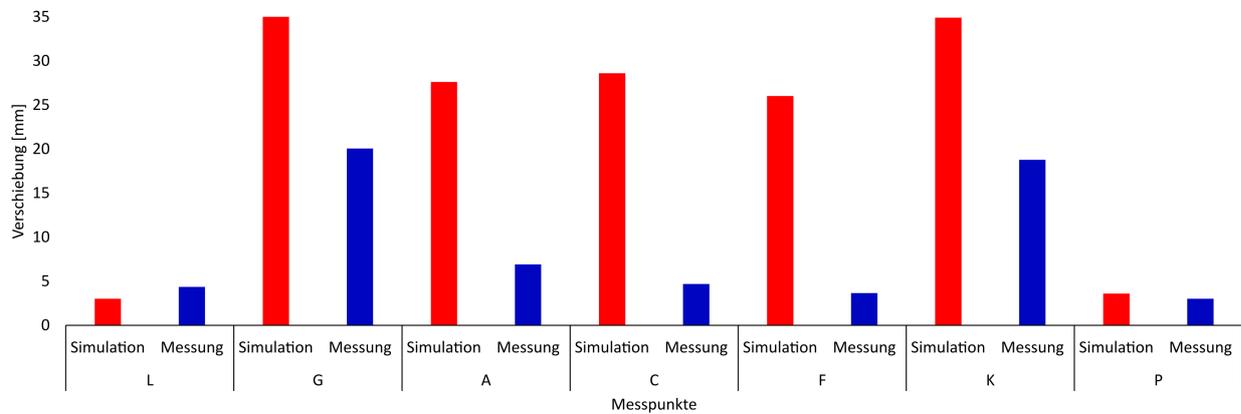


Abbildung 6.6: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür mitte) nach 30 min

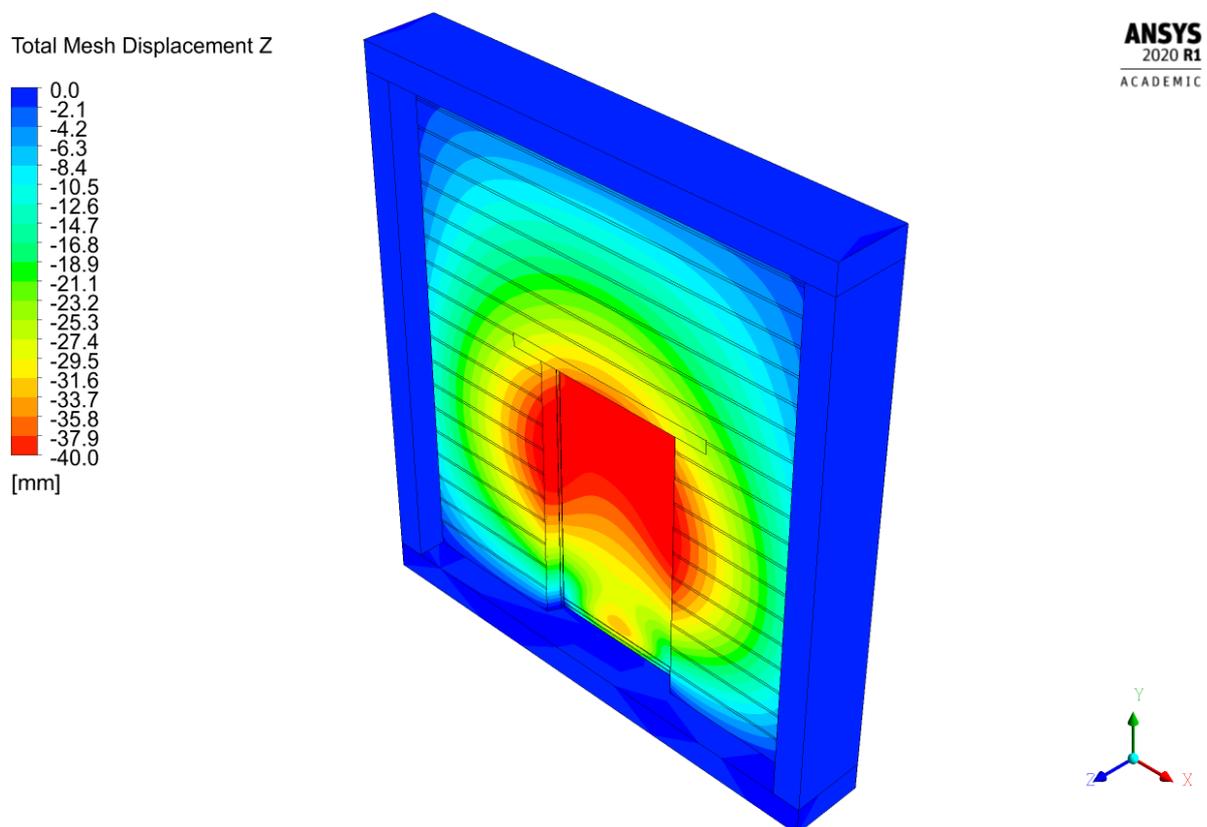


Abbildung 6.7: Konturplot der Verschiebung nach 30 min, mit Wand- und Türtemperatur berücksichtigt.

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

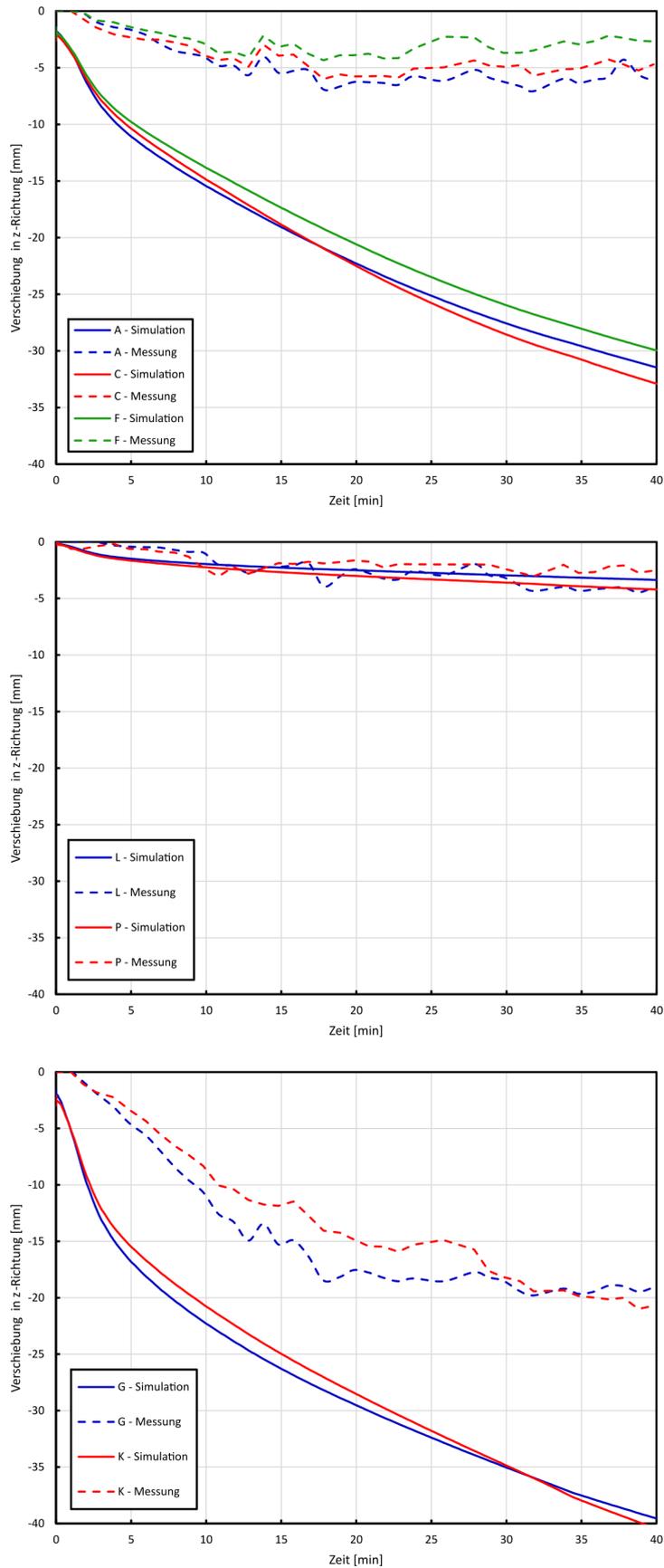


Abbildung 6.8: Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür mittig im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)

## 6.3 Weitere Anwendungsfälle des Ziegelwandmodells

Mit dem Bewusstsein, dass es sich bei den vorliegenden Problemen um stark stoffwert- und randbedingungsabhängige Simulationen handelt, soll das Modell dennoch anhand der Wände mit links- und rechtsseitig eingebauter Tür getestet werden. Die Stoffwerte und Randbedingungen selbst bleiben unverändert.

### 6.3.1 Ziegelwand mit Tür links

Wendet man das Simulationsmodell auf die Ziegelwand mit links verbauter Tür an, so erkennt man eine bessere Übereinstimmung mit den Messergebnissen als bei der Wand mit mittig eingebauter Tür.

Abbildung 6.9 ist eine schematische Gegenüberstellung der Messdaten mit den Simulationsergebnissen. Abbildung 6.11 ist der Konturplot der Verformung. In den Messpunkten A, C und F gibt es bereits eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Auch der Punkt der maximalen Verformung aller Messpunkte wird durch das Simulationsmodell richtigerweise im Messpunkt K identifiziert. An den Rändern ist die Übereinstimmung mit den Messungen schlechter. Im Punkt G überschätzt das Simulationsmodell die Verschiebung fast um das Doppelte. Genauso wird am Boden eine Deformation des Punktes P zum Feuer hin nicht korrekt abgebildet. Eine Zusammenstellung aller Auswertepunkte im Vergleich mit den Messergebnissen erfolgt mit Abbildung 6.10.

Abbildung 6.12 zeigt den zeitlichen Trend der Verformungen, sowohl für die Messdaten als auch für die Berechnungsergebnisse. Der Trend selbst ist überall auf der Wand zufriedenstellend abgebildet.

Es gibt im zeitlichen Verlauf der gemessenen Verschiebungen einen interessanten Knick. Ab Minute 12 scheint die Verformung schneller voranzuzugehen. Dieser Effekt ist nur bei der Ziegelwand mit links verbauter Tür stark ausgeprägt, allerdings sind auch in den entsprechenden Abbildungen für die Wand mit mittig und rechts montierter Tür schwächere Knicke erkennbar. Einer von zwei Erklärungsversuche wäre der durch Wasserdampf<sup>5</sup> verzögerte Wärmetransport in der Wand. Ein anderer Erklärungsansatz wäre das Schließen von kleinen Zwischenräumen zwischen den Ziegeln, die initial vorhanden sein könnten. Keiner der genannten Effekte wird durch die Simulation abgebildet, ist deshalb in den simulierten Verläufen nicht zu finden.

---

<sup>5</sup>Wasserdampf, der vorwiegend beim Erhitzen des Mörtels aus diesem austritt, an kalten Stellen kondensiert und später wieder verdampft. Besonders in den Leichtbauwandkonstruktionen hat ein ähnlicher Effekt große Einflüsse.

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

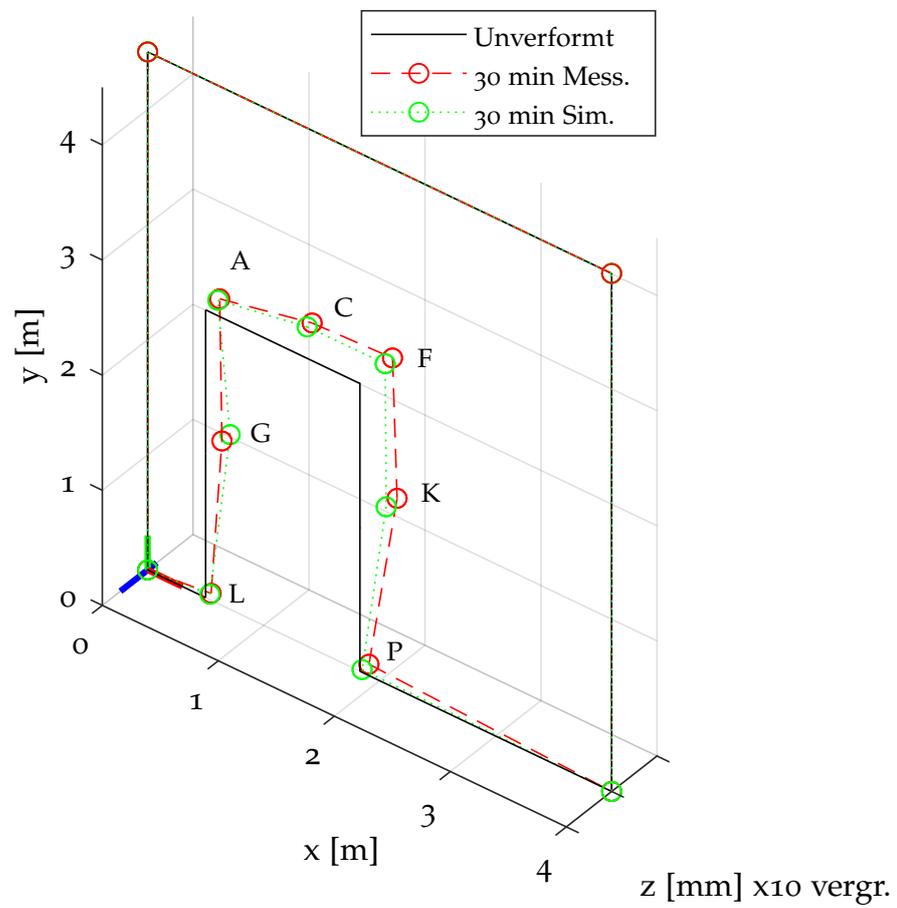


Abbildung 6.9: Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür links im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

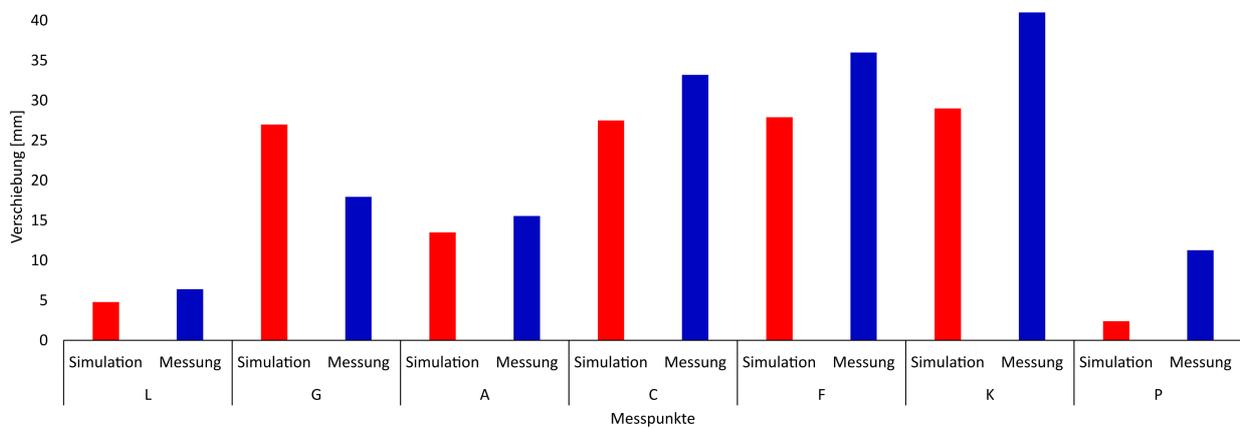


Abbildung 6.10: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür links) nach 30 min

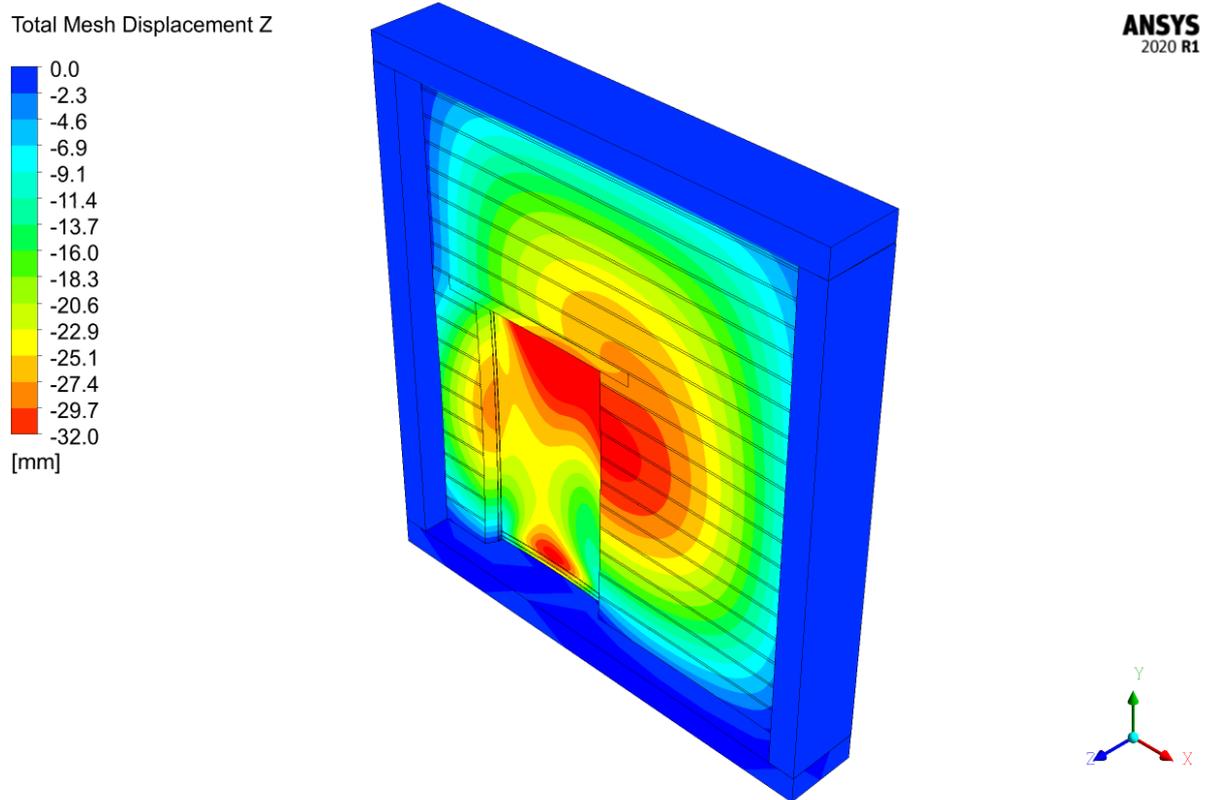


Abbildung 6.11: Konturplot der Verschiebung der Ziegelwand mit links eingebauter Tür nach 30 min

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

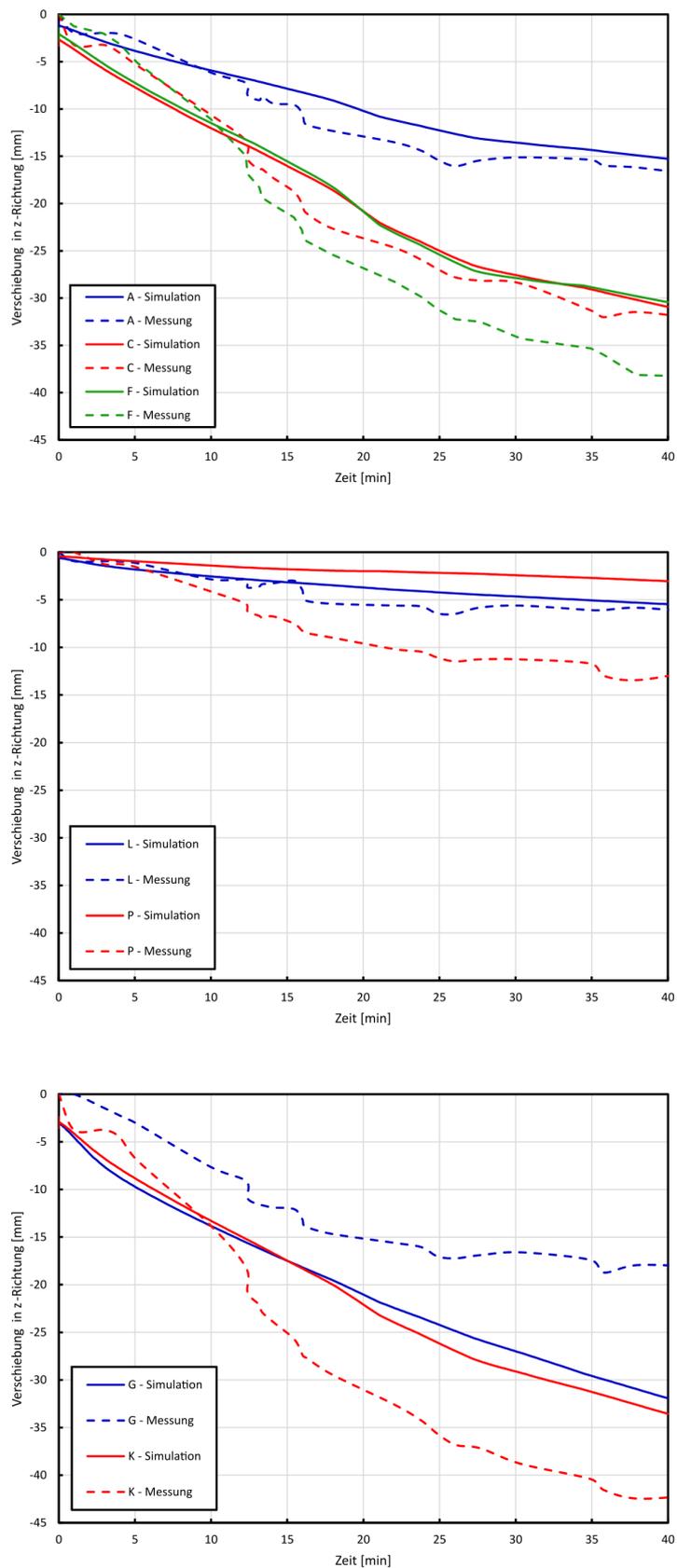


Abbildung 6.12: Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür links im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)

### 6.3.2 Ziegelwand mit Tür rechts

Ein weiterer Anwendungsfall des Simulationsmodells ist die Ziegelwand mit rechts montierter Tür. Wieder ist das Ergebnis deutlich besser als bei der Wand mit mittig eingebautem Prüfobjekt. Abbildung 6.13 stellt wiederum Simulations- und Messdaten schematisch gegenüber. Man erkennt eine erfreuliche qualitative Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die Messpunkte A, C, und F werden bezüglich ihrer Relationen gut abgebildet. Der Messpunkt mit der größten Verformung wird hier als der Punkt A berechnet, wogegen es in der Messung im Punkt G zur bedeutendsten Verschiebung kam. Der Unterschied ist allerdings mit ca. 4 mm sehr gering.

Wie auch schon bei der Wand mit linksseitiger Tür wird der Rand unzulänglich abgebildet. So ist die simulierte Verschiebung zum Feuer hin im Punkt K deutlich zu groß. Im Punkt L hingegen wird durch das Modell eine zu geringe Verformung berechnet. Prinzipiell würde die Randbedingung eine Deformation des Punktes L zum Feuer hin zulassen, jedoch scheint der Kontaktdruck dort zu groß zu werden, weshalb die Reibkraft zu stark wird und der Punkt L sich nicht realitätsgetreu verschiebt. Im Punkt K funktioniert zwar die reibungsbehaftete Verschiebung, allerdings bietet der Rand hier zu wenig Widerstand. Alternativ wäre die zu große berechnete Verschiebung im Punkt K durch niedrigere Temperaturen in diesem Wandabschnitt zu erklären. Dennoch spricht all dies dafür, dass qualitative Verbesserungen des Simulationsmodells vor allem noch bei den Kontakten mit dem Stahlrahmen möglich sind. Die elastische Lagerung der Randblöcke und ihr reibungsbehafteter Kontakt mit den Ziegeln sind allerdings eine deutliche Verbesserung gegenüber beispielsweise einer fixen Einspannung an den Rändern. Eine Übersicht der Simulations- und Messergebnisse in den Auswertepunkten sei mit Abbildung 6.14 in Form eines Balkendiagramms gegeben. Der dazugehörige Konturplot ist in Abbildung 6.15 dargestellt.

Im zeitlichen Trend erscheinen die Ergebnisse der Simulation sogar noch etwas erfreulicher als jene der Wand mit links eingebauter Tür. Wieder zeigen verständlicherweise nur die Punkte mit guter Endwertübereinstimmung eine schöne Korrelation mit den gemessenen Verläufen, wie durch Betrachtung von Abbildung 6.16 klar wird.

## 6.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich folgendes festhalten: Die Ziegelwände mit Tür links und mit Tür rechts wurden sehr gut numerisch nachgebildet, wohingegen das Modell der Ziegelwand mit Tür in der Mitte hinsichtlich seiner Simulationsergebnisse starke Abweichungen in Form von zu großen Verformungen zeigt. Dabei waren die Stoffdaten und Randbedingungen sowie die Netzgröße grundsätzlich immer dieselben.

Aus diesem Grund erfolgt im nächsten Schritt eine Korrektur der elastischen Einspannung. Die zugrundeliegende Annahme ist dabei, dass eine steifere Randbedingung zu geringeren Verformungen führt.

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

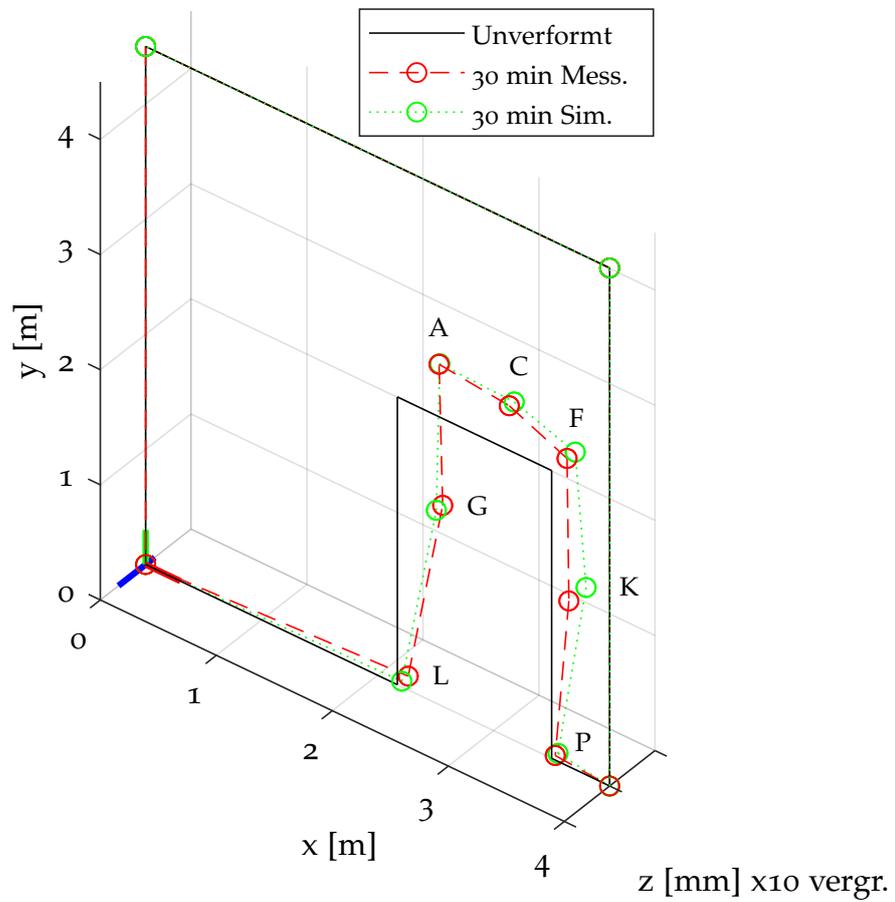


Abbildung 6.13: Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür rechts im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

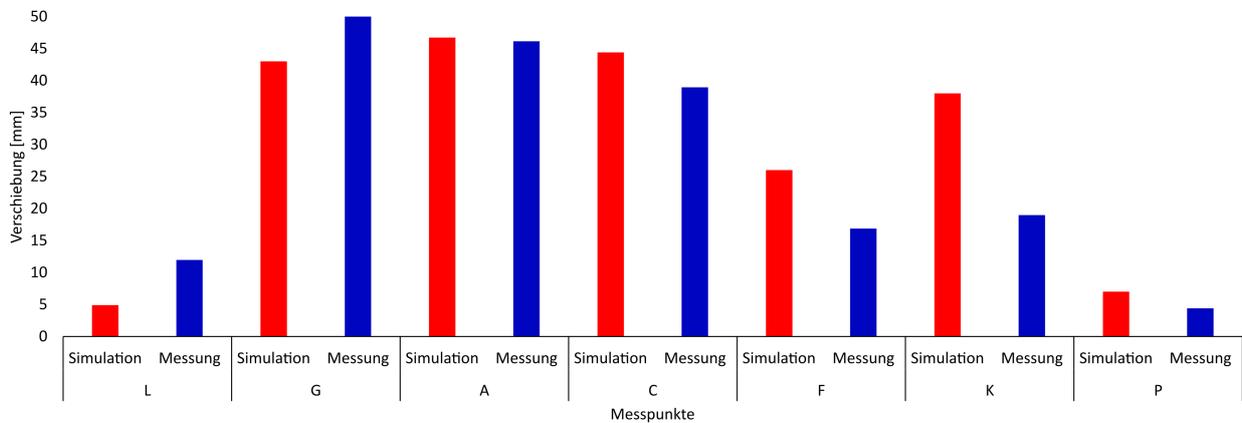


Abbildung 6.14: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür rechts) nach 30 min

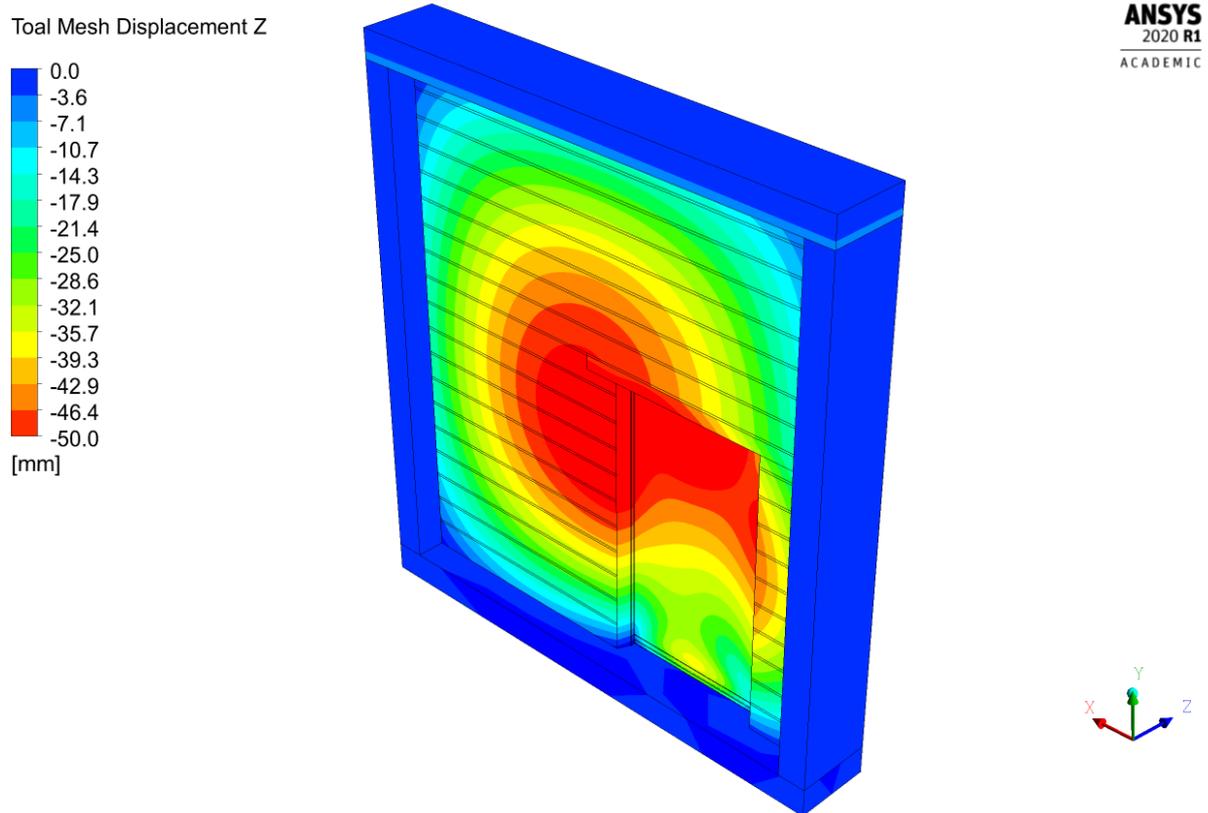


Abbildung 6.15: Konturplot der Verschiebung der Ziegelwand mit rechts eingebauter Tür nach 30 min

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

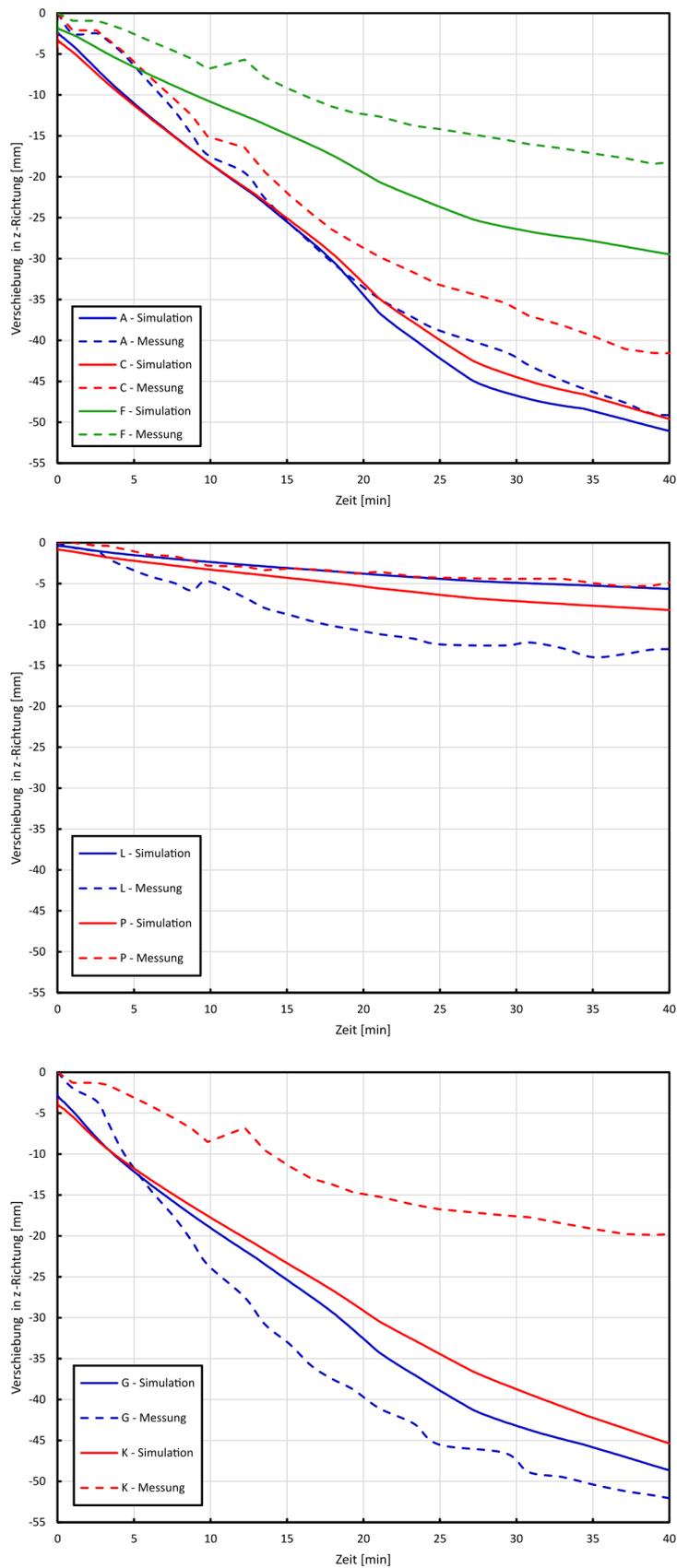


Abbildung 6.16: Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür rechts im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)

## 6.5 Korrektur der Rahmensteifigkeit für die Ziegelwand mit Tür mittig

Die zu hohen Simulationsergebnisse legen die Wiederholung der Simulation mit einem steiferen Rahmen nahe. Mit einer Erhöhung der elastischen Einspannung an den Rändern kann dies nachgebildet werden. Die Simulation mit der Tür in der Mitte wurde noch einmal mit erhöhten Werten der elastischen Einspannung wiederholt. Der ursprünglich gefundene Wert von  $0,05 \text{ N/mm}^3$  wird durch die im Vergleich sehr steife Lagerung von  $10 \text{ N/mm}^3$  ersetzt.

In der schematischen Auswertung gemäß Abbildung 6.17 verbessert sich die Annäherung an die Messergebnisse deutlich, weil sich in den Messpunkten A,C und F eine viel geringere Verschiebung einstellt. Auf halber Türhöhe, wo die maximale Verformung gemessen wurde, bleibt nur eine Abweichung von 1-2 mm übrig. Auf einen zusätzlichen Konturplot wird an dieser Stelle verzichtet, er entspricht optisch größtenteils jenem in Abbildung 6.3, obwohl die Simulation eine andere ist. Die gewohnte Darstellung von Simulations- und Messergebnissen erfolgt wieder mit dem Balkendiagramm in Abbildung 6.18.

Dementsprechend verbessern sich die zeitlichen Trends erheblich. In Abbildung 6.19 erkennt man zumindest für die Punkte mit den größten Verformungen eine bessere Übereinstimmung sowohl im Trend als auch in der Größenordnung der Deformationen.

Übrig bleibt, dass die Verschiebungen in den Messpunkten A, C und F leicht überschätzt werden. Der initiale Sprung in den Simulationsergebnissen beeinträchtigt ebenso die Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

## 6 Simulationsergebnisse der Ziegelwandverformung

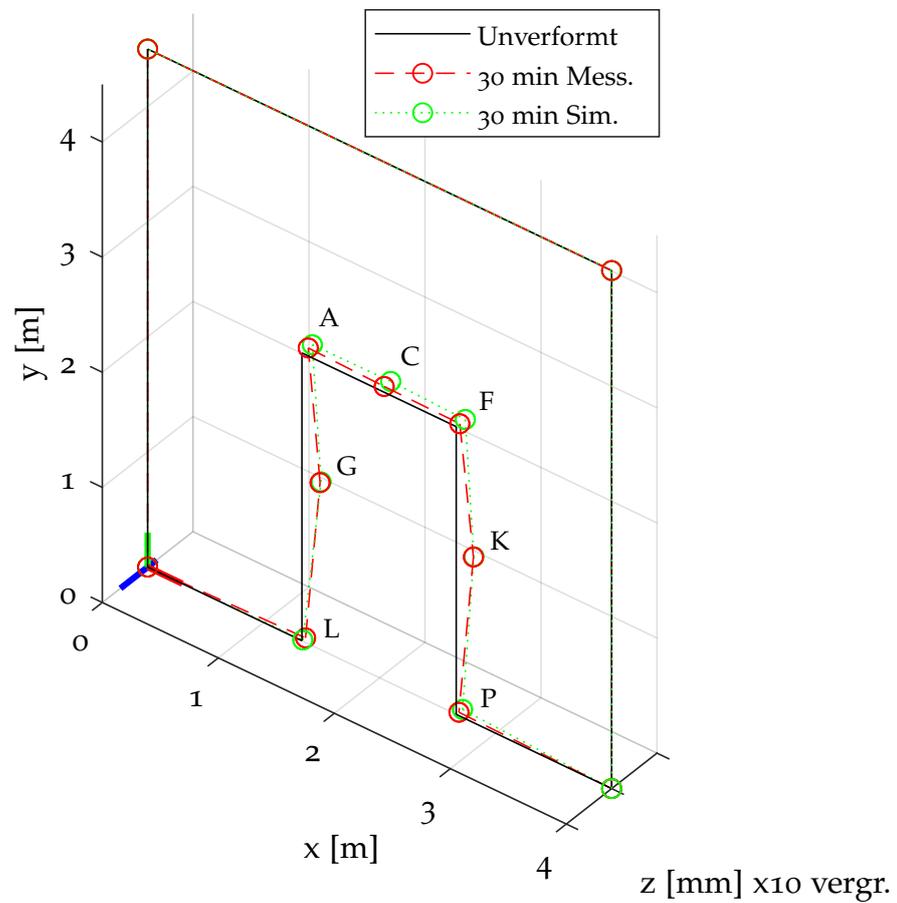


Abbildung 6.17: Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür mittig bei Annahme einer steiferen Einspannung (schematisch) nach 30 min

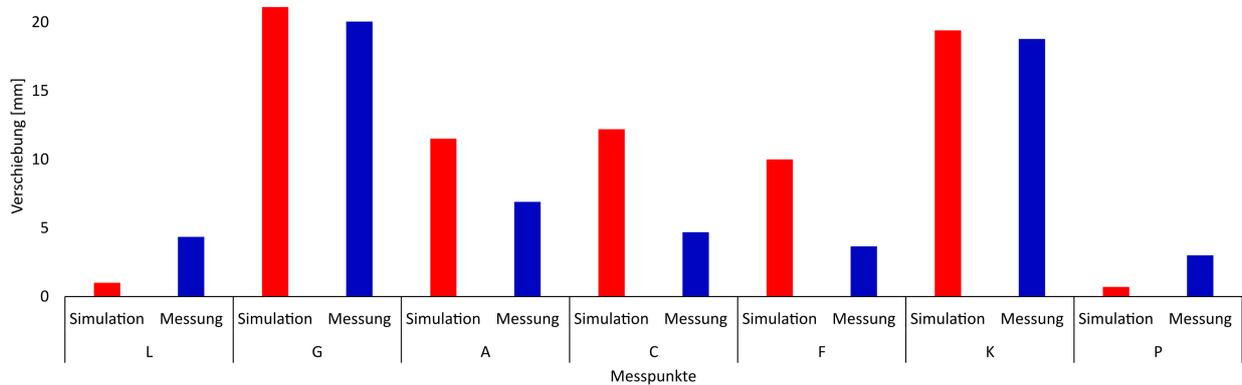


Abbildung 6.18: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür mittig, steiferer Rahmen) nach 30 min

## 6.5 Korrektur der Rahmensteifigkeit für die Ziegelwand mit Tür mittig

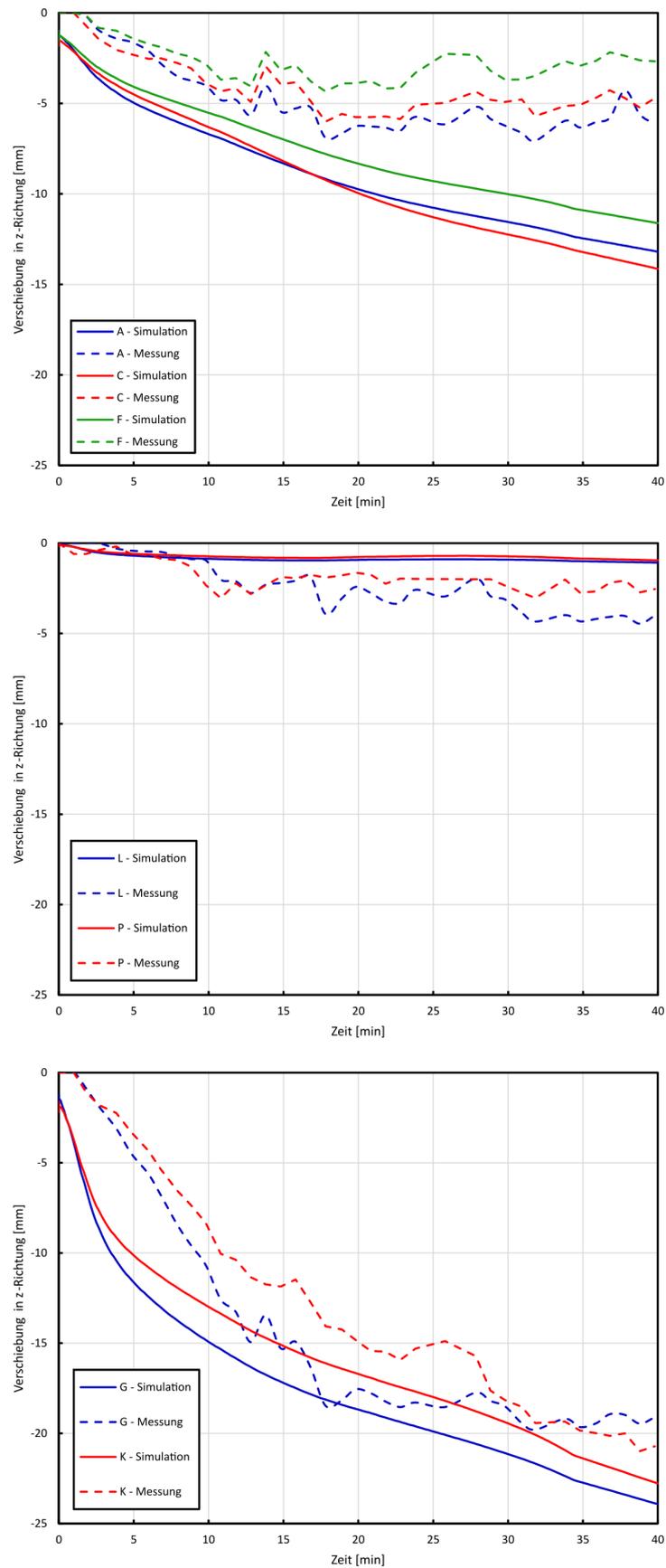


Abbildung 6.19: Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür mittig bei steiferer Einspannung im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)



# 7 Simulationsergebnisse der Leichtbauwandverformung

Auf den folgenden Seiten werden die Berechnungsergebnisse des Leichtbauwandmodells zusammengefasst und mit den Messergebnissen der realen Feuerwiderstandsprüfungen gegenübergestellt. Wie schon bei der Ziegelwand wird zunächst auf die Temperaturfeldberechnung eingegangen und anschließend die daraus folgenden Verformungsergebnisse diskutiert.

## 7.1 Wärmetransport durch die Leichtbauwand

Zunächst wurden die Temperaturfelder in der Leichtbauwand - wie auch bei der Ziegelwand - durch eine Wärmeleitungssimulation mit Konvektions- und Strahlungsrandbedingungen berechnet. Die Strahlung in den Hohlräumen entfällt hier, da die Zwischenräume mit Mineralwolle ausgefüllt wurden. Was für die Ziegelwand gut funktioniert hat, führte bei der Leichtbaukonstruktion allerdings zu viel zu hohen Temperaturen, weil die Gipsreaktionen und der dadurch entstehende Wasserdampf-beeinflusste Wärmetransport nicht berücksichtigt wurden (siehe Kapitel 5).

Durch die zu hohen berechneten Temperaturen wurden auch die Verformungsergebnisse zu groß. Die Verschiebungen wurden von dem FEM-Modell um den Faktor 2-3 größer berechnet als die gemessenen Werte. Deshalb wurde das Temperaturfeld in der Wand alternativ mit Temperaturmessdaten einer Studie von Prieler [33] als Randbedingung berechnet.

Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, ergibt sich ein Temperaturgefälle zwischen ca. 119 °C an der dem Feuer zugewandten Seite (folgt aus Randbedingung) und ca. 49 °C an der abgewandten Seite. Im unteren Abschnitt sind die minimalen Temperaturen etwas niedriger, da innerhalb des Türrahmens ein stärkerer Wärmeabtransport durch Abstrahlung und Konvektion erfolgt als im Inneren der Wand. Die Temperaturfelder in den Stahlprofilen sind die Hauptursache für die folgend beschriebenen Verformungen.

## 7.2 Verformung

Wie auch bei der Ziegelwand wird zunächst der Einfluss der Tür als mechanische Last und die Wirkung des Wandtemperaturfeldes getrennt betrachtet. Randbedingungen und Kontakte wurden in Kapitel 5 beschrieben.



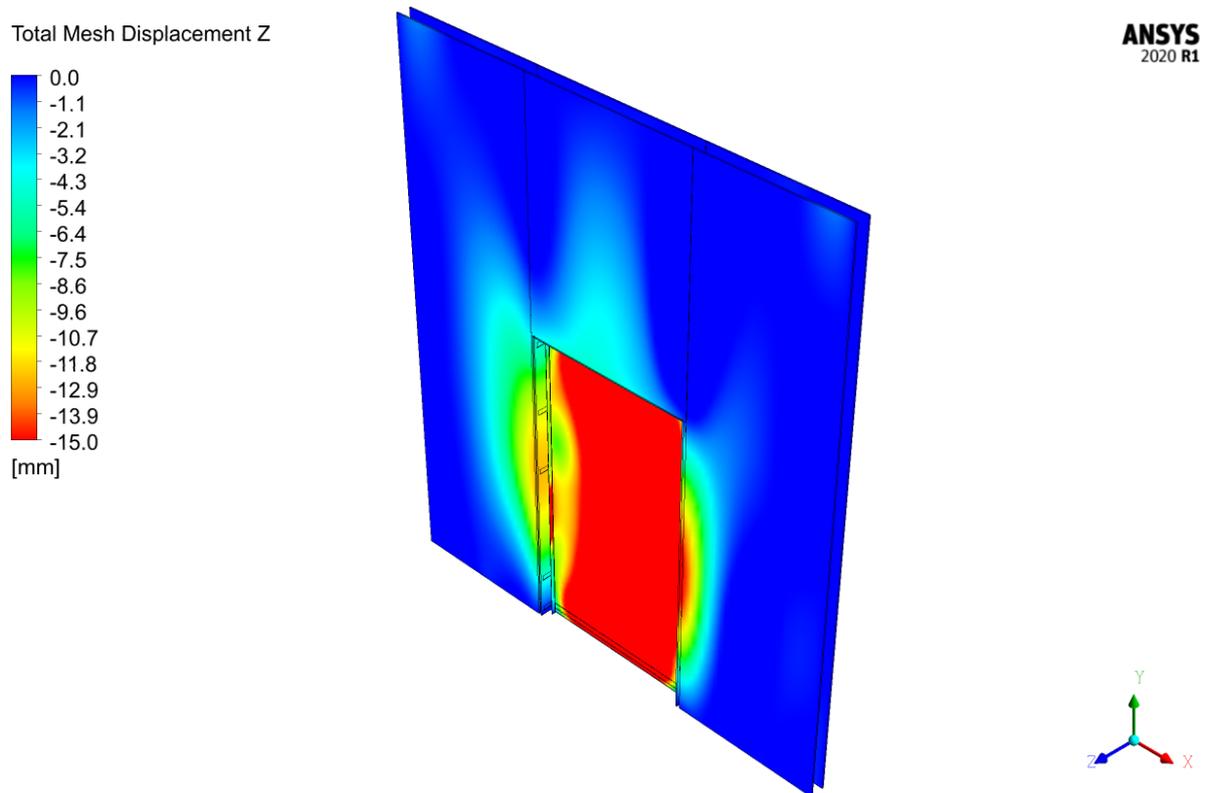


Abbildung 7.2: Simulationsergebnis für die Verformung einer kalten Leichtbauwand durch die mechanische Last der Türe (30min)

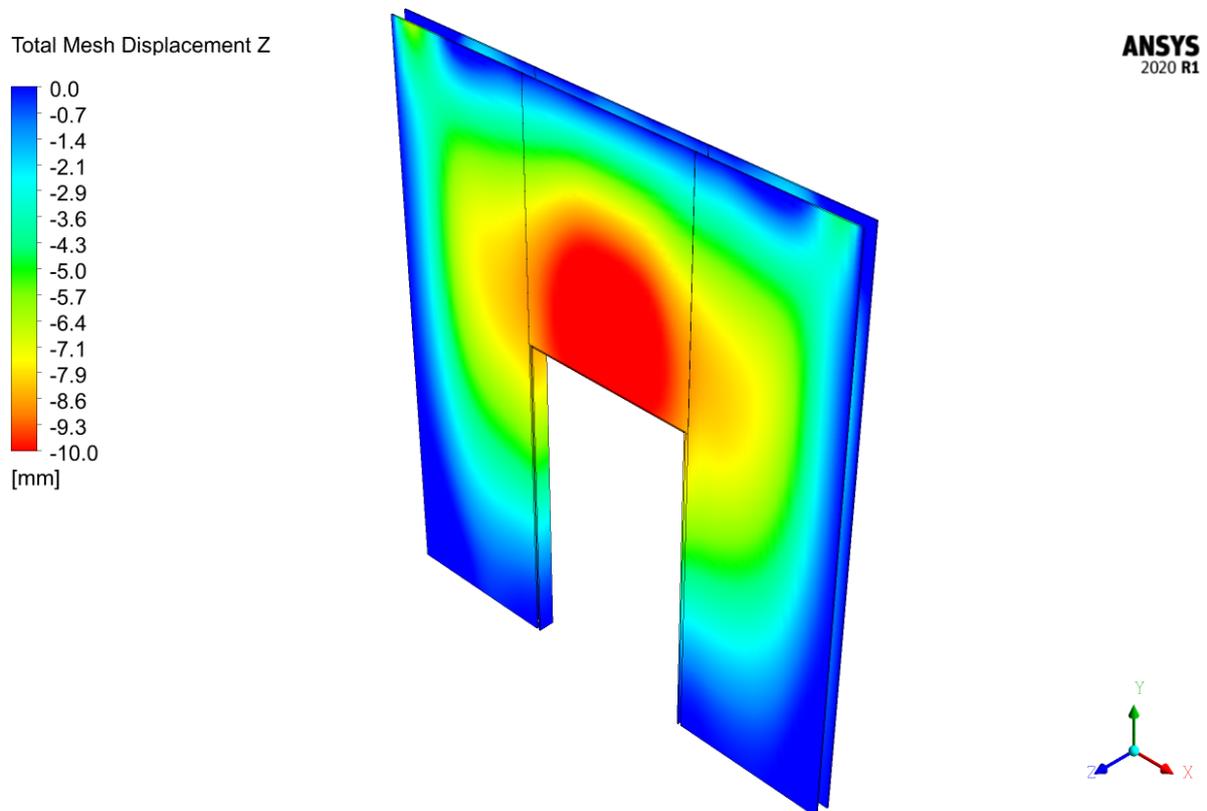


Abbildung 7.3: Simulationsergebnis für die Verformung einer heißen Leichtbauwand ohne Tür (30min)

### 7.2.3 Kombination von Wand- und Türtemperaturfeld

Nach dem Import des oben beschriebenen Temperaturfeldes in das FEM-Modell für die Verformung, erhält man folgende Simulationsergebnisse. Abbildung 7.4 zeigt die schematische Gegenüberstellung der Simulations- mit den Messergebnissen nach einer Zeit von 30 min. Es werden sowohl qualitativ als auch quantitativ realistische Berechnungsergebnisse erzielt.

Durch die Simulation wird die Tatsache, dass die Verformungen auf halber Türhöhe (Messpunkte J, P) ähnlich groß sind wie an der Türoberkante (Messpunkte (A, D, I) gut abgebildet. Der Messpunkt P zeigt ein zu hohes Verformungsergebnis im Vergleich mit der Messung, dafür wird die Deformation im Punkt I leicht unterschätzt.

Eine mögliche Erklärung für diese Tatsache ist die Türmodellierung. Das Schloss wirkt hier auf das UA-Profil als Einzellast, wodurch das Profil eine S-förmige Durchbiegung in z-Richtung erfährt. Bei längerer Simulationszeit bildet sich dieser Effekt zurück. Abbildung 7.5 bietet eine Zusammenstellung der Vergleiche zwischen Simulation und Messung für alle Messpunkte auf dem Türrahmen.

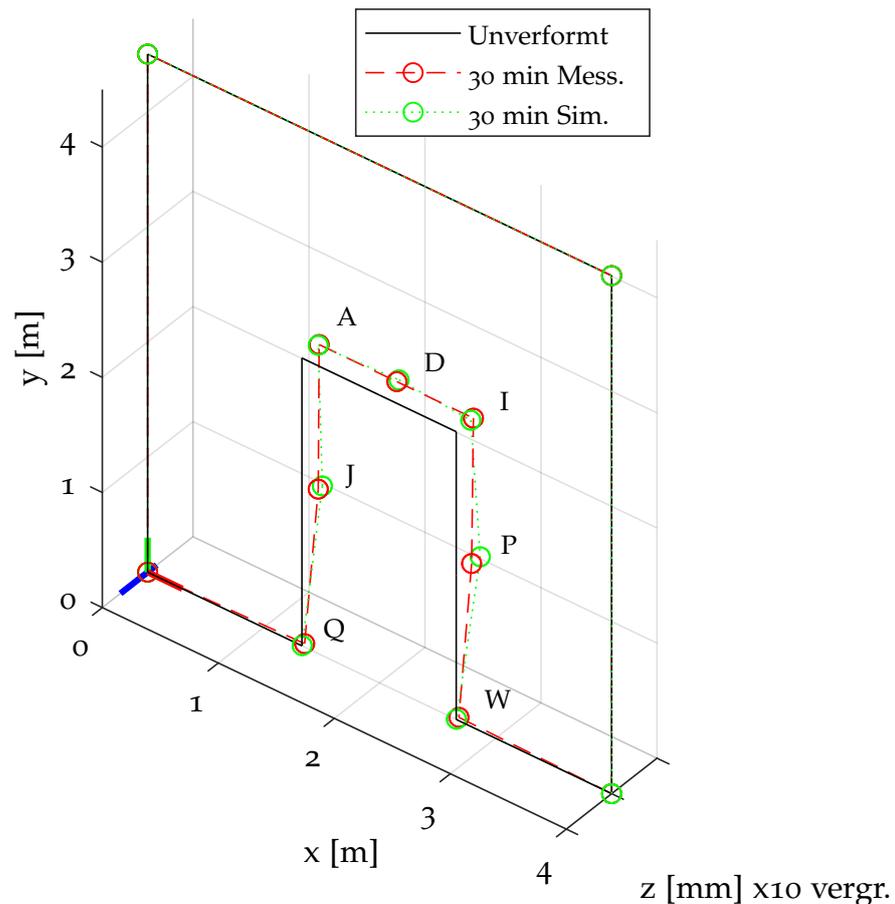


Abbildung 7.4: Simulationsergebnis für die Verformung der Leichtbauwand mit Tür mittig im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

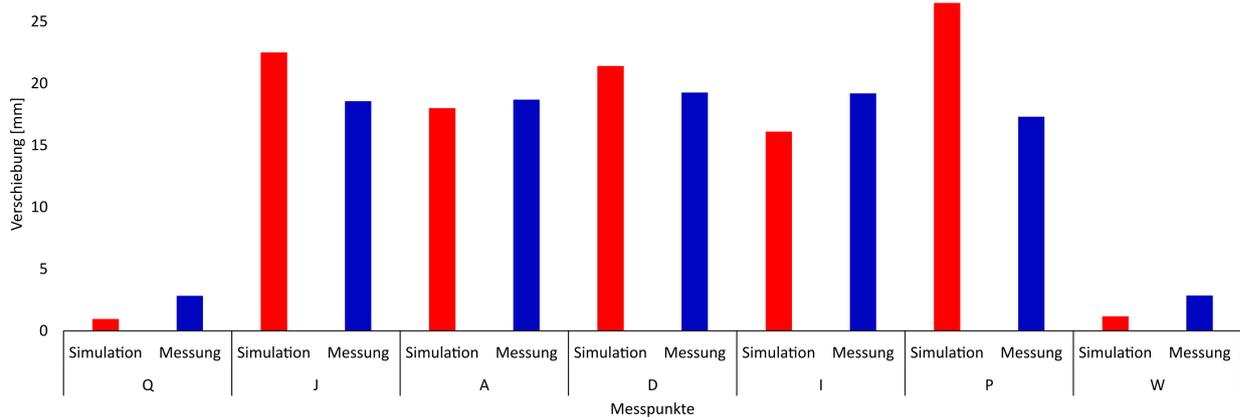


Abbildung 7.5: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür mitte) nach 30 min

Der dazugehörige Konturplot<sup>2</sup> wird in Abbildung 7.6 gezeigt. Darin erkennt man ebenfalls die Unterschiede zwischen Simulation und Messung, besonders hinsichtlich der Relationen zwischen den Messpunkten P und I. Die leichte Verformung der linken und rechten oberen Ecken der Wand nach innen erklärt sich dadurch, dass die Gipsplatten an der Oberkante nicht in z-Richtung gesperrt wurden. Dies geschah nur für die Stahlprofile, sollte aber auf das gesamte Simulationsergebnis keine signifikanten Auswirkungen haben. Die Simulationszeit beträgt bei den Leichtbauwandmodellen ca. 20 Stunden für die Verformungsberechnung und ca. 3 Stunden für den Wärmetransport.

Die Darstellung der zeitlichen Trends von Verformungs- und Messergebnis erfolgt mit Abbildung 7.7. Darin fällt im oberen Teilplot (Messpunkte A, D, I) zunächst der starke Unterschied zwischen Simulation und Messung in den ersten 5 min auf. Dieser ist ganz klar eine Folge der Nichtberücksichtigung der Kondensation auf den Stahlprofilen, wodurch deren Temperatur in der Realität viel schneller steigt als in der Berechnung. Die Messpunkte J und P (zweiter Teilplot) werden zu Beginn stark von der Türverformung mit nach innen gezogen, daher die bessere Übereinstimmung in den ersten Minuten der Simulation.

Alle Messpunkte zeigen charakteristische Haltepunkte (Plateaubildung) vor einem erneuten Anstieg der Verschiebungen im späteren Zeitbereich. Die zweite Steigerung beginnt in der Simulation bereits etwas früher (ab ca. 25 min). In der vorliegenden Abbildung ist der Anstieg der Messergebnisse noch nicht sichtbar, da er in der Realität erst ab ca. 30 min stattfindet. Im Kapitel 5 wurde zur Argumentation der Temperaturrandbedingung mit Abbildung 5.16 die Verschiebungsmessung bis 40 min dargestellt. Darin ist der zweite Anstieg auch in der Messung sichtbar. Der Grund für das frühere sekundäre Ansteigen in der Simulation ist ganz klar, dass eine andere Situation vorliegt als im Versuchsaufbau von Prieler [33], aus dessen Temperaturmessung die Randbedingung für die Wärmeleitungsberechnung übernommen wurde. Vermutlich ist in der Leichtbauwandkonstruktion die Verdampfung an den Stahlflächen der Profile erst später abgeschlossen.

<sup>2</sup>Die Profile sind als Schalelemente modelliert und können daher von CFD-Post nicht dargestellt werden.

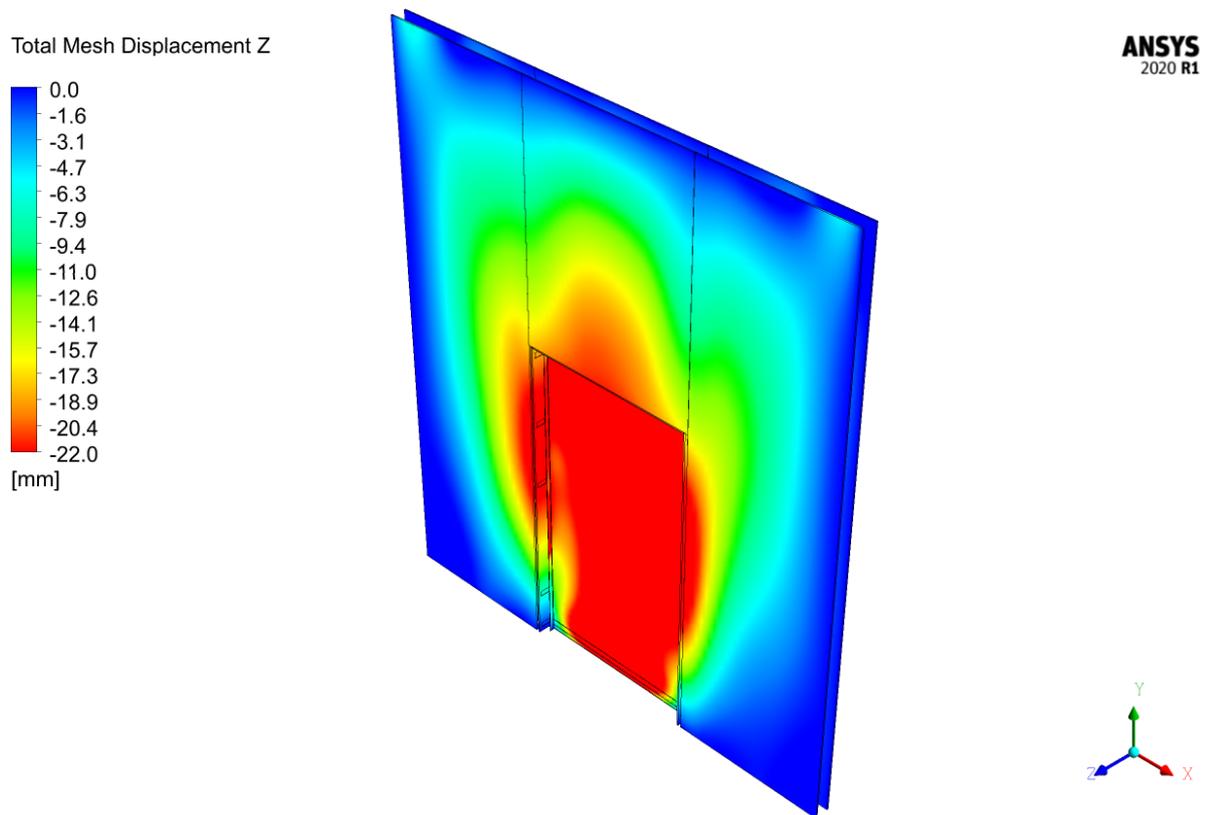


Abbildung 7.6: Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür mittig nach 30 min

Die leicht stufenförmigen Verläufe der Simulationsergebnisse liegen nicht in zu groben Simulationszeitschritten, sondern darin begründet, dass die Temperaturrandbedingung lediglich in Minutenschritten abgebildet wurde. Dies geschah, weil nur im Abstand von je einer Minute Messergebnisse vorlagen [33]. Man könnte das Ergebnis mit einer linearen Interpolation zwischen den Temperaturen noch verschönern.

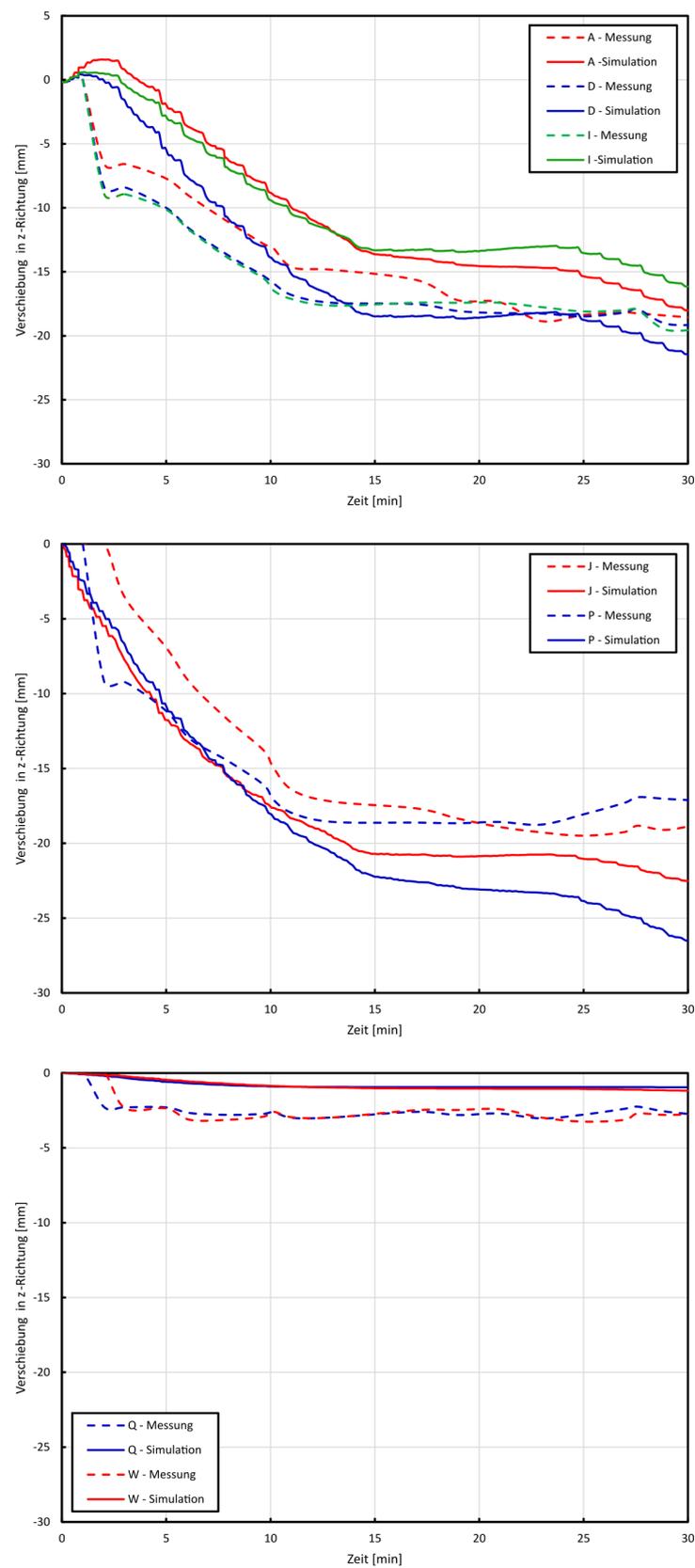


Abbildung 7.7: Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür mittig im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)

## 7.3 Weitere Anwendungsfälle des Leichtbauwandmodells

Wie schon bei der Ziegelwand wird die Modellierung für die Leichtbauwand mit Tür links und rechts eingebaut angewandt. Stoffwerte und Randbedingungen bleiben unverändert.

### 7.3.1 Leichtbauwand mit Tür links

Die schematische Gegenüberstellung von Simulations- und Messergebnissen erfolgt mit Abbildung 7.8. Wie schon in Kapitel 4 beschrieben, sind die Verformungen bei links eingebauter Türe in den Messpunkten A, J und Q kleiner als bei mittig montierter Türe. Dies wird durch das Simulationsmodell auch so abgebildet. Die Zahlenwerte der Verschiebungen in den Messpunkten D und I werden durch das Modell davon abweichend etwas geringer berechnet.

Zweierlei Einflüsse sind dafür maßgebend: Einerseits verursacht die Fixierung der linken Gipsplatte einen zu starken Randeinfluss, andererseits kann die mechanische Last der Türe auf der Schlossseite keine so große Verformung im Punkt I hervorrufen wie im Punkt A. Dieser Trend ist bei allen Simulationen sichtbar. Zusammen führt dies dazu, dass die berechneten Verschiebungen an der Oberkante deutlich zu gering ausfallen. Eine Verbesserung der Ergebnisse wäre durch ein detailliertes thermo-mechanisches Modell<sup>3</sup> der Gipsplatte möglich.

Die Übereinstimmung mit der Messung in den Punkten J und P ist sehr gut, was durch den starken Zug der Türe zu erklären ist. Eine Übersicht über die Simulations- und Messergebnisse wird wieder mit Abbildung 7.9 gegeben.

Der Konturplot der Leichtbauwand mit Tür links (Abbildung 7.10) zeigt die stärkere Verschiebung auf der rechten Türseite, welche die Oberkante der Türe (Messpunkt I) allerdings nicht erreicht. Auffällig ist auch der kleine Bereich in der linken Türinnenseite, der höhere Verformung aufweist als seine Umgebung. Dabei handelt es sich um die Zarge, die sich hier vom Gips gelöst hat. Dieser Effekt entsteht dadurch, dass im Gegensatz zur Ziegelwand die Fixierung der Türe mit der Wand mit elf Befestigungslaschen im Detail modelliert wurde. Bei der Ziegelwand wurde der Zwischenraum zwischen Tür und Zarge komplett mit Mörtel ausgefüllt und führte zu einer flächigen Kraftübertragung.

Die zeitlichen Trends für die Leichtbauwand mit Tür links werden mit Abbildung 7.11 gezeigt. In den Punkten mit großen quantitativen Abweichungen ist die Übereinstimmung wenig beeindruckend. Dennoch sind die Trends für die Messpunkte A, D und I ähnlich wie bei den Messergebnissen. Hier sieht man einen schnelleren Anstieg der Verformungen - sowohl in der Simulation als auch in der Messung - in den Punkten J und P, die von der Tür stark beeinflusst werden.

---

<sup>3</sup>Erweiterungen des Modells hinsichtlich Schadensmodellierung, Kontraktion, Dichteverlust und Elastizität sind möglich.

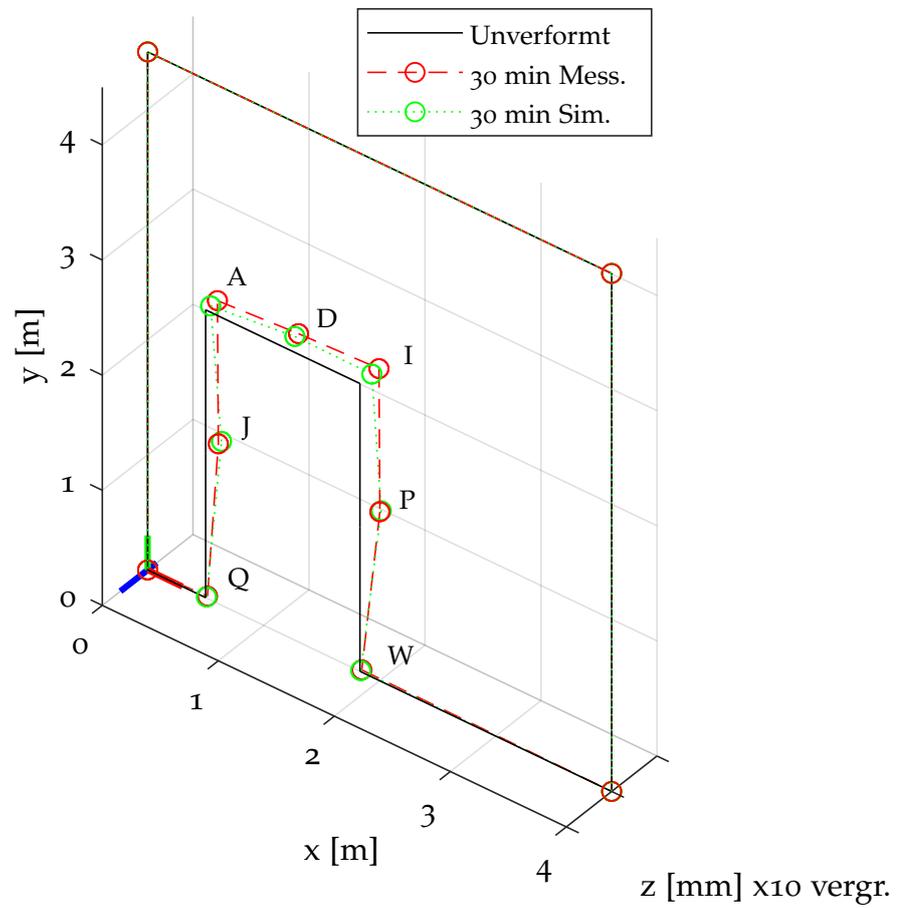


Abbildung 7.8: Simulationsergebnis der Leichtbauwand mit Tür links im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

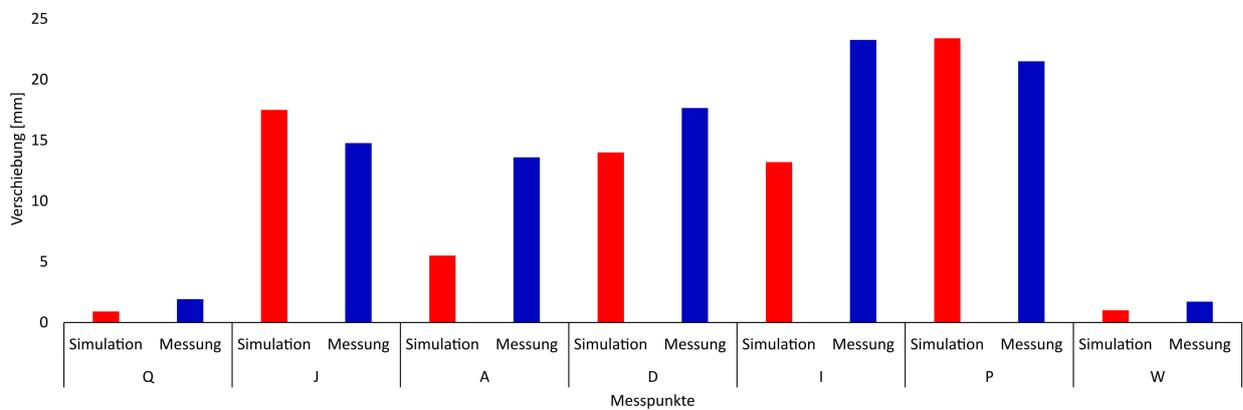


Abbildung 7.9: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür links) nach 30 min

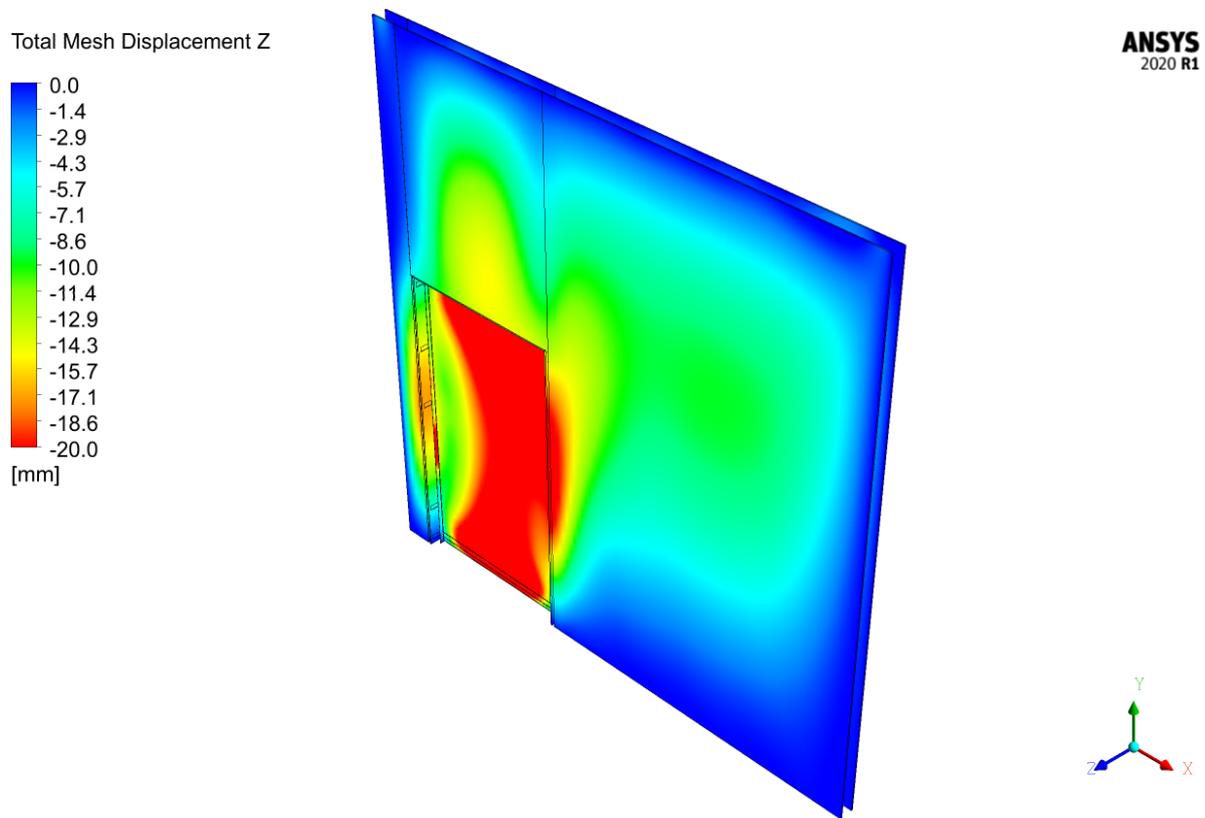


Abbildung 7.10: Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür links nach 30 min

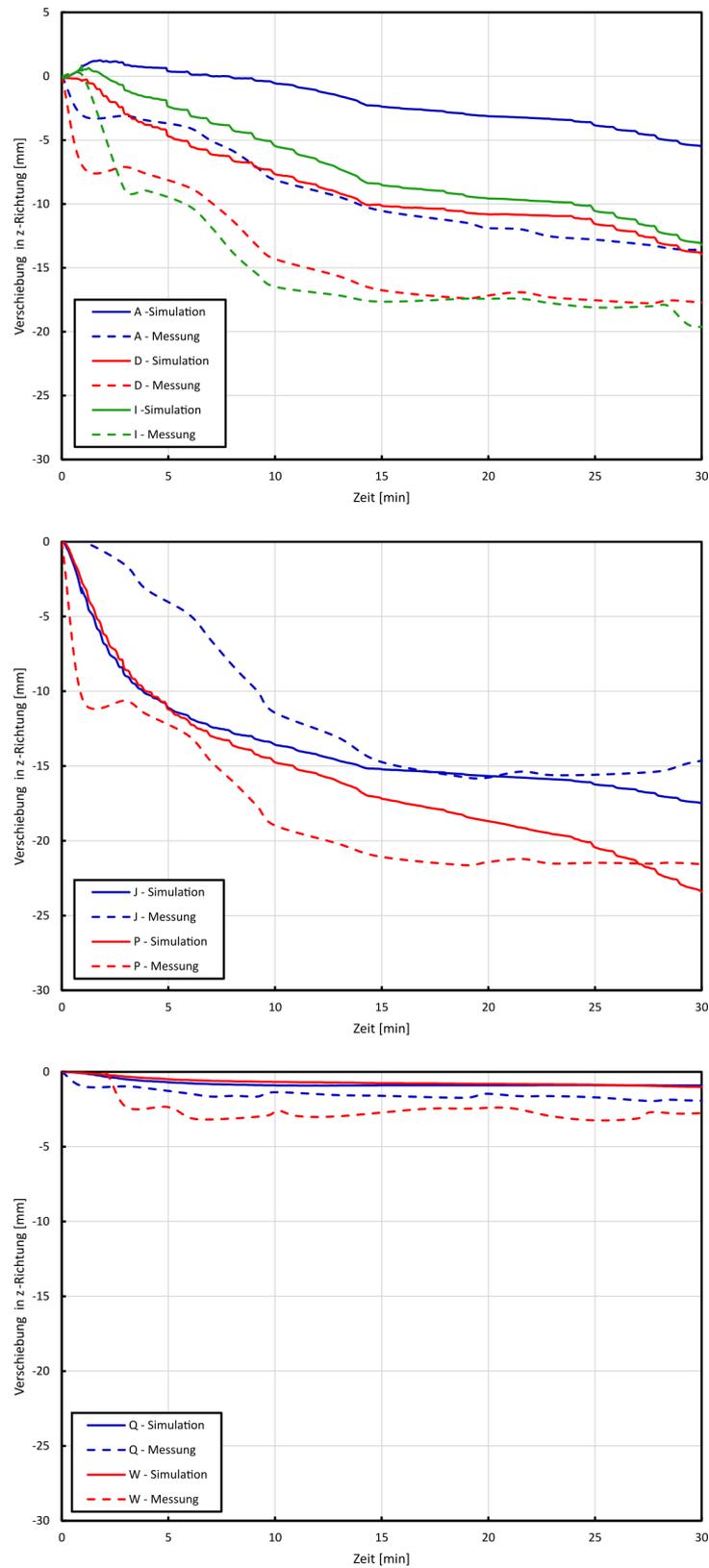


Abbildung 7.11: Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür links im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)

### 7.3.2 Leichtbauwand mit Tür rechts

Die Simulationsergebnisse für die Leichtbauwand mit rechts eingebauter Tür werden in Abbildung 7.12 den Messergebnissen schematisch gegenübergestellt. Wieder erkennt man eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Verformungsbilder. Lediglich der Messpunkt H<sup>4</sup> weicht deutlich von dem gemessenen Ergebnis ab. Generell wird bei allen Leichtbauwandkonfigurationen die Verformung in der linken oberen Ecke des Türrahmens zu gering berechnet. Dies deutet auf Verbesserungsmöglichkeiten im Türmodell hin, besonders weil die Messpunkte auf halber Türhöhe von den Leichtbauwandmodellen eher überschätzt werden.

Dennoch werden die Punkte auf halber Türhöhe gut nachgebildet. In Abbildung 7.13 werden die Mess- und Simulationsergebnisse zusammengefasst dargestellt.

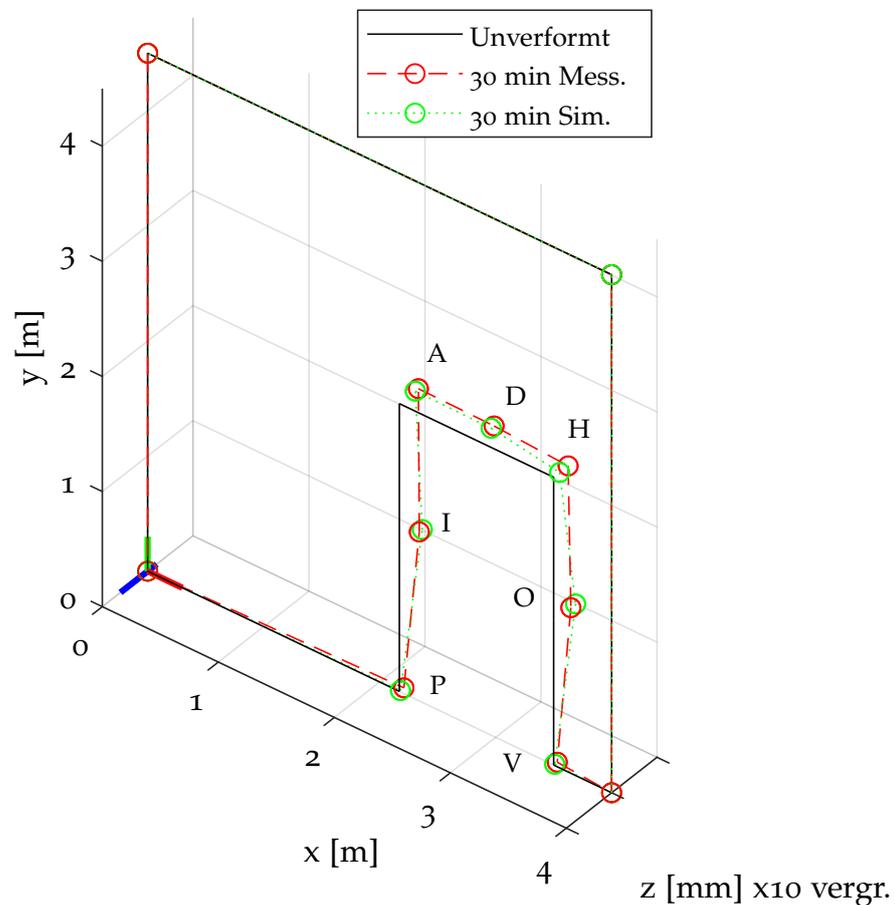


Abbildung 7.12: Simulationsergebnis der Leichtbauwand mit Tür rechts im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min

Der zum Simulationsmodell gehörende Konturplot wird mit Abbildung 7.14 gezeigt. Auch hier stellt man die größeren Verschiebungen auf der Wandinnenseite (Messpunkte P, I, A, D) fest. Wie

<sup>4</sup>Bei der Leichtbauwand mit Tür rechts wurde der Punkt in der linken oberen Ecke des Türrahmens mit H bezeichnet, bei den anderen Leichtbauwänden ist die entsprechende Position mit I benannt.

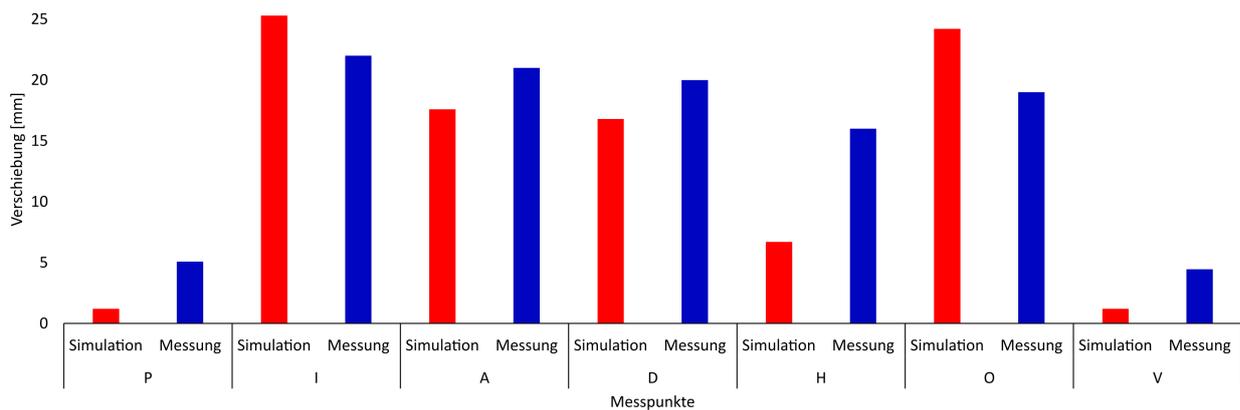


Abbildung 7.13: Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür rechts) nach 30 min

bei allen Leichtbauwandkonstruktionen erkennt man eine gewisse Dominanz der Deformationen auf halber Türhöhe, welche hauptsächlich vom mechanischen Einfluss der Türverformung verursacht werden.

Ergänzend sollte zu allen Wandsimulationen erwähnt werden, dass der Druckanstieg in der Tür nicht berücksichtigt wurde. Dieser entsteht einerseits durch die in der nahezu dicht abgeschlossenen Tür vorhandenen Luft, die bei Temperaturanstieg einen Druckanstieg erfährt, andererseits ist in der Tür selbst auch Gips enthalten, welcher dieselben Reaktionen durchläuft wie die Gipsplatten auf der Wand. Der entstehende Wasserdampf kann die Tür nur erschwert verlassen und führt ebenfalls zu einem Druckanstieg. In den Versuchen bewirkt der Türinnendruck, dass sich das dem Feuer abgewandte Türblatt nicht wie in den Simulationsergebnissen überwiegend nach innen verformt, sondern sich sogar nach außen wölbt. Dies könnte ebenfalls Effekte auf die mechanische Wirkung der Tür in den Wandmodellen haben, wobei der Einfluss der Temperaturunterschiede zwischen zu- und abgewandter Seite die Deformationswirkung auf die Wand vermutlich dominiert.

Der zeitliche Verlauf von Simulations- und Messergebnissen wird mit Abbildung 7.15 verglichen. Dabei fallen die von den anderen Modellen stark abweichenden Messergebnisse der Verformungsverläufe auf. Die simulierten Verläufe hingegen präsentieren sich ähnlich wie bei den weiteren Leichtbauwandkonfigurationen. Gerade in den Messpunkten I und O verhält sich die Verformung in den ersten Minuten völlig anders als erwartet. Sie bleibt bis zehn Minuten nach dem Versuchsstart fast bei null.

Eine Erklärung für dieses Verhalten wäre das Abfallen eines der Leitbleche der Brenner. Diese sollen im Ofen für eine homogene Temperaturverteilung sorgen. Ist diese nicht gegeben, so können stark abweichende Messergebnisse zustande kommen. Mit fortschreitender Versuchsdauer werden die Temperaturen und mit ihnen die Strahlungswirkung ausreichend groß, sodass die Werte zum Zeitpunkt von 30 min dennoch als aussagekräftig angesehen werden können.

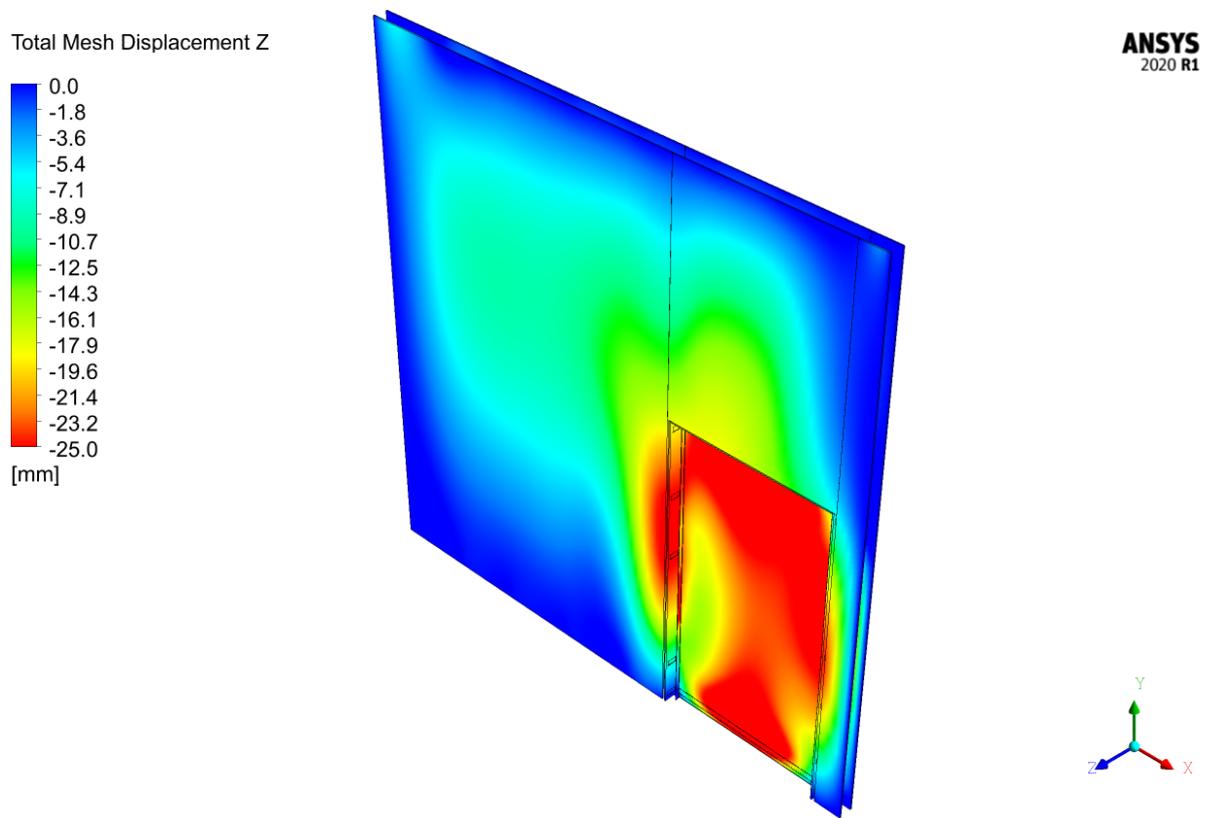


Abbildung 7.14: Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür rechts nach 30 min

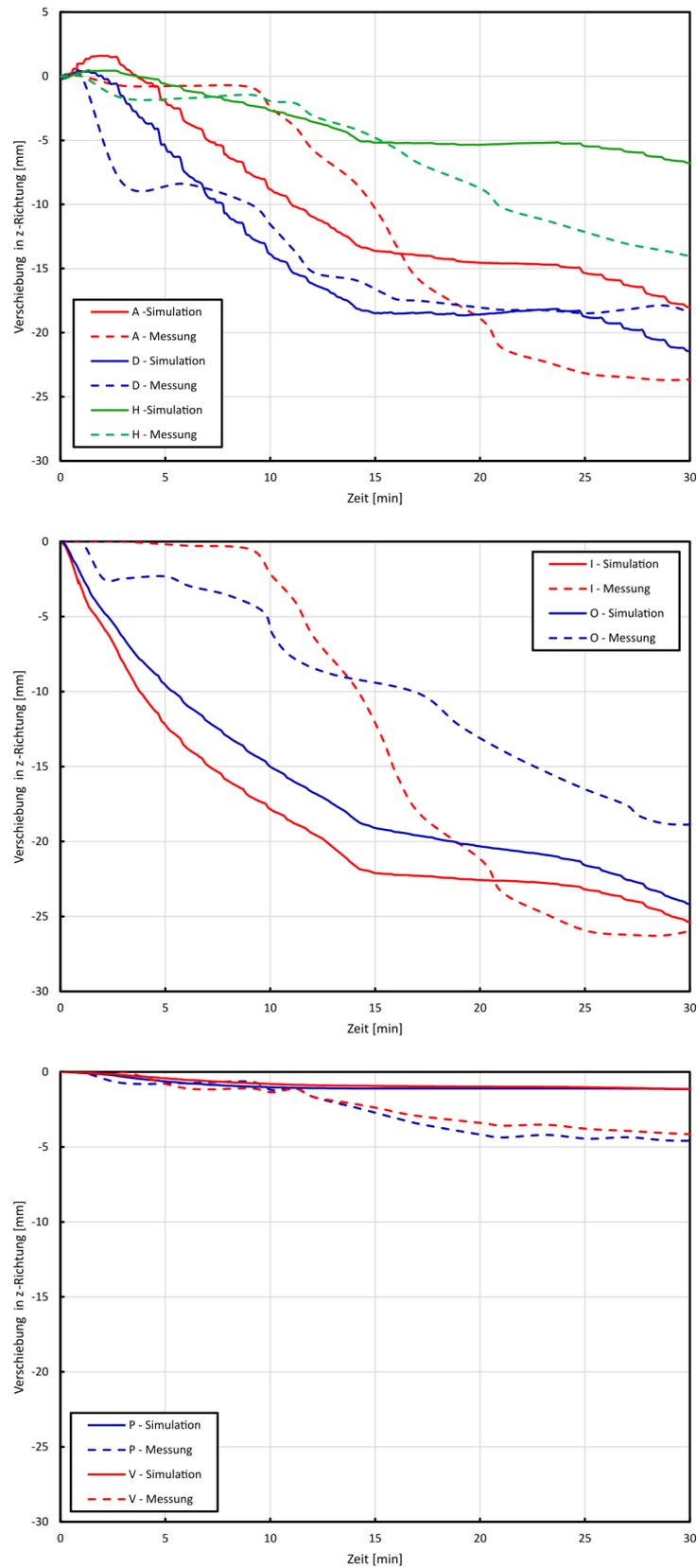


Abbildung 7.15: Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür rechts im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet)



# 8 Diskussion

Abschließend soll ein Vergleich zwischen Ziegel- und Leichtbauwandverhalten gezogen werden. Darüber hinaus soll noch auf einige wichtige Punkte zusammengefasst werden, die Unsicherheiten in der Modellbildung darstellen.

## 8.1 Gegenüberstellung Leichtbauwand - Ziegelwand

Die Größenordnungen der Wandverformung sind im Zeitraum bis ca. 30 min durchaus vergleichbar. Diese liegen im Bereich um die -20 mm bis maximal -50 mm bei der Ziegelwand. Für den Simulationszeitraum von 40 min bei der Ziegelwand und 30 min bei der Leichtbauwand ergeben sich die Gesamtverformungen aus einer Kombination der Beiträge von Wand- und Türverformung.

Danach verformen sich die Leichtbauwände allerdings um ein Vielfaches stärker. Dafür verantwortlich ist die bedeutsamere Temperatúrausdehnung von Stahl und der Festigkeitsverlust von Gips bei hohen Temperaturen. Nach ca. 40 min bricht der Gips an der dem Feuer ausgesetzten Seite sogar vollständig. Auch bei den Ziegelwänden schreitet die Deformation nach dem betrachteten Simulationszeitraum noch fort, allerdings in weit geringerem Maße als bei den Leichtbauwänden.

Trotz der wesentlich größeren Masse der Ziegelwand erkennt man eine Dominanz des mechanischen Einflusses des Prüfobjekts. Die maximale Verformung ist immer auf halber Türhöhe zu finden, was auch von den Simulationsmodellen weitgehend nachgebildet wird. Bei der Leichtbauwand hingegen ist in allen Konfigurationen ein deutlicher Einfluss der Wandverformung selbst zu erkennen. Für alle Konfigurationen sind die Verschiebungen auf halber Türhöhe und im Bereich der Oberkante der Tür im selben Bereich von ca. -20 mm nach 30 min angesiedelt.

Zusammengefasst sind die wichtigsten Parameter für die Verformungsbilder bei der Ziegelwand mit Rahmensteifigkeit<sup>1</sup> und die Kraftwirkung des Prüfobjekts identifizierbar. Bei der Leichtbauwand hingegen ist das Temperaturprofil in den Profilen ebenfalls von hoher Relevanz - neben der Verformung des Prüfobjekts. Die Temperaturen sind dabei stark von den beteiligten Materialien (Gips) abhängig.

---

<sup>1</sup>Diese stellt eine Stellschraube dar, mit der sich durch viele andere Modellparameter (Stoffwerte, Kontakte etc.) entstehende Fehler korrigieren lassen.

## 8.2 Unsicherheiten in der Modellbildung

**Stoffdaten** Genauer Kenntnis über das Materialverhalten der beteiligten Stoffe sind für die Verformungsberechnung aller Wände von großer Bedeutung. Gerade der gebrannte Ton bei Ziegelwänden und der Gips in den Leichtbauwänden bringt hier Unsicherheiten in die Modellbildung. Dennoch konnten aufgrund der Simulationsergebnisse einigermaßen taugliche Werte aus der Literatur bestätigt werden. Die Randbedingung der elastischen Einspannung ist natürlich imstande die ungewissen Stoffdaten in gewissem Maße auszugleichen. Die Unsicherheit verlagert sich dann allerdings hin zur Wahl der zu wählenden Steifigkeitsparameter.

**Randbedingungen** Mindestens genauso wichtig wie die Stoffdaten ist die Wahl der Randbedingungen. In Kapitel 5 konnten die großen Auswirkungen der Randbedingungsdefinition auf das Ergebnis gezeigt werden. Besonders die Situation der Ziegelwand mit Tür mittig weist darauf hin, dass hier kein allgemeingültiger Wert angegeben werden kann. Dies war aufgrund der groben Toleranzen im Ziegelbau in gewissem Maße absehbar. Die elastische Lagerung mit Randblöcken bei der Ziegelwand und die Einspannungen der Profile für die Leichtbauwand haben aber zu guten ersten Ergebnissen geführt.

Eine genauer definierte Einbausituation bei den Versuchen könnte zu einer besseren Vorhersehbarkeit und Berechenbarkeit der Wandverformungen führen. Diese sollten der Einbausituation der Prüfobjekte wie Brandschutztüren etc., in realen Gebäuden möglichst nahekommen.

**Anfangszustand und Konditionierung** Die gemessenen Verformungen sind im Vergleich zur Größe der gesamten Wand immer noch klein. Falls die Ziegel schon zu Beginn nicht aneinander liegen, also kleine Spalten vorliegen, so könnte dies das Versuchsergebnis deutlich beeinflussen. Die Beschaffenheit der Mörtelschicht kann ebenfalls einen Einfluss auf das Ergebnis haben.

Generell sollten die Wände für eine ausreichende Zeit konditioniert werden. Ist dies nicht der Fall, also falls der Mörtel nicht vollständig getrocknet ist, der Wärmetransport aufgrund von Wasserdampf verändert werden. Abgesehen davon werden auch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst.

Die Kombination dieser Einflussfaktoren kann möglicherweise bei zwei augenscheinlich gleichen Versuchen zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dabei handelt es sich an dieser Stelle allerdings um eine Vermutung. Um diese zu bestätigen, wäre die Vermessung entsprechender Versuchsreihen nötig, was mit großem Aufwand verbunden wäre.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Berücksichtigung der Wandverformungen ist ein weiterer Schritt in die Richtung zur virtuellen Durchführbarkeit von Feuerwiderstandsprüfungen. In dieser Arbeit wurden thermisch-mechanisch gekoppelte FEM-Simulationsmodelle zur Berechnung der Verformung von Ziegel- und Leichtbauwänden erstellt. Diese Modelle weisen zum Großteil schon gute Übereinstimmungen mit vorhandenen Messergebnissen auf, haben andererseits aber auch viele Schwierigkeiten und Unsicherheiten bei der Modellbildung aufgezeigt.

Grundsätzliche Verhältnisse der Verschiebungen der zur Verfügung stehenden Messpunkte konnten durch die Modelle überwiegend erreicht werden. Auch die Größenordnung der Verformungen stimmt großteils mit den Messergebnissen überein. Wie schon vorab aufgrund der vielen Unsicherheiten bei der Modellierung zu vermuten war, deutet die Sondersituation bei der Ziegelwand mit mittiger Tür auf eine gewisse Unvorhersehbarkeit der zu wählenden Randbedingungen hin.

Nächste Schritte können weitere Iterationen bei der Randbedingungsmodellierung sein. Auch die Erarbeitung eines detaillierten Modells für das Materialverhalten von Gips könnte die Ergebnisse deutlich verbessern. Eine entsprechende Masterarbeit ist zurzeit am Institut für Wärmetechnik im Gange.

Es sei nochmals angemerkt, dass es sich bei den Ziegel-Versuchswänden um unverputzte Ziegelwände handelt. Das Vorhandensein einer Putzschicht könnte sich ebenfalls auf die Temperaturen und Verformungen der Wand auswirken.

Ein weiterer, bisher nicht berücksichtigter Einflussfaktor ist der Druckanstieg, der durch die Temperaturerhöhung der Luft in der Tür und die dort ablaufenden Gipsreaktionen entsteht. Dieser könnte einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die mechanische Wirkung der Tür auf die Wand verursachen.

Letzten Endes ist das Ziel eine Kombination der ggf. 2-wegig gekoppelten CFD-FEM-Modelle für die Simulation des Prüfkörpers mit dem Modell der Wände um eine bessere Gesamtübereinstimmung der numerisch berechneten Ergebnisse mit der Realität zu erhalten. Dafür wird jedoch noch einiges an Mühe vonnöten sein.



# Anhang

**Ziegelwand: Überlegungen zur Netzunabhängigkeit** Die grobe Auflösung der Ziegelhohlräume und die dadurch schlechten Seitenverhältnisse der Elemente (Aspect-Ratios) werfen die berechnete Frage nach der Netzunabhängigkeit der Ergebnisse auf. Aufgrund der enormen Größe und geometrischen Komplexität des Simulationsmodells kann nicht einfach die Elementgröße halbiert werden. Dadurch würde die verfügbare Rechenkapazität zumindest was die RAM-Größe betrifft, schnell überschritten werden. Andererseits ist auch eine Verdoppelung der Elementgröße problematisch, da zum Erreichen von Konvergenz eine Maximalgröße der Elemente quasi vorgegeben ist. Des Weiteren war das Türmodell schon Gegenstand bereits abgeschlossener Arbeiten und wurde als tauglich bewertet [2].

Infolge obiger Gründe soll die Netzunabhängigkeitsbetrachtung sich auf drei Ziegelreihen inklusive dazwischenliegendem Mörtel beschränken. Dasselbe Temperaturfeld wie in den Wandsimulationen wird als thermische Last vorgegeben.

Die für die Modelle gewählte Elementgröße für die Ziegel beträgt 60 mm und führt auf ein Ergebnis von -72,59 mm. Die Vorgabe der Elementgröße wird nun zunächst um 30% auf 90 mm erhöht. Mit diesen Elementen wird ein maximales Verformungsergebnis -73,02 mm von erreicht. Mit einer halbierten Elementgröße von 30 mm wird das Netz deutlich feiner. Die maximale Verschiebung beträgt damit -72,55 mm. Hinsichtlich der Elementgröße ist das Modell damit ausreichend fein aufgelöst. Eine Vergrößerung der Elemente auf 90 mm bringt darüber hinaus keine Vorteile, da die Elementzahl sogar steigt. Deshalb bleibt es bei der Wahl von 60 mm. Tabelle 9.1 fasst die Ergebnisse der Netzuntersuchungen zusammen.

| $\Delta$ [mm] | Elementanzahl | max. AR | max. Verschiebung in z [mm] |
|---------------|---------------|---------|-----------------------------|
| 30            | 30.825        | 22,7    | -72,55                      |
| 60            | 10.862        | 100,3   | -72,59                      |
| 90            | 37.731        | 120,2   | -73,02                      |

Tabelle 9.1: Ziegelwand: Elementgröße und Auswirkungen auf Elementanzahl, AR und Ergebnisse

**Leichtbauwand: Überlegungen zur Netzunabhängigkeit** Neben der Frage, ob die Netzfeinheit und die Netzqualität ausreichend gewählt wurde, stellt sich für die Modellierung der dünnen Stahlprofile auch die Problematik, ob die Vernetzung mit Schalenelementen zulässig ist. Wie bei der Ziegelwand wurde nur ein Teilsystem für diese Untersuchungen betrachtet.

Dafür wurde ein UA-Profil mit den im Gesamtmodell ebenfalls verwendeten Randbedingungen einmal mit Schalen- und einmal mit Volumenelementen vernetzt. Das Temperaturfeld entspricht ebenfalls jenem, welches auch im Gesamtmodell verwendet wird<sup>1</sup>. Sowohl die Verformungen als auch die Kraftreaktionen müssen übereinstimmen, sodass eine Modellierung mit Schalenelementen, die eine kleinere Elementzahl und bessere Seitenverhältnisse ermöglichen, als zulässig angesehen werden kann.

Abbildung 9.1 zeigt das Übereinstimmen der Verformungsergebnisse von Schalen und Volumenelementmodellierung sowohl für das Verformungsverhalten als auch für die Kraftreaktion im Lagerungspunkt. Letztere beträgt bei Schalenelement-Modellierung 340,09 N und bei Volumenmodellierung 342,44 N. Beide Vernetzungsarten scheinen also äquivalent zu sein.

Die Ergebnisse der Netzvergleiche werden mit Tabelle 9.2 zusammengefasst. Diese sind von der Elementgröße kaum abhängig, was auch am Betrachtungszeitpunkt von 1800 s nach Versuchsstart liegt, denn dann ist der Temperaturverlauf im Stahlprofil schon einigermaßen linear von innen nach außen abnehmend. Für die Modelle dieser Arbeit wurde eine Größe von 12 mm gewählt, um die anfangs größeren Temperaturgradienten ebenfalls aufzulösen und somit den transienten Verlauf simulieren zu können. Die Schalenelemente eignen sich gut für die Modellierung der Profile, weil sie trotz erhöhter Elementzahl im Vergleich zu Volumenmodellierung mit weniger Eckpunkten auskommen und sich die benötigte Rechenzeit deutlich reduziert.

| $\Delta$ [mm] | Elementanzahl pro Profil | max. AR | max. Verschiebung in z [mm] | Rechenzeit [s] |
|---------------|--------------------------|---------|-----------------------------|----------------|
| Solid 12      | 5.925                    | 10,14   | -7,79                       | 516            |
| Shell 12      | 11.225                   | 1,65    | -7,78                       | 233            |
| Shell 6       | 21.728                   | 2,48    | -7,81                       | 1067           |
| Shell 20      | 2.025                    | 1,03    | -7,77                       | 101            |

Tabelle 9.2: Leichtbauwand: Elementgröße und Auswirkungen auf Elementanzahl, AR und Ergebnisse

<sup>1</sup>Die Ergebnisse entsprechen aber aufgrund der fehlenden Gipsplatten nicht jenen der entsprechenden Punkte aus Abbildung 7.3.

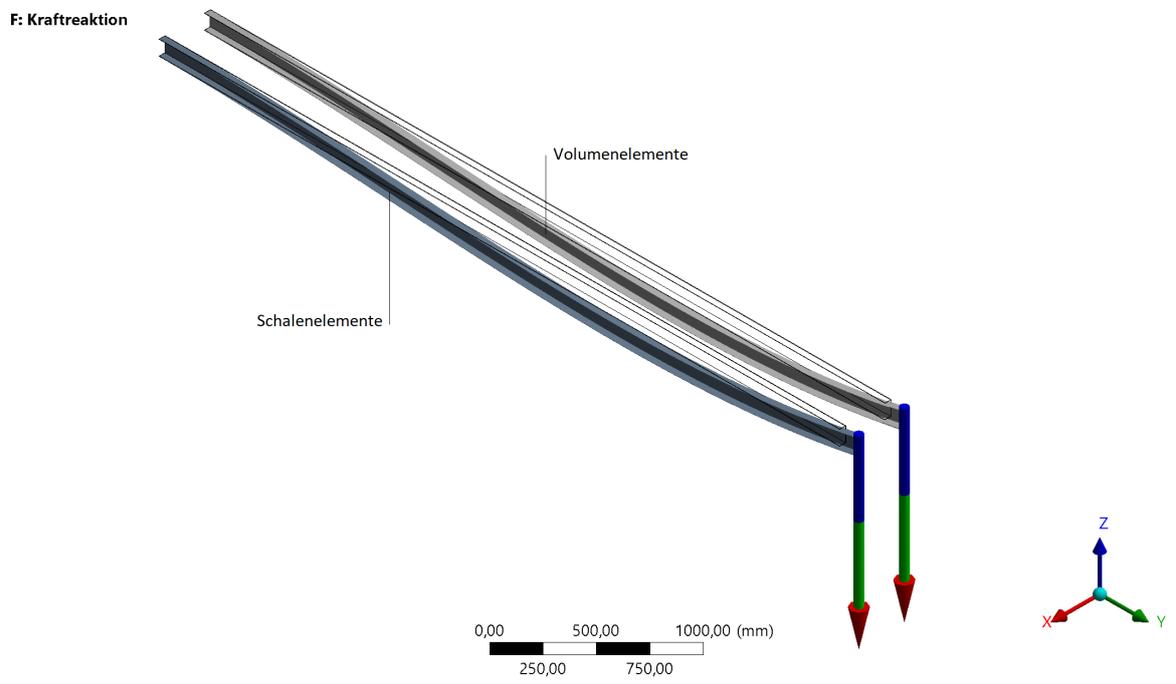


Abbildung 9.1: Verformung und Kraftreaktion für Schalen und Volumenelemente



# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Abweichung von Messung und Simulation bei zuvor durchgeführten Arbeiten [1]  | 2  |
| 1.2  | Manuelle Berücksichtigung der Wandverformung als Randbedingung [1] . . . . .   | 3  |
| 1.3  | Ziegelwand- (oben) und Leichtbauwandkonfigurationen (unten), anhand derer das Modell in der vorliegenden Arbeit aufgebaut und validiert wurde. . . . .   | 4  |
| 2.1  | Einheitstemperaturkurve und dazugehörige Grenzkurven [3] . . . . .   | 8  |
| 2.2  | Mauerziegel-Beispiele für U-Ziegel [14] . . . . .  | 11 |
| 2.3  | Mauerziegel-Beispiele für P-Ziegel [14] . . . . .  | 11 |
| 2.4  | Schematische Darstellung mit Bezeichnungen bei Stürzen [14] . . . . .  | 12 |
| 2.5  | Profile für Leichtbauwände; vlnr.: UW-,UA-,CW-Profil [23] . . . . .  | 12 |
| 2.6  | Im Aufbau befindliche Leichtbauwand mit begonnener Gipskartonverkleidung . .   | 13 |
| 2.7  | Elektromagnetisches Wellenspektrum [10] . . . . .  | 15 |
| 2.8  | Lineare Regression; Streudiagramm und Regressionsgerade [12] . . . . .   | 17 |
| 2.9  | Thermische Eigenschaften von gebranntem Ton in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) Wärmeleitfähigkeit (b) spezifische Wärmekapazität (c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient [16] . . . . . | 20 |
| 2.10 | Mechanische Eigenschaften von gebranntem Ton und Mörtel in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) gebrannter Ton - Probe 1 (b) gebrannter Ton - Probe 2 (c) E-Modul von Mörtel [16] . . . . . | 20 |
| 2.11 | Thermische Eigenschaften von Mörtel in Abhängigkeit der Temperatur, bezogen auf ihren Wert bei Raumtemperatur; (a) Wärmeleitfähigkeit (b) spezifische Wärmekapazität (c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient [16] . . . . .         | 21 |
| 2.12 | Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Beton [17] . . . . .  | 23 |
| 2.13 | Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Gips in Abhängigkeit von der Temperatur [11] . . . . .   | 25 |
| 2.14 | Temperaturabhängige Dichte und Dehnung von Gipsproben nach Langbauer (Aufwärm- und Abkühlkurven) [11] . . . . .  | 26 |
| 2.15 | Temperaturabhängiger Elastizitätsmodul von Gips bei verschiedenen Aufheizzeiten (30 s, 3 min, 5 min) . . . . .   | 27 |
| 2.16 | Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [20] . . . . .  | 28 |
| 2.17 | Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von S355 [2] . . . . .   | 28 |
| 2.18 | Temperaturabhängiger Wärmeausdehnungskoeffizient von S355 [2] . . . . .  | 29 |
| 2.19 | Temperaturabhängige Stoffdaten: Querkontraktionszahl und Elastizitätsmodul von S355 [2] . . . . .  | 29 |
| 2.20 | Temperaturabhängige multilineare Verfestigung von S355 [21] . . . . .  | 30 |
| 2.21 | Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der Mineralwolle in Abhängigkeit von der Temperatur [2] . . . . .  | 30 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | a) Originalgeometrie b) FEM-vernetzte Geometrie [25] . . . . .  | 32 |
| 3.2  | Newton-Verfahren zur Schnittpunktfindung zweier Ellipsen [26] . . . . .   | 35 |
| 3.3  | Ideal plastisches Materialverhalten bei Be- und Entlastung [26] . . . . .   | 36 |
| 3.4  | Kontakte in der FEM [26] . . . . .  | 36 |
| 3.5  | Unterschied zwischen Sekanten- und Tangentenmodul zur Berechnung der thermischen Ausdehnung [28] . . . . .  | 38 |
| 3.6  | Im Strahlungsaustausch stehende Flächen [10] . . . . .  | 39 |
| 4.1  | Blick in den Versuchsofen ohne Wand [2] . . . . .   | 42 |
| 4.2  | Originalmesswerte und geglättete Kurve am Beispiel von Messpunkt A bei Ziegelwand mit Tür mittig . . . . .  | 43 |
| 4.3  | Aufbau der Tür mit Schnittdarstellungen um Verstärkungen sichtbar zu machen [2]   | 44 |
| 4.4  | Messpunkte auf den Ziegelwänden am Beispiel der Wand mit links eingebauter Tür  | 46 |
| 4.5  | Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand links eingebauter Tür (30 min) . . . .   | 47 |
| 4.6  | Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand mit Tür mittig eingebaut (30 min) . .  | 48 |
| 4.7  | Verschiebungsmessergebnis der Ziegelwand mit Tür rechts eingebaut (30 min) . .  | 49 |
| 4.8  | Messpunkte auf den Leichtbauwänden am Beispiel der Wand mit rechts eingebauter Tür; Die Benennung der Messpunkte kann für die anderen Konfigurationen abweichen. . . . .  | 52 |
| 4.9  | Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür links eingebaut (30 min)  | 53 |
| 4.10 | Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür mittig eingebaut (30 min)   | 54 |
| 4.11 | Verschiebungsmessergebnis der Leichtbauwand mit Tür rechts eingebaut (30 min)   | 55 |
| 5.1  | Schema für die numerische Berechnung des Wärmetransports in einem Ziegel mit Konvektions- und Strahlungsrandbedingungen [16] . . . . .  | 59 |
| 5.2  | Temperaturen im Prüfobjekt nach 30 min Simulationszeit an der dem Feuer zugewandten Seite (links) und auf der abgewandten Seite (rechts) . . . . .  | 60 |
| 5.3  | Rechennetz für die Wärmeleitung durch die Ziegelwand . . . . .  | 62 |
| 5.4  | Modell inkl. Rechennetz für die Ziegelwand mit Tür links . . . . .  | 63 |
| 5.5  | Stationäre Temperaturverteilung im Referenzziegel mit (links) und ohne (rechts) Hohlraumstrahlung . . . . .   | 64 |
| 5.6  | Stationäre Temperaturverteilung auf der abgewandten Seite mit (links) und ohne (rechts) Hohlraumstrahlung . . . . .   | 64 |
| 5.7  | Temperaturverläufe im Ziegel - Vergleich des Simulationsmodell mit Referenz [15] (oben), Pfad, entlang welchem obige Temperaturverläufe ausgewertet wurden (unten)  | 65 |
| 5.8  | Links: Pfad entlang welchem die Temperaturen ausgewertet wurden; Rechts: Daraus folgende Vorgabe für das Curve-Fitting (Punkte) und Resultat (3D-Fläche) . . . .  | 66 |
| 5.9  | Oben: Verformungsbild einer Ziegelreihe für die Kontaktuntersuchung zum Zeitpunkt von ca. 33 min. Das Temperaturfeld wurde durch oben beschriebene Polynomdarstellung modelliert. Unten: Detail der Kontaktflächen zum entsprechenden Zeitpunkt. . . . .  | 67 |
| 5.10 | Auswirkungen der Mörtelschicht und der Ziegel Hohlräume - a) ohne Mörtel durch Temperaturfeld b) mit Mörtel durch Temperaturfeld c) ohne Mörtel durch Krafteinwirkung d) mit Mörtel durch Krafteinwirkung e) ohne Hohlräume im Ziegel durch Temperaturfeld f) mit Hohlräumen im Ziegel durch Temperaturfeld . . . . . | 68 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.11 | Auswirkung der gewählten Randbedingungen auf die Verformungsbilder - a) Rand fix b) komplett frei c) unten fix, sonst frei d) oben und unten fix e) unten mit Reibung f) unten mit Reibung, seitlich elastisch . . . . .             | 70 |
| 5.12 | Spaltbildung zwischen Tür und Zarge an der dem Feuer zugewandten Seite der Versuchswand mit Tür in der Mitte (30 min); zweifach vergrößert; Das Simulationsmodell entspricht jenem von Abbildung 6.7 . . . . .                       | 72 |
| 5.13 | Ausreißen des Schlosses bei fortgeschrittener Versuchsdauer (ca. nach 30min) . .   | 74 |
| 5.14 | Rechennetz für den Wärmetransport durch die Leichtbauwand . . . . .  | 75 |
| 5.15 | Auswirkungen der Gipsreaktionen und des dadurch entstehenden Wasserdampfs auf den Wärmetransport [33] . . . . .  | 77 |
| 5.16 | Verformungsmessdaten von Messpunkten auf der Leichtbauwand mit Tür mittig im zeitlichen Verlauf; Plateaubildung durch Wasserdampf aus den Gipsreaktionen   | 77 |
| 5.17 | Querschnitt durch die Modellgeometrie der Leichtbauwand mit Ort der Aufbringung des von Prieler gemessenen Temperaturverlaufs (Construction 1) nach Gipsplatten [33]. Die inneren Gipsplatten wurden aus der Berechnung ausgenommen. | 78 |
| 5.18 | Leichtbauwandmodell mit Tür mittig (vordere Gipsplatten ausgeblendet) . . . . .  | 79 |
| 6.1  | Temperaturfeld zu Beginn, nach 10 min, 20 min, und 40 min . . . . .  | 82 |
| 6.2  | Stationäres Temperaturfeld nach ca. 180 min. Es wurden beidseitig noch einige Kavitäten mitsimuliert, um eine korrekte Temperaturverteilung an den Rändern zu erhalten. . . . .  | 83 |
| 6.3  | Simulationsergebnis für die Verformung einer kalten Wand durch die mechanische Last der Tür (30 min) . . . . .   | 85 |
| 6.4  | Simulationsergebnis für die Verformung einer heißen Wand ohne Türe (30 min) .  | 86 |
| 6.5  | Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür mittig im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .  | 88 |
| 6.6  | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür mitte) nach 30 min . . . . .  | 89 |
| 6.7  | Konturplot der Verschiebung nach 30 min, mit Wand- und Türtemperatur berücksichtigt.   | 89 |
| 6.8  | Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür mittig im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .  | 90 |
| 6.9  | Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür links im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .   | 92 |
| 6.10 | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür links) nach 30 min . . . . .  | 92 |
| 6.11 | Konturplot der Verschiebung der Ziegelwand mit links eingebauter Tür nach 30 min   | 93 |
| 6.12 | Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür links im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .   | 94 |
| 6.13 | Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür rechts im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .  | 96 |
| 6.14 | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür rechts) nach 30 min . . . . .   | 96 |
| 6.15 | Konturplot der Verschiebung der Ziegelwand mit rechts eingebauter Tür nach 30 min  | 97 |
| 6.16 | Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür rechts im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .  | 98 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.17 | Simulationsergebnis für die Verformung der Ziegelwand mit Tür mittig bei Annahme einer steiferen Einspannung (schematisch) nach 30 min . . . . . | 100 |
| 6.18 | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Tür mittig, steiferer Rahmen) nach 30 min . . . . . | 100 |
| 6.19 | Simulations- und Messergebnis für die Ziegelwand mit Tür mittig bei steiferer Einspannung im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .    | 101 |
| 7.1  | Temperaturverteilung im Türrahmen, Berechnet mit Temperaturreandbedingung aus Prieler [33] auf Profilinnenseite (30 min) . . . . .               | 104 |
| 7.2  | Simulationsergebnis für die Verformung einer kalten Leichtbauwand durch die mechanische Last der Türe (30min) . . . . .                          | 105 |
| 7.3  | Simulationsergebnis für die Verformung einer heißen Leichtbauwand ohne Tür (30min) . . . . .   | 105 |
| 7.4  | Simulationsergebnis für die Verformung der Leichtbauwand mit Tür mittig im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .             | 106 |
| 7.5  | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür mitte) nach 30 min . . . . .      | 107 |
| 7.6  | Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür mittig nach 30 min . . .   | 108 |
| 7.7  | Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür mittig im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .                           | 109 |
| 7.8  | Simulationsergebnis der Leichtbauwand mit Tür links im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .                                 | 111 |
| 7.9  | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür links) nach 30 min . . . . .      | 111 |
| 7.10 | Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür links nach 30 min . . .  | 112 |
| 7.11 | Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür links im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .                            | 113 |
| 7.12 | Simulationsergebnis der Leichtbauwand mit Tür rechts im Vergleich mit Messung (schematisch) nach 30 min . . . . .                                | 114 |
| 7.13 | Messpunkte am Türrahmen und dazugehörige Verschiebungen (Beträge) in Simulation und Messung (Leichtbauwand Tür rechts) nach 30 min . . . . .     | 115 |
| 7.14 | Konturplot der Verschiebung der Leichtbauwand mit Tür rechts nach 30 min . . .   | 116 |
| 7.15 | Simulations- und Messergebnis für die Leichtbauwand mit Tür rechts im zeitlichen Trend (Messwerte geglättet) . . . . .                           | 117 |
| 9.1  | Verformung und Kraftreaktion für Schalen und Volumenelemente . . . . .   | 125 |

# Tabellenverzeichnis

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Stoffwerte von gebranntem Ton und Mörtel bei Raumtemperatur [16]; Für diese Arbeit verwendet wurde jene Tonprobe, die hier als Test no. 2 bezeichnet wird. . . | 22  |
| 5.1 | Rechenetz für die Wärmeleitung durch die Ziegelwand . . . . .  | 62  |
| 5.2 | Rechenetze der Ziegelwandmodelle für die Verformung . . . . .  | 62  |
| 5.3 | Kontakteinstellungen für alle Wandsimulationen (gilt für Ziegel- und Leichtbauwand)  | 73  |
| 5.4 | Rechenetze der Leichtbauwandmodelle für den Wärmetransport . . . . .   | 75  |
| 5.5 | Rechenetze der Leichtbauwandmodelle für die Verformung . . . . .   | 76  |
| 5.6 | Zusammenfassungen der Modellbildung für Ziegel- und Leichtbauwände . . . .   | 80  |
| 9.1 | Ziegelwand: Elementgröße und Auswirkungen auf Elementanzahl, AR und Ergebnisse . . . . .   | 123 |
| 9.2 | Leichtbauwand: Elementgröße und Auswirkungen auf Elementanzahl, AR und Ergebnisse . . . . .  | 124 |



# Literatur

- [1] Prieler, Rene Josef, Hannes Gerhardter, Martin Landfahner, Christian Gaber, Christoph Schluckner, Markus Eichhorn-Gruber, Günther Schwabegger und Christoph Hochenauer. »Development of a numerically efficient approach based on coupled CFD/FEM analysis for virtual fire resistance tests—Part B: Deformation process of a steel structure«. In: *Fire and Materials* 44.5 (2020), S. 704–723. ISSN: 0308-0501. DOI: 10.1002/fam.2846. URL: <https://graz.pure.elsevier.com/de/publications/development-of-a-numerically-efficient-approach-based-on-coupled-> (siehe S. 2, 3).
- [2] Simon Pletzer. *Gekoppelte CFD/FEM-Simulation von Brandversuchen zur Bestimmung des Rauchgasaustritts*. Bd. 2020 (siehe S. 1, 2, 4, 24–26, 28–31, 42, 44, 58, 60, 62, 123).
- [3] Österreichisches Normungsinstitut. *ÖNORM EN 1363 - 1: Feuerwiderstandsprüfungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. 2012 (siehe S. 7, 8).
- [4] Österreichisches Normungsinstitut. *ÖNORM EN 1363 - 2: Feuerwiderstandsprüfungen Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren*. 2000 (siehe S. 7).
- [5] Österreichisches Normungsinstitut. *ÖNORM EN 1634 - 1: Feuerwiderstandsprüfungen und Rauchschutzprüfungen für Türen, Tore, Abschlüsse, Fenster und Baubeschläge Teil 1: Feuerwiderstandsprüfungen für Türen, Tore, Abschlüsse und Fenster*. 2009 (siehe S. 9).
- [6] Österreichisches Normungsinstitut. *ÖNORM EN 13501 - 2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. 2010 (siehe S. 9).
- [7] Nikolaus Hannoschöck. *Wärmeleitung und -transport*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 978-3-662-57571-0. DOI: 10.1007/978-3-662-57572-7 (siehe S. 14, 15).
- [8] H. lüth H. Ibach. *Festkörperphysik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-85794-5. DOI: 10.1007/978-3-540-85795-2 (siehe S. 14, 16).
- [9] Christoph Hochenauer. *Numerische Verfahren in der Energietechnik (Skriptum) - Hochenauer Christoph - 2019* (siehe S. 15, 31, 34, 35, 38).
- [10] Helfried Steiner. *Höhere Strömungslehre und Wärmeübertragung: Vorlesungsskriptum*. 2016 (siehe S. 15, 16, 39).
- [11] Raphael Langbauer. *Numerische Simulation des Wärmetransports durch Gips*. 2019 (siehe S. 13, 17, 24–26, 31).

- [12] Ludwig Fahrmeir, Thomas Kneib und Stefan Lang. *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin und Heidelberg: Springer, 2007. ISBN: 9783540339328. DOI: 10.1007/978-3-540-33933-5. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-200708029289> (siehe S. 17, 18).
- [13] Wienerberger Österreich GmbH - Werk & Lager St. Andrä. *Ziegelproduktion - Brenner Ziegel*. 2009. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=ZvVqEpceB88&ab\\_channel=Wienberger%26sterreichGmbH-Werk%26LagerSt.Andr%C3%A4](https://www.youtube.com/watch?v=ZvVqEpceB88&ab_channel=Wienberger%26sterreichGmbH-Werk%26LagerSt.Andr%C3%A4) (siehe S. 19).
- [14] A. Pech, H. Gangoly, P. Holzer, P. Maydl. *Ziegel im Hochbau Kapitel 3*. 2018 (siehe S. 10–12, 19, 21).
- [15] Thê-Duong Nguyen. *Étude du comportement au feu des maçonneries de briques en terre-cuite : approche expérimentale et modélisation du risque d'écaillage* (siehe S. 19, 20, 58, 61, 63, 65).
- [16] Thê-Duong Nguyen und Fekri Meftah. »Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment«. In: *Fire Safety Journal* 66 (2014), S. 35–45. ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.017 (siehe S. 19–22, 59, 61, 81).
- [17] Baustatik MediaWiki. *Heißbemessung Stahlbetonbau*. 2020. URL: [https://baustatik-wiki.fiw.hs-wismar.de/mediawiki/index.php/Hei%C3%9Fbemessung\\_Stahlbetonbau](https://baustatik-wiki.fiw.hs-wismar.de/mediawiki/index.php/Hei%C3%9Fbemessung_Stahlbetonbau) (siehe S. 23).
- [18] Josef Zirnbauer Rüdiger Müller. »Grundlagen der Heißbemessung von Stahlbetonbauteilen auf der Basis des EC2«. In: (2007) (siehe S. 23).
- [19] K. Ghazi Wakili, M. Koebel, T. Glaettli und M. Hofer. »Thermal conductivity of gypsum boards beyond dehydration temperature«. In: *Fire and Materials* 39.1 (2015), S. 85–94. ISSN: 03080501. DOI: 10.1002/fam.2234 (siehe S. 24).
- [20] Jürgen Burmester, Josef Dillinger, Walter Escherich, Eckhard Ignatowitz, Stefan Oesterle, Ludwig Reißler, Andreas Stephan, Reinhard Vetter und Falko Wieneke. *Fachkunde Metall*. 58., neu bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Europa Lehrmittel. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co.KG, 2018. ISBN: 9783808512906 (siehe S. 27, 28).
- [21] Chao Zhang, Julio G. Silva, Craig Weinschenk, Daisuke Kamikawa und Yuji Hasemi. »Simulation Methodology for Coupled Fire-Structure Analysis: Modeling Localized Fire Tests on a Steel Column«. In: *Fire Technology* 52.1 (2016), S. 239–262. ISSN: 0015-2684. DOI: 10.1007/s10694-015-0495-9 (siehe S. 29, 30).
- [22] *Mauerziegel - Anforderungen und Prüfungen: Klassifizierung und Kennzeichnung ; ergänzende Bestimmungen zu ÖNORM EN 771-1*. Ausg.: 2004-12-01, Ersatz für Ausg. 1999-06 und ÖNORM B 3201:1996-10. Bd. 3200. ÖNORM : B. Wien: Österr. Normungsinstit., 2004 (siehe S. 10).
- [23] Knauf. *Trockenbauwandprofile*. 2021. URL: <https://www.knauf.at> (siehe S. 12).

- 
- [24] J.h Ferzinger und M. Peric. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-67586-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68228-8 (siehe S. 31).
- [25] Olgierd C. Zienkiewicz und Robert L. Taylor. *The finite element method* (siehe S. 31, 32).
- [26] Wilhelm Rust. *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Kinematik, Material*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 3658133775 (siehe S. 31, 34–36).
- [27] Markus Niffenegger und Klaus Reichlin. »The proper use of thermal expansion coefficients in finite element calculations«. In: *Nuclear Engineering and Design* 243 (2012), S. 356–359. ISSN: 00295493. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.12.006 (siehe S. 37).
- [28] Alex Grishin. *Modelling Thermal Expansion In Ansys*. 2017. URL: <https://www.padtinc.com/blog/secant-or-instantaneous-cte-understanding-thermal-expansion-modeling-ansys-mechanical/> (siehe S. 38).
- [29] Markus Mayrhofer. *Simulation und Optimierung der reaktiven Strömungen in Öfen für Brandversuche*. 2017 (siehe S. 41, 58).
- [30] Novoferm Entwicklung. »Vorlagedatei für die Entwicklungsabteilung«. In: () (siehe S. 44).
- [31] Bernhard Klemm. *CFD-Simulation der Gasphasenverbrennung*. 2019 (siehe S. 58).
- [32] Thê-Duong Nguyen und Fekri Meftah. »Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis«. In: *Fire Safety Journal* 52 (2012), S. 55–64. ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.06.001 (siehe S. 61).
- [33] Rene Prieler, Peter Kitzmüller, Stefan Thumser, Günther Schwabegger, Erhard Kaschnitz und Christoph Hochenauer. »Experimental analysis of moisture transfer and phase change in porous insulation exposed to fire and its effect on heat transfer«. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 160.4 (2020), S. 120207. ISSN: 00179310. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120207 (siehe S. 76–78, 103, 104, 107, 108).