Untersuchungen an Mauerwerkswänden aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einseitiger Brandbeanspruchung

Vom Fachbereich
Bauingenieurwesen
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität
Kaiserslautern-Landau
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte

DISSERTATION

von

Heiner Kruse M.Sc.

aus München

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. K. Körkemeyer
1. Berichterstatter:	apl. Prof. Dr.-Ing. C. Thiele
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Glock
Tag der mündlichen Prüfung:	01.10.2024

Kaiserslautern 2024

(D 386)

Heiner Kruse M.Sc.

Untersuchungen an Mauerwerkswänden aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einseitiger Brandbeanspruchung

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) in den Jahren 2018 bis 2024.

Meine Forschungstätigkeit wurde maßgeblich durch das industriegetragene Netzwerk zur Förderung von Forschung, Transfer und Innovation im Mittelstand (AIF) gefördert. Bei dem Förderangebot der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), wird die Brücke zwischen Grundlagenforschung und der wirtschaftlichen Anwendung geschlagen. Durch das Projekt „Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von wärmedämmendem Ziegelmauerwerk durch Erhöhung des Feuerwiderstandes bei unterschiedlichen statischen Ausnutzungsgraden auf Basis eines vereinfachten Nachweisverfahrens“ [1], welches zusammen mit dem Institut für Ziegelforschung Essen e. V. (IZF) bearbeitet wurde, war der Grundstein für die vorliegende Dissertationsschrift gelegt. Für die Finanzierung durch die AIF IGF und die Zusammenarbeit mit dem IZF danke ich ganz herzlich.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Frau apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung, insbesondere bei der Durchführung meiner Forschungstätigkeiten und dem Anfertigen der Dissertation. Ich konnte in dieser Zeit wichtige Erfahrungen sammeln, aufschlussreiche Diskussionen führen sowie nachhaltige Kontakte knüpfen.

Ich danke dem Leiter des Fachgebiets Massivbau und Baukonstruktion Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Glock für die Übernahme des Korreferates und die Erstellung des zweiten Berichts. Weiterhin möchte ich mich für die Betreuung während der gemeinsamen Zeit an der RPTU bedanken. Frau apl. Prof. Dr. rer. nat. Svenja Carrigan danke ich für die Übernahme der Leitung der Promotionskommission.

Allen technischen Mitarbeitern des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau der RPTU, insbesondere Peter Klein, sei für die Unterstützung bei der Herstellung von Prüfkörpern und der Durchführung der experimentellen Untersuchungen gedankt. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich auch besonders bei meinen studentischen Hilfskräften und den Studenten, welche in Bezug auf die genannte Thematik mitgeholfen oder eine studentische Arbeit bei mir angefertigt haben. Ich weiß die zahlreichen Stunden der geleisteten Arbeit sehr zu schätzen.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen für die großartige Zeit am Fachgebiet und darüber hinaus. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Florian Wendel und Frau Dipl.-Ing. Sergia Balzer sowie Darian Stork, M. Eng. für ihre Unterstützung, den fachlichen Austausch und den persönlichen Kontakt. Abschließend bedanke ich mich herzlich bei meiner Familie für die fortwährende und uneingeschränkte Förderung bei der Erreichung meiner Ziele.

Kaiserslautern, im Oktober 2024

Heiner Kruse

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ..... **vii**

Abstract ..... **ix**

Abkürzungsverzeichnis ..... **xi**

1 Einführung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung 3

1.3 Vorgehensweise 3

2 Grundlagen und Stand der Technik **5**

2.1 Mauerwerk 5

2.1.1 Ziegelmauerwerk 6

2.1.2 Wärmedämmende Hochlochziegel 8

2.2 Ermittlung des Feuerwiderstandes von Mauerwerkswänden 9

2.2.1 Musterbauordnung 9

2.2.2 Baustoffklassen 11

2.2.3 Klassifizierungsmöglichkeiten der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden 12

2.2.4 Feuerwiderstandsprüfungen 13

2.2.5 Bemessung einer Mauerwerkswand im Kalt- und Brandfall 16

3 Auswertung vorhandener Prüfberichte **22**

3.1 Lagerungsdauer 25

3.2 Horizontales Verformungsverhalten 25

3.3 Einfluss Putz 30

3.4 Stegdicken 31

3.4.1 Außenlängssteg 31

3.4.2 Summe Materialstärke in Wanddickenrichtung 32

3.5 Weitere Ziegeleigenschaften 32

4 Experimentelle Untersuchungen **34**

4.1 Ziegelauswahl und Bestimmung derer Eigenschaften 34

4.1.1 Voruntersuchungen 35

4.1.2 Technische Daten der wärmedämmenden Hochlochziegel 38

4.1.3 Bestimmung der Ziegeleigenschaften 40

4.1.4 Technische Daten des Dünnbettmörtels maxit mur 900 D 47

4.1.5 Technische Daten vom Außen- und Innenputz 47

4.1.6 Prüfkörperherstellung 50
4.2 Mechanische Untersuchungen im Normaltemperaturbereich 50
4.2.1 Teilflächenbelastungen 50
4.2.2 Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit 53
4.3 Untersuchung thermischer Materialeigenschaften 55
4.3.1 Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten 55
4.3.2 Bestimmung der Resttragfähigkeit nach definierter Brandbeanspruchung 56
4.4 Feuerwiderstandsprüfungen 60
4.4.1 Versuchsserie A (H x L = 3,0 m x 1,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m) 60
4.4.2 Versuchsserie B (H x L = 3,0 m x 1,0 m mit verschiedenartigen Nennmaßdicken ungleich 0,365 m) 64
4.4.3 Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m) 65
4.4.4 Versuchsserie D (H x L = 3,0 m x 3,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m) 68

5 Versuchsauswertung 70
5.1 Gegenüberstellung der Messdaten und Versuchsbeobachtungen 70
5.1.1 Verformungen während der Vorbelastung 71
5.1.2 Verformungen während des Brandverlaufes 74
5.1.3 Einfluss der Wandschlankheit 85
5.1.4 Temperaturmessungen 92
5.1.5 Einfluss der Prüfkörperlänge 94
5.1.6 Einfluss von Putz 96
5.1.7 Schädigungen und Versagensart 97
5.1.8 Variation der Versuchsergebnisse im Brandfall 99
5.1.9 Vergleich der unterschiedlichen Ziegeltypen 101
5.2 Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung 102
5.2.1 Grundlegendes zur Versuchsauswertung 106
5.2.2 Unterschiedliche Varianten der Auswertung 110
5.2.3 Gewählte Auswertevariante 113
5.3 Auswertung durchgeführter Feuerwiderstandsprüfungen gemäß DIN EN 1363-1 [11] 115
5.3.1 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und B 116
5.3.2 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C 122

5.3.3 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D 127

6 Mindestfeuerwiderstandsklassen und erweiterter Anwendungsbereich .. 129

6.1 Mindestfeuerwiderstandsklassen 129

6.2 Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m 136

6.3 Anwendung und Validierung anhand von Exkursversuchen 141

6.3.1 Mindestfeuerwiderstandsklassen 142

6.3.2 Wandlänge 143

6.3.3 Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m 144

6.4 Vereinfachtes Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer 146

7 Zusammenfassung und Ausblick 155

7.1 Zusammenfassung 155

7.2 Ausblick 156

8 Literatur 158

Abbildungsverzeichnis 166

Tabellenverzeichnis 169

Anlage A Probekörperzeichnungen 171

Anlage B Prüfzeugnisse der Ziegel 178

Anlage C Prüfergebnisse der Mörtel- und Putzprismen 197

Anlage D Verwendete Messtechnik 209

Anlage E Messdaten der Versuchsserie A 210

E.1 A1-MZ70-365mm-375kN 210

E.2 A2-MZ70-365mm-240kN 216

E.3 A3-MZ70-365mm-200kN 222

E.4 A4-W07 V-365mm-509kN 228

E.5 A5-W07 V-365mm-375kN 234

E.6 A6-W07 V-365mm-280kN 240

E.7 A7-W07 UV-365mm-375kN 246

E.8 A8-W07 UV-365mm-280kN 252
E.9 A9-W07 UV-365mm-200kN 258
E.10 A10-W07 UV NG-365mm-375kN 264
E.11 A11-W07 UV NG-365mm-200kN 269
E.12 A12-W07 UV NG-365mm-135kN 275

Anlage F Messdaten der Versuchsserie B 281
F.1 B1-MZ70-190mm-200kN 281
F.2 B2-MZ70-190mm-200kN 287
F.3 B3-MZ70-240mm-200kN 293
F.4 B4-MZ70-490mm-375kN 298
F.5 B5-W07 V-175mm-200kN 304
F.6 B6-W07 V-175mm-154kN 310
F.7 B7-W07 UV-175mm-200kN 316
F.8 B8-W07 UV-175mm-82kN 321

Anlage G Messdaten der Versuchsserie C 327
G.1 C1-MZ70-365mm-850kN 327
G.2 C2-MZ70-365mm-700kN 332
G.3 C3-MZ70-365mm-512kN 337
G.4 C4-MZ70-365mm-375kN 342
G.5 C5-W07 V-365mm-512kN 347
G.6 C6-W07 V-365mm-460kN 352
G.7 C7-W07 V-365mm-425kN 357
G.8 C8-W07 V-365mm-365kN 363
G.9 C9-W07 UV-365mm-512kN 368
G.10 C10-W07 UV-365mm-485kN 372
G.11 C11-W07 UV-365mm-460kN 376
G.12 C12-W07 UV-365mm-375kN 380

Anlage H Messdaten des Versuchs D1-MZ70-365mm-200kN/m 384

Anlage I Protokolle Resttragfähigkeit nach Brandbeanspruchung 390

Anlage J Messdaten der Versuchsserie E 396
J.1 E1-WS09 V-365mm-500kN 396
J.2 E2-WS09 V-365mm-350kN 403
J.3 E3-WS09 V-365mm-600kN 409
J.4 E4-WS09 V-365mm-600kN 415
J.5 E5-WS09 V-365mm-1000kN 420

J.6 E6-WS09 V-365mm-1140kN 424
J7 E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen. 429
J.8 E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen. 435

Lebenslauf 444

Kurzfassung

Gemäß Statistik sind in den Jahren 2002 bis 2015 in Deutschland im Mittel ca. 187.000 Wohnungsbrände ausgebrochen [2]. Umgerechnet bedeutet dies, dass es ca. alle drei Minuten brennt. Die oberste Priorität im Brandschutz ist die Rettung von Menschen, Tieren und Sachgütern [3]. Aus diesem Grund gilt es Gebäude so zu errichten und in Stand zu halten, dass der Entstehung und der Ausbreitung eines Brandes vorgebeugt wird [3].

Der Ziegel ist für den Wohnungsbau der am meist verwendete Baustoff [4]. Bei der Wahl der Ziegel wird zunehmend Wert auf die Nachhaltigkeit gelegt, auch die Ökobilanz der Wandbaustoffe besitzt neben statischen und bauphysikalischen Aspekten eine entscheidende Rolle. Durch wärmedämmende Ziegel können Energie- und Heizkosten reduziert werden. In Deutschland wird der Feuerwiderstand von wärmedämmendem Ziegelmauerwerk für die Festlegung in Zulassungen und Bauartgenehmigungen derzeit auf Basis großformatiger Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 3,0 m x 3,0 m) nach DIN EN 1365-1 [5] definiert. Diese Prüfungen sind sehr zeit- und kostenintensiv. Deshalb werden meist nur punktuelle Feuerwiderstandsprüfungen für einen Ziegel durchgeführt. Für die Erweiterung oder Verallgemeinerung des Anwendungsbereiches einzelner Feuerwiderstandsprüfungen für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk existieren keine wissenschaftlichen Grundlagen.

Aktuell sind in DIN EN 1996-1-2 [6] im Anhang D keine Bemessungswerte der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Linie für wärmedämmende Hochlochziegel aufgeführt, welche für Berechnungsmodelle benötigt werden. Ebenso wird das dort beschriebene genauere Berechnungsverfahren für den Brandfall gemäß dem nationalen Anhang ausgeschlossen, genau wie das vereinfachte Rechenverfahren im Anhang C. Entsprechend dem nationalen Anhang DIN EN 1996-1-2 [7] existieren im Anhang B Tabellen, mithilfe derer Ziegelmauerwerk unter Berücksichtigung verschiedener Materialeigenschaften in Feuerwiderstandsklassen eingestuft werden kann. Die Tabellenwerte sind jedoch nur bei Verwendung von Normalmauermörtel und/oder Leichtmauermörtel anwendbar. Für Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln, welche üblicherweise im Dünnbettverfahren gedeckelt hergestellt werden, existieren nach aktuellem Stand der Technik keine in Deutschland zugelassenen Berechnungsverfahren oder vereinfachten Tabellenwerte für die Einstufung in Feuerwiderstandsklassen.

Durch eine Auswertung vorhandener Prüfberichte von Feuerwiderstandsprüfungen sowie gezielten Brandversuchen sollen Angaben zum Feuerwiderstand für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren definiert werden, die zukünftig ohne eine Feuerwiderstandsprüfung verwendet werden können. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Möglichkeit der Festlegung erhöhter Feuerwiderstandsdauern bei geringeren Ausnutzungsfaktoren bzw. höheren Ausnutzungsfaktoren für geringere Feuerwiderstandsdauern gelegt. Dies trägt zu einer erheblichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit einzelner Ziegel bei. Zudem wird für monolithisches wärmedämmendes Ziegelmauerwerk untersucht, inwiefern mit kostengünstigeren kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) eine zuverlässige Bewertung des Feuerwiderstands ermöglicht werden kann bzw. welche Anpassungen für eine Übertragbarkeit der Feuerwiderstände nötig sind.

Abstract

According to statistics, an average of around 187.000 residential fires broke out in Germany between 2002 and 2015 [2]. Converted, this means that there is a fire approximately every three minutes. The top priority in fire protection is to save people, animals and property [3]. For this reason, buildings must be constructed and maintained in such a way that the development and spread of fire is prevented [3].

Brick is the most commonly used building material for residential construction [4]. When choosing bricks, increasing emphasis is being placed on sustainability, whereby it is not only the ecological balance of wall-building materials that plays a decisive role. Energy and heating costs can be reduced by using thermally insulating bricks. In Germany, the fire resistance of thermally insulating brick masonry is currently defined in accordance with DIN EN 1365-1 [5] for specification in approvals or type approvals on the basis of large-format fire tests (H x L = 3.0 m x 3.0 m). These tests are very time-consuming and cost-intensive. For this reason, usually only punctual fire resistance tests are carried out for a product. There is no scientific basis for extending or generalizing the scope of individual fire resistance tests for heat-insulating masonry.

Currently, DIN EN 1996-1-2 [6] does not include any design values for the temperature-dependent stress-strain curve for thermally insulating vertically perforated bricks in Annex D, which are required for calculation models, among other things. Also, the more precise calculation method for the fire case described there is excluded according to the national annex, just like the simplified calculation method in Annex C. In the national annex of DIN EN 1996-1-2 [7], there are tables in Annex B, whereby brick masonry can be classified into fire resistance classes taking into account various material properties. However, the table values given in the standard can only be applied, among other things, when normal masonry mortar and/or lightweight masonry mortar is used. For masonry made of thermally insulating vertically perforated bricks, which are usually produced in a capped manner using the thin-bed method, there are no calculation methods or simplified table values approved in Germany for rapid classification into fire resistance classes according to the current state of the art.

By evaluating existing test reports from fire resistance tests and specific fire tests, data on fire resistance for thermally insulating brick masonry with different utilization factors are to be defined, which can be used in future without fire resistance testing. Special attention is paid to the possibility of defining increased fire resistance durations at lower utilization factors or higher utilization factors for lower fire resistance durations. This contributes to a considerable increase in the economic efficiency of individual bricks. In addition, for monolithic, heat-insulating brick masonry, it is being investigated to what extent a reliable assessment of fire resistance can be made possible with cheaper, small-format fire resistance tests (H x L = 1.5 m x 1.0 m) and what adjustments are necessary for the transferability of fire resistance.

Abkürzungsverzeichnis

RPTU	Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
AIF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IZF	Institut für Ziegelforschung Essen e. V.
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
NA	Nationaler Anhang
GK	Gebäudeklasse
OKF	Oberkante Fußboden
NE	Nutzungseinheiten
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
NDP	National festzulegende Parameter (nationally determined parameter)
MPA	Materialprüfanstalt für das Bauwesen
BS	Braunschweig
MFPA	Gesellschaft für Materialforschung und Prüfanstalt für das Bauwesen
MZ70	Verfüllter Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 (Lücking)
W07 V	Verfüllter kleingelochter Ziegel UNIPOR W07 CORISO (Bergmann)
W07 UV	Unverfüllter kleingelochter Ziegel UNIPOR W07 CORISO (Bergmann)
W07 UV NG	W07 UV aber ohne gedeckelte Lagerfuge
Kleinprüfkörper	Prüfkörper aus fünf Ziegelreihen in der Höhe und vier in der Länge (H x L = 1,5 m x 1,0 m)
f_k-Wert	Charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk
EAD	European Assessment Document
TR	Potentiometrischer Wegaufnehmer
WA	Induktiver Wegaufnehmer
OM	Optisches Messsystem
TE	Thermoelement
WS09 V	Verfüllter kleingelochter Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS (Leipfinger Bader)

1 Einführung

Für den Neubau von Wohnungen werden überwiegend Ziegel verwendet [4]. Stand der Technik sind wärmedämmende Hochlochziegel, für welche aktuell keine tabellarischen Werte für eine Klassifizierung der Feuerwiderstandsdauer existieren [7]. Ziel der Dissertationsschrift ist es, diese Lücke zu schließen sowie eine Alternative zu der aktuellen Feuerwiderstandsprüfung gemäß DIN EN 1365-1 [5] zu definieren. Nachdem in Kapitel 1.1 die Problemstellung detaillierter erläutert wird und in Kapitel 1.2 die Zielsetzung genauer definiert wird, folgt in Kapitel 1.3 der schematische Aufbau der Dissertationsschrift zur Erreichung der Ziele.

1.1 Problemstellung

Der Bedarf an Baustoffen mit stetig steigenden Anforderungen an den Wärme-, Schall- und Brandschutz wächst kontinuierlich. Dies gilt auch für die Bauweise mit Mauerwerk, welche hauptsächlich im Wohnungsbau verwendet wird. Nach der im Februar 2023 veröffentlichten Wohnungsmarktprognose, die einen Ausblick bis 2035 gibt, wird die Zahl der Wohnungen durch Neubauten in Deutschland ansteigen [8].

In Bezug auf die Bauweise wurden gemäß einer Studie der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerksbau (DGfM) [9] im Jahr 2015 rund 76 % aller Wände für den Neubau von Wohngebäuden aus Mauerwerk errichtet. Dieser marktführende Einsatz von Mauerwerk im Wohnungsbau setzte sich auch in den folgenden Jahren fort, wie eine Studie aus dem Jahr 2021 zeigt [4]. Die Ergebnisse sind der Abb. 1.1 zu entnehmen.

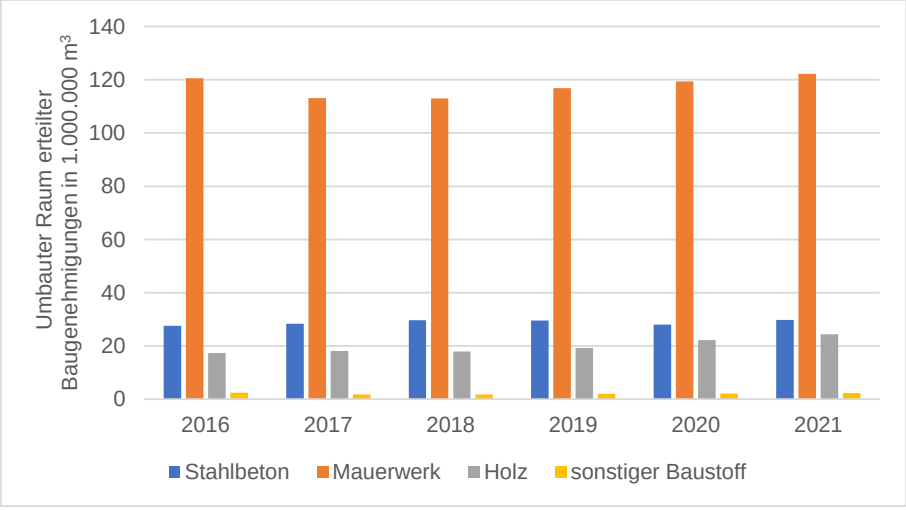


Abb. 1.1: Vergleich der in Deutschland bei dem Neubau von Wohnungen verwendeten Baustoffe (umbauter Raum nach erteilten Baugenehmigungen) [4]

Werden die aus der Statistik „Bauen und Wohnen - Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff“ in Abb. 1.1 unter Mauerwerk zusammengefassten Baustoffe separiert betrachtet, ist der Abb. 1.2 zu

entnehmen, dass Ziegel im Neubau von Wohnungen kontinuierlich der am meisten verwendete Baustoff für Mauerwerk darstellt [4].

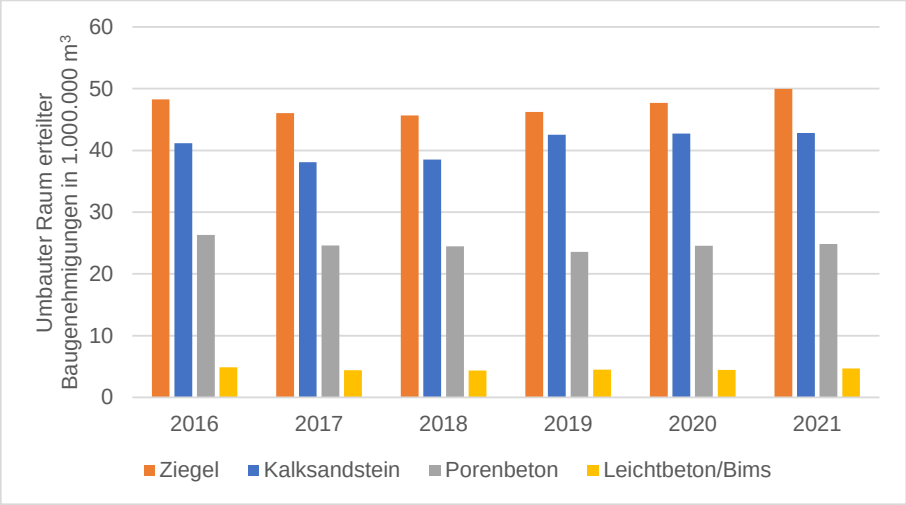


Abb. 1.2: Vergleich der in Deutschland bei dem Neubau von Wohnungen im Bereich Mauerwerk verwendeten Baustoffe (umbauter Raum nach erteilten Baugenehmigungen) [4]

Der Bedarf an Ziegelprodukten für den Mauerwerksbau ist hoch, deshalb muss die Ziegelindustrie zeitnah mit marktgerechten Produkten reagieren, welche die aktuellen bauphysikalischen Anforderungen zum Wärme-, Schall- und Brandschutz erfüllen. Ebenso gilt es bei der Ziegelproduktion Ressourcen einzusparen und den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid auf ein Minimum zu begrenzen. Aus diesem Grund sind die Innovationszyklen für Ziegel sehr kurz und es werden in kurzen Zeitintervallen neue Ziegel entwickelt und am Markt eingeführt. Dies beinhaltet nicht nur zielführende Anpassungen der geometrischen Lochbild- und Stegausbildung sowie den Einsatz von Füllstoffen als hochwärmedämmende Komponente, sondern auch innovative Maßnahmen rohstoffseitiger bzw. brenntechnischer Optimierungen, um die Ziegel umweltfreundlicher produzieren zu können. Änderungen in Normen gehen mit einem großen zeitlichen Aufwand einher. Aus diesem Grund können genannte kurzfristige und ständige Anpassungen der Ziegel nicht zeitnah in den Normen erfasst werden, weshalb ein Großteil aller verarbeiteten Ziegel über Zulassungen geregelt wird. Die größte Gruppe dieser Ziegel stellen die Planhochloch- oder auch allgemein Planziegel mit planeben geschliffenen Lagerflächen dar. Diese werden üblicherweise im Dünnbettmörtel-Verfahren ausgeführt. [10]

Die Verbesserung nur einer bauphysikalischen Eigenschaft steht in unterschiedlichen Wechselwirkungen mit den übrigen bauphysikalischen Eigenschaften. Beispielsweise reduziert eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit aufgrund einer rohstoffbedingten Porositätszunahme meist den Schallschutz bzw. die zulässige mechanische Belastbarkeit. In Bezug auf den Brandschutz erfolgt für Ziegelmauerwerk eine Einteilung in Feuerwiderstandsklassen. Für die Klassifizierung der Feuerwiderstandsdauer werden aktuell sehr zeit- und kostenintensive Feuerwiderstandsprüfungen punktuell für ein Produkt

gemäß den europäisch harmonisierten Normen DIN EN 1363-1 [11], DIN EN 1363-2:1999 [12] und DIN EN 1365-1 [5] an geschosshohen Wänden durchgeführt.

Im nationalen Anhang der Norm DIN EN 1996-1-2 [7] sind nach aktuellem Stand der Technik Tabellenwerte für eine Einstufung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden aufgeführt. Mithilfe dieser kann bei verschiedenen Materialeigenschaften in Kombination mit unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren eine schnelle Klassifikation der Feuerwiderstandsklasse erfolgen. Aufgrund dessen kann für die in DIN EN 1996-1-2/NA [7] aufgeführten Ziegel auf eine Feuerwiderstandsprüfung verzichtet werden. Die Tabellenwerte für Ziegelmauerwerk schließen wärmedämmenden Hochlochziegel aus. Alternative Heißbemessungen in Form von Berechnungsverfahren sind in Deutschland nicht zulässig [7].

1.2 Zielsetzung

Durch die Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen für Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln soll in Zukunft eine einfache und schnelle Klassifizierung des Feuerwiderstandes erfolgen. Die im Rahmen von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren geforderten Feuerwiderstandsprüfungen könnten dadurch entfallen. Im Zuge dessen wird untersucht, ob Unterschiede im Brandfall für verschiedenartige wärmedämmende Hochlochziegel existieren und wie diese zu berücksichtigen sind. Dafür werden unter anderem Prüfberichte verschiedener wärmedämmender Hochlochziegel in Hinblick auf deren Eigenschaften und Merkmale analysiert.

Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Beurteilung der Übertragbarkeit kleinformatiger Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) als Alternative zu den aufwendigeren großformatigen Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 3,0 m x 3,0 m) durchgeführt. Die Zeitspanne von der Planung bis zur Ausführung und anschließenden Auswertung großformatiger Feuerwiderstandsprüfungen beträgt mehrere Monate, je nach Auslastung und Verfügbarkeit der Prüfinstitute.

1.3 Vorgehensweise

Die Gliederung der Dissertationsschrift kann Abb. 1.3 entnommen werden. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, werden an die Problemstellung und Zielsetzung anknüpfend die Grundlagen und der Stand der Technik beschrieben. Im Anschluss werden Prüfberichte von Feuerwiderstandsprüfungen mit wärmedämmenden Hochlochziegeln ausgewertet. Ebenfalls erfolgt die Auswahl der wärmedämmenden Hochlochziegel, des Putzes und des Mörtels. Im Anschluss werden klein- und großformatige Versuche im Kalt- und Brandfall an den Einzelkomponenten sowie an unterschiedlich großen Prüfkörpern durchgeführt und ausgewertet. Anhand der Untersuchungen erfolgt die Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmende Hochlochziegel. Des Weiteren werden Anpassungsfaktoren für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen resultierend aus einer kleineren Prüfkörpergeometrie definiert. Eine Anwendung und Validierung der Mindestfeuerwiderstandsklassen und Lasterhöhungsfaktoren erfolgt mittels Exkursversuche. Zum Schluss werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

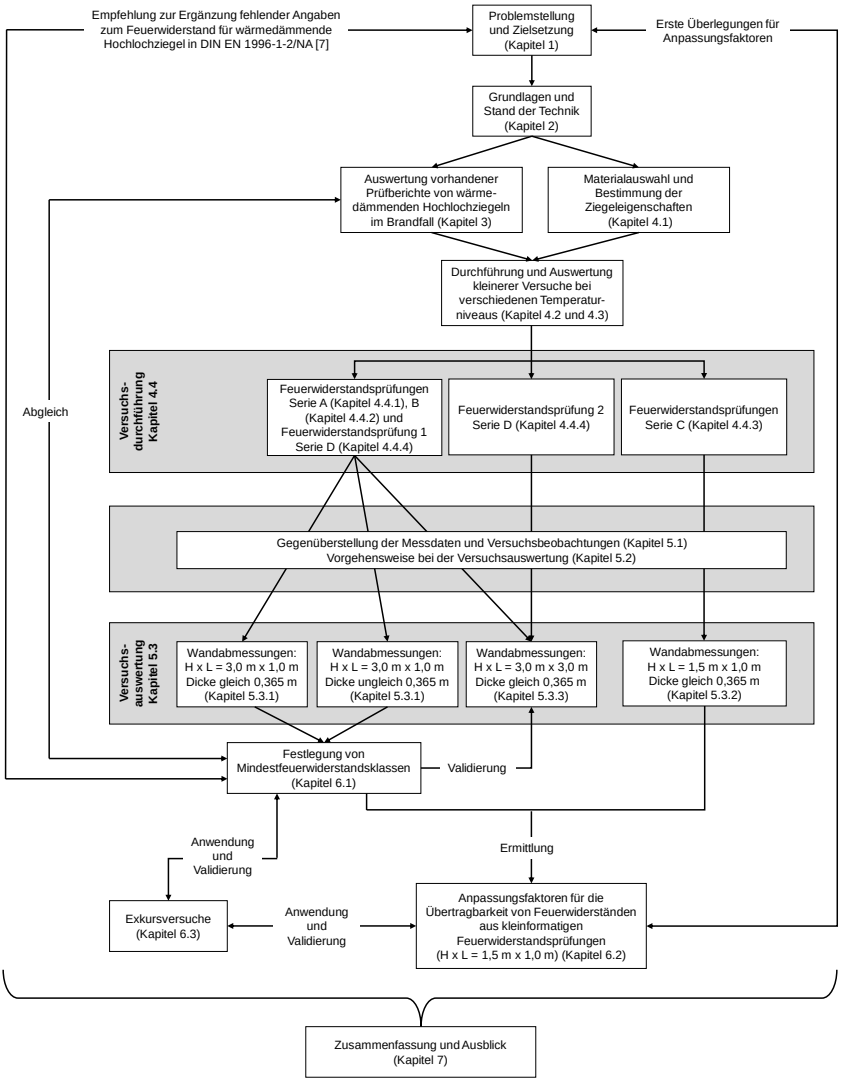


Abb. 1.3: Struktur der Dissertationsschrift

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der aktuelle Stand der Technik aufgearbeitet. Es werden die Komponenten einer Mauerwerkswand und deren Funktion erläutert. Im weiteren Verlauf werden die zu untersuchenden wärmedämmenden Hochlochziegel genauer erforscht, da für diese aktuell im nationalen Anhang DIN EN 1996-1-2 [7] keine tabellarischen Feuerwiderstandsdauern existieren. Es folgen die Anforderungen einer Mauerwerkswand an den Brandschutz und das Nachweiskonzept nach DIN EN 1996-1-2 [6]. Abschließend wird das allgemeine Nachweisverfahren (DIN EN 1996-1-1 [13]) für die Bestimmung des Bemessungswerts des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} einer Mauerwerkswand im Kaltfall erläutert, welcher für die Prüflastermittlung für eine Feuerwiderstandsprüfung benötigt wird.

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen. Das daraus generierte Wissen wird bei der Wahl der Prüflasten im Rahmen der experimentellen Untersuchungen sowie bei der anschließenden Auswertung berücksichtigt.

2.1 Mauerwerk

Bei Mauerwerk handelt es sich um ein aus Mauersteinen oder Natursteinen gefügtes Bauteil, welches aus einzelnen druckfesten Mauersteinen besteht. Die Räume zwischen den Mauersteinen werden bei einschaligem Mauerwerk als Lager- und Stoßfugen bezeichnet. Die Steine werden üblicherweise mit Mörtel kraft- und formschlüssig mittels einer übergreifenden Positionierung miteinander verbunden. Im Jahr 2017 wurden nach Angaben des Pestel-Instituts etwa 73 % aller deutschen Wohnneubauten aus Mauerwerk errichtet [14]. Bei den Ein- und Zweifamilienhäusern waren es sogar 75 % [14]. Zwei Drittel aller Wohnneubauten wurden demnach aus Ziegelmauerwerk, Kalksandsteinen, Porenbeton oder Leichtbetonsteinen errichtet [14]. Die hohen prozentualen Anteile konnten durch die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) im Rahmen einer vergleichenden Untersuchung bestätigt werden [15]. Erklären lassen sich diese unter anderem durch die einfache und schnelle Verarbeitbarkeit sowie den bauphysikalischen Vorteilen der Bauweise [15].

Unter Mauermörtel ist ein Gemisch aus Gesteinskörnung, Wasser und Bindemittel wie beispielsweise Kalk oder Zement zu verstehen. Bei der Gesteinskörnung, welche ein Größtkorn von höchstens 4,0 mm aufweisen sollte, wird häufig Sand verwendet. Der Rezeptur können Zusatzstoffe oder Zusatzmittel beigemischt werden, wodurch sich zum Beispiel die materialabhängige Haftscherfestigkeit verbessern lässt. Bei einer Vermischung aller genannten Zutaten erstarrt und erhärtet der Mörtel nach einiger Zeit. Es gibt verschiedene Arten von Mörtel. Während der Mauermörtel zum Verbinden von Mauersteinen dient (10,0 mm bis 12,0 mm Solldicke der Lagerfuge), können Bauteile mit Putzmörtel verputzt oder Oberflächen mit Reparaturmörtel ausgebessert werden.

Manche Mauersteine können mit Dünnbettmörtel, welcher als eine Art Klebstoff fungiert, dünn miteinander verbunden werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine exakte Maßgenauigkeit der Steine. Aus diesem Grund erfolgt beispielsweise bei Ziegeln, die mit Dünnbettmörtel vermauert werden, nach dem Brennen ein Parallelschleifen der Auflagerflächen (Planziegel). Bei Dünnbettmörtel beträgt das Größtkorn nur 1,0 mm. Aufgetragen wird dieser mit einer Schichtdicke von 1,0 mm bis 3,0 mm. Bei

dieser Fugenausbildung wird die Fugenbreite minimiert, wodurch sich in Bezug auf die energetische Betrachtung die möglichen Wärmebrücken reduzieren. Dünnbettmörtel besitzt zudem statische Vorteile, woraus eine höhere Mauerwerksdruckfestigkeit resultiert. Begründet wird dies aus den geringeren auftretenden Querkräften der dünneren Mörtelschicht.

In Bezug auf das Tragverhalten kann Mauerwerk gut Druckkräfte senkrecht zu den Lagerfugen abtragen. In Wandlängsrichtung ist die Druckfestigkeit (Scheibenschub) deutlich geringer [16]. Zugbeanspruchungen senkrecht zu den Lagerfugen können rechnerisch nicht aufgenommen werden. Zugbeanspruchungen parallel zu den Lagerfugen können aufgrund der Zugfestigkeit der Steine sowie dem Mauerwerksverband abgetragen werden [17]. Unter einem Verband ist eine Art der Anordnung der einzelnen Mauersteine zu verstehen, welche mit Mauermörtel versetzt miteinander verbunden werden. Schubbeanspruchte Wände tragen die einwirkende Last durch eine Kombination von Reibung und Haftverbund ab. Für die Aufnahme von vertikaler Biegebeanspruchung ist eine Druckkraft in der Mauerwerkswand erforderlich. Eine Biegebeanspruchung entsteht in Bereichen, in denen die Mauerwerkswände durch Horizontalkräfte senkrecht zu ihrer Fläche beansprucht werden (Plattenschub), wie es beispielsweise bei Kelleraußenwänden oder Außenwänden unter Windlasten der Fall ist [16].

Soll eine Wand nicht als Sichtmauerwerk ausgebildet werden, kann diese verputzt werden. Es existieren verschiedene Putzarten (Kalkputz, Kalkzementputz, Zementputz, Lehmputz, Gipsputz, Silikatputz sowie organische Kunstharzputze). Als Putz wird ein Belag bezeichnet, welcher nicht nur das Erscheinungsbild beeinflusst, sondern auch zur Schaffung eines glatten und dichten Untergrundes verwendet wird. Es können mehrere aufeinander abgestimmte Lagen Putz zu einem Putzsystem verbunden werden. Je nach Art kann ein Putz zur Regulierung der Raumfeuchte, zur Dämmung oder zur Wasserabweisung beitragen, bzw. auch zu einem verbesserten Brandschutz führen. Sofern eine Wand unverputzt hergestellt wird, bestimmen die Art des Verbands, der Mauerstein an sich sowie die Art und Ausbildung der Mörtelfugen das äußere Erscheinungsbild.

2.1.1 Ziegelmauerwerk

Bei einem Ziegel handelt es sich um einen künstlich hergestellten, gebrannten Stein. Verwendet werden für die Produktion überwiegend keramische Materialien wie Ton, Lehm oder tonhaltige Massen. Vereinzelt werden auch Zuschlagstoffe wie zum Beispiel Sägemehl oder Polystyrolkugeln während der Herstellung beigemischt. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Arten von Ziegeln. Angefangen von dem klassischen “Backstein“ hin zu Hochlochziegeln. Die Tab. 2.1 zeigt marktübliche Ziegel, welche je nach Anwendungsbereich verwendet werden.

Tab. 2.1: Übersicht Ziegelarten [10]

Ziegelarten	Definition
Vollziegel (Mz)	Mauerziegel, dessen Querschnitt durch Lochung senkrecht zur Lagerfläche bis 15 % gemindert sein darf oder Mulden aufweist, deren Anteil höchstens 20 % bezogen auf das Volumen der Ziegel betragen darf.
Hochlochziegel (HLz)	Mauerziegel mit einem oder mehreren geformten Löchern, die den Mauerstein rechtwinklig zur Lagerfläche ganz durchdringen.
Planziegel (P)	Mauerziegel mit besonderer Maßhaltigkeit hinsichtlich der Ziegelhöhe, der i.d.R. nach einer Zulassung geregelt ist.
Langlochziegel (Lz)	Mauerziegel mit Löchern, die den Mauerstein parallel zur Lagerfläche ganz durchdringen.
Vormauerziegel (V)	Ziegelstein (Verblender; auch mit strukturierter Oberfläche) zur Verwendung in ungeschütztem Mauerwerk. Der Frostwiderstand wird durch Prüfung nachgewiesen.
Klinker (K)	Oberflächig gesinterter Ziegelstein (Verblender; Oberfläche ggf. strukturiert) mit Anforderungen an die Wasseraufnahme, die Druckfestigkeitsklasse und die mittlere Nettotrockenrohdichte (Scherbenrohdichte).
Keramikvollklinker (KK)	Keramikklinker, dessen Querschnitt durch Lochung senkrecht zur Lagerfläche bis 15 % gemindert sein darf
Keramikhochlochklinker (KHK)	Keramikklinker mit senkrecht zur Lagerfläche verlaufender Lochungsart

Die verschiedenen Formen bzw. die Art der Lochung erfolgt durch das Pressen der Rohmaterialien durch ein Mundstück. Im Anschluss werden die geformten Ziegel getrocknet und in einem Ofen gebrannt.

Wärmedämmende Hochlochziegel basieren auf weiterentwickelten Hochlochziegeln, weshalb diese zunächst thematisiert werden. Hochlochziegel werden bei Temperaturen von 950 °C bis 1050 °C gebrannt, wodurch diese ihre Festigkeit erhalten. Hinsichtlich der Form und Abmessungen können Hochlochziegel ganz unterschiedliche Geometrien aufweisen. Neben einer glatten Seitenausbildung können auch kleinere Rillen oder vereinzelte Aussparungen (Nut) sowie herausstehende Ziegelkanten (Feder) sich über die Breite des Ziegels verteilt befinden. Einige Ziegel werden auch mit einem Griffloch hergestellt. Der Lochanteil von normativ geregelten Hochlochziegeln darf höchstens 50 % der Lagerfläche ausmachen. Je nach Form und Größe der Lochung wird ein Hochlochziegel mit den Buchstaben A, B oder C gekennzeichnet. Übliche Formate für Hochlochziegel sind 2 DF (B x H x L = 240 mm x 115 mm x 113 mm) bis zu 20 DF (B x H x L = 490 mm x 300 mm x 238 mm). [10]

2.1.2 Wärmedämmende Hochlochziegel

Aufgrund stetig steigender bauphysikalischer Anforderungen, in Bezug auf die Wärmedämmung, werden bei energieeffizienten Neubauten oder auch energetischen Sanierungen oftmals wärmedämmende Hochlochziegel verbaut. Diese sind hauptsächlich durch ihre dünnen Stege und vielen Hohlräume definiert. Zum einen ist eingeschlossene Luft ein guter Dämmstoff aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit, zum anderen können die Hohlräume auch mit Dämmstoffen verfüllt werden. Dadurch werden die Wärmeverluste nochmals minimiert. Bei den Dämmstoffen werden hauptsächlich Mineralwoll- oder Perlitfüllungen verwendet. Zur Reduzierung der Scherbenrohdichte erfolgt eine zusätzliche Porosierung, welche durch die Zugabe von feinen Zellulosefasern wie beispielsweise unbehandeltem Sägemehl oder bei der Papierherstellung anfallendem Papierfangstoff und/oder Polystyrol sowie Kohlenstaub erreicht wird [18]. Viele wärmedämmende Hochlochziegel weisen einen Gesamtlochquerschnitt größer 50 % auf. Dies ist mitunter ein Ausschlussgrund, wieso diese Ziegel keine Normziegel sind, sondern über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das Deutsche Institut für Bautechnik geregelt werden.

Wärmedämmende Hochlochziegel werden üblicherweise mit Dünnbettmörtel verarbeitet. Ein Grund dafür ist die gute Wärmeleitfähigkeit von Mörtel im Vergleich zu den wärmedämmenden Hochlochziegeln. Je geringer demnach die Schichtstärke des Mörtels, desto bessere Dämmeigenschaften des Mauerwerks. Die Lagerfuge wird üblicherweise gedeckelt (vollflächiger Mörtelauftrag) ausgebildet. Die Stoßfugen werden in der Regel nicht vermörtelt. Im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift werden die wärmedämmenden Hochlochziegel anhand ihrer Lochkammern klassifiziert. Besitzt ein Ziegel nicht mehr als drei verfüllte Lochkammern über die Länge, ist dieser ein Großkammerziegel. Großkammerziegel ohne Dämmung existieren aktuell auf dem Markt nicht, da diese unter anderem nicht mit einer gedeckelten Lagerfuge ausgebildet werden können. Kleingelochte Ziegel sind durch mehr als drei verfüllte bzw. unverfüllte Lochkammern über die Länge definiert. Daraus ergeben sich drei Ziegeltypen:

Typ 1: Wärmedämmende Großkammer-Hochlochziegel verfüllt
Typ 2: Wärmedämmende kleingelochte Hochlochziegel verfüllt
Typ 3: Wärmedämmende kleingelochte Hochlochziegel unverfüllt

Die Abb. 2.1 zeigt exemplarisch die Lochbildstrukturen von wärmedämmenden Hochlochziegeln. Links ist ein verfüllter wärmedämmender Großkammer-Hochlochziegel zu sehen und in der Mitte ein kleingelochter, ebenfalls mit Mineralwollfüllung. Rechts ist der gleiche Ziegel wie in der Mitte nur ohne Dämmstofffüllung abgebildet.

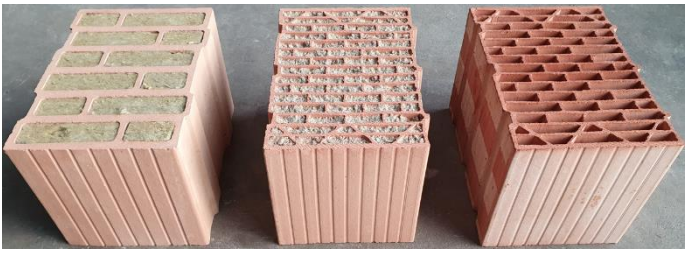


Abb. 2.1: Exemplarische Lochbildstrukturen von wärmedämmenden Hochlochziegeln mit Großkammern (Typ 1) sowie Kleinlochung verfüllt (Typ 2) und unverfüllt (Typ 3)

Eine weitere Eigenschaft von wärmedämmenden Hochlochziegeln ist, dass diese in der Regel eine Rohdichte von < 0,8 kg/dm³ aufweisen. Als Rohdichte wird die Masse eines Körpers bezogen auf das Volumen definiert. Im Vergleich dazu besitzt Vollziegelmauerwerk üblicherweise eine Rohdichte um die 1,1 kg/dm³ bis 1,6 kg/dm³. In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit λ_R, auch Wärmeleitkoeffizient genannt, weisen die speziell für eine gute Wärmedämmung entwickelten Ziegel im Regelfall ein λ_R von 0,10 W/mK bis 0,07 W/mK auf. Allgemein gilt, je kleiner λ_R, desto besser ist das Dämmvermögen eines Baustoffes. Die Wärmeleitfähigkeit für Vollziegelmauerwerk liegt bei λ_R = 0,69 W/mK bis 0,48 W/mK. Dies verdeutlicht noch einmal, wie gut die Wärmedämmeigenschaft von wärmedämmenden Hochlochziegeln ist. [19]

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist der Quotient aus Wärmestromdichte im stationären Zustand und der Temperaturdifferenz zwischen den Umgebungen auf jeder Seite eines Systems [19]. Je niedriger der Wärmedurchgangskoeffizient ist, welcher von der Wanddicke abhängt, umso besser ist die Dämmwirkung. Wände die aus wärmedämmenden Hochlochziegeln in einer Dicke von 365 mm hergestellt und zusätzlich verputzt worden sind, haben in der Regel einen Wärmedurchgangskoeffizient von 0,18 W/m²K bis 0,30 W/m²K [20].

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit werden wärmedämmende Hochlochziegel für ihre bestimmungsgemäße Verwendung als Außenwandziegel eingesetzt, bei welchen hohe Anforderungen an die Wärmedämmung gestellt werden. Dies ist beispielsweise bei Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie im Geschosswohnungsbau der Fall. Hier können die bauphysikalischen Anforderungen in der Regel mit Wanddicken von 300 mm oder 365 mm realisiert werden. Die genannten Ziegel können ebenfalls bei Passiv- oder Niedrigenergiehäusern bei entsprechender Wanddicke ohne zusätzlich Wärmedämmung verwendet werden. Üblicherweise werden Wände aus wärmedämmenden Hochlochziegeln beidseitig verputzt, wodurch auch eine Verbesserung der Wärmedämmung erfolgen kann. Die Druckfestigkeitsklassen der Ziegel reichen im Allgemeinen von 6 bis 12, wodurch charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k von 1,8 N/mm² bis 4,5 N/mm² erreicht werden [20].

2.2 Ermittlung des Feuerwiderstandes von Mauerwerkswänden

Wird ein Gebäude errichtet, gelten je nach Landesbauordnung unterschiedliche Anforderungen an den Brandschutz. Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf die Ermittlung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Wänden aus Mauerwerk gelegt. Die Klassifizierung erfolgt üblicherweise auf Grundlage einer zentrisch drückenden Normalkraft am Wandkopf. Die Feuerwiderstandsfähigkeit wird unter anderem für die Erstellung der tabellarischen Feuerwiderstände für wärmedämmende Hochlochziegel benötigt. Wichtige Prüfparameter gilt es zu erfassen, welche für die Definition kleinformatiger Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) benötigt werden.

2.2.1 Musterbauordnung

Der bauliche Brandschutz nimmt insbesondere in Deutschland einen hohen Stellenwert im Baurecht ein und wird über die jeweilige Bauordnung der Bundesländer geregelt. Die hauptsächlichen Schutzziele im Brandschutz sind in allen Bauordnungen gleich und werden wie folgt in der Musterbauordnung [3] definiert:

> *„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind."* [3]

Zum Erreichen dieser Schutzziele ist Ziegelmauerwerk aufgrund seiner nicht Brennbarkeit sehr gut geeignet. Allerdings ist die Voraussetzung für einen optimalen baulichen Brandschutz, dass nicht nur die richtigen Produkte eingesetzt, sondern auch die Bauteile sachgerecht ausgeführt werden.

Gemäß Musterbauordnung [3] werden Bauteile nach den Anforderungen an ihre Feuerwiderstandsfähigkeit unterschieden. Je nach Feuerwiderstandsdauer des Bauteils, ergeben sich unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen, welche jeweils in Abständen von 30 Minuten definiert sind:

- Feuerhemmend (F 30)
- Hochfeuerhemmend (F 60)
- Feuerbeständig (F 90)

Abhängig von der Gebäudeklasse müssen Wände unterschiedliche Feuerwiderstandsfähigkeiten aufweisen. Die Definitionen der Gebäudeklassen sowie die zugehörigen Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit sind Tab. 2.2 zu entnehmen. Abhängig von der Gebäudeklasse können zudem Gebäudeabschlusswände Anforderungen an eine mechanische Beanspruchung enthalten [3]. Diese wird in Tab. 2.2 mit dem Buchstaben "M" gekennzeichnet.

Tab. 2.2: Gebäudeklassen und deren Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit [3]

GK	Lage	Höhe OKF	NE	Feuerwiderstandsfähigkeit
1	Freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude			Tragende Wände: - Kellerwände: F 30
	Freistehende Gebäude	≤ 7 m	≤ 2 NE; $\sum \leq 400$ m²	Tragende Wände: - Kellerwände: F 30
2	Gebäude	≤ 7 m	≤ 2 NE; $\sum \leq 400$ m²	Tragende Wände: F 30 Kellerwände: F 30 Gebäudeabschlusswand: F 60
3	Sonstige Gebäude	≤ 7 m	-	Tragende Wände: F 30 Kellerwände: F 90 Gebäudeabschlusswand: F 60
4	Gebäude	≤ 13 m	< 400 m² je NE	Tragende Wände: F 60 Kellerwände: F 90 Gebäudeabschlusswand: F 60+M
5	Sonstige Gebäude	-	> 400 m² je NE	Tragende Wände: F 90 Kellerwände: F 90 Gebäudeabschlusswand: F 90+M

Wie Tab. 2.2 zu entnehmen ist, steigen die Anforderungen der Feuerwiderstandsfähigkeit mit zunehmender Gebäudehöhe an. Des Weiteren gilt gemäß Musterbauordnung [3], dass leichtentflammbare Baustoffe nicht verwendet werden dürfen, außer sie sind in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leichtentflammbar. In Kapitel 2.2 folgen die Definitionen des Brandverhaltens von Baustoffen. Zudem werden normative Anforderungen zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklassen analysiert.

2.2.2 Baustoffklassen

Baustoffe werden nach den Anforderungen an ihr Brandverhalten unterschieden. In Bezug auf Ziegelmauerwerk sind dies die Ziegel, deren Dämmstofffüllung und der Mörtel sowie ggf. vorhandener Putz. Das Baustoffverhalten und die Baustoffklassen sind gemäß DIN 4102-1 [21] bzw. entsprechender Euroklasse nach DIN EN 13501-1 [22] definiert und können der Tab. 2.3 entnommen werden.

Tab. 2.3: Baustoffklassen nach DIN 4102-1 [21] und entsprechender Euroklasse nach DIN EN 13501-1 [22]

Baustoffklasse	Euroklasse	Anforderungsniveau
A1 (Nichtbrennbar)	A1	Kein Beitrag zum Brand
A2 (Nichtbrennbar)	A2	Vernachlässigbarer Beitrag zum Brand
B1 (Schwerentflammbar)	B	Sehr geringer Beitrag zum Brand
	C	Geringer Beitrag zum Brand
B2 (Normalentflammbar)	D	Hinnehmbarer Beitrag zum Brand
	E	Hinnehmbares Brandverhalten
B3 (Leichtentflammbar)	F	Keine Anforderungen – für Bauteile nicht zugelassen

Grundsätzlich wird auf nationaler Ebene zwischen nicht brennbaren Baustoffklassen (A) und brennbaren Baustoffklassen (B) unterschieden. Die Einordnung der jeweiligen Baustoffe kann über genormte Feuerwiderstandsprüfungen oder über Angaben in Normen wie beispielsweise DIN 4102-4 [23] erfolgen. Auf europäischer Ebene sind die Euroklassen nach der Entscheidung der Europäischen Kommission im Jahr 2000 eingeführt worden [24].

Mauerziegel sind aus keramischem Material gebrannte Steine und demnach bei einer Klassifizierung in die Gruppe A1 einzuordnen [25]. Bei wärmedämmenden Hochlochziegeln können unterschiedlichste Materialien zum Verfüllen der Luftkammern zwischen den Stegen zum Einsatz kommen. Diese können in die Baustoffklasse A1 bis E eingeteilt werden. Nichtbrennbar und in die Baustoffe der Klasse A1 einzustufen ist Mörtel, mit welchem die Ziegel miteinander verbunden werden [25]. Diese enthalten keine brennbaren Bestandteile und tragen nicht zur Rauchentwicklung bei oder neigen zu einem brennenden Abtropfen. Gleiches gilt für den Putz. Ziegelmauerwerk ohne brennbare Dämmstofffüllung trägt demnach nicht zu einer Erhöhung der Brandlast im Anwendungsfall bei und verbrennt im Brandfall nicht. Folglich kann es mit eventuellen Ertüchtigungsmaßnahmen nach dem Brandfall weiterverwendet werden [25].

Werden einzelne Baustoffe zusammengefügt, entstehen Bauteile. Aus diesem Grund lässt eine Einstufung einzelner Baustoffe kein Rückschluss auf die Einstufung des Bauteils zu. Bauteile sind entweder durch eine Klassifizierung nach DIN EN 1996-1-2 [6] in Verbindung mit dem dazugehörigen nationalen Anhang [7] in Bezug auf den Brandschutz nachzuweisen oder mittels Feuerwiderstandsprüfungen am Tragwerk in eine Feuerwiderstandsklasse einzuordnen. In Kapitel 2.2.3 wird die Option einer Klassifizierung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden auf Grundlage von Tabellenwerten sowie alternativen Heißbemessungen gemäß DIN EN 1996-1-2/NA [7] vorgestellt.

2.2.3 Klassifizierungsmöglichkeiten der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden

In Bezug auf normativ geregelte Ziegel stehen dem Hersteller für die Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] sowie zugehörigen nationalen Anhang [7] Tabellenwerte für eine Einstufung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden zur Verfügung. Mithilfe dieser kann bei verschiedenen Materialeigenschaften in Kombination mit unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren eine schnelle Klassifikation der Feuerwiderstandsklasse erfolgen. Die in DIN EN 1996-1-2/NA [7] angegebenen Tabellenwerte für Ziegelmauerwerk sind nur bei Verwendung von Normalmauermörtel und/oder Leichtmauermörtel anwendbar. Für Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln, welche üblicherweise im Dünnbettverfahren mit gedeckelter Lagerfuge hergestellt werden, existieren keine vereinfachten Tabellenwerte, die für eine schnelle Einstufung in Feuerwiderstandsklassen erforderlich wären. Neben dem Ausschluss aufgrund des Mörtels gelten die Tabellen zudem nur für Normziegel sowie für Ziegel mit einer Rohdichte ≥ 0,71 kg/dm³ bis 0,80 kg/dm³. Wie in Kapitel 2.1.2 festgestellt, handelt es sich bei wärmedämmenden Hochlochziegeln in der Regel um Zulassungsziegel die auch geringere Rohdichten aufweisen können. Ist nur eins der drei genannten Kriterien (Regelung über Zulassungen, der Verwendung von Dünnbettmörtel und der geringeren Rohdichten) nicht erfüllt, ist eine Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit mittels der Tabellenwerte ausgeschlossen. [7]

Aufgrund fehlender Materialkennwerte und Erfahrungen sowie physikalisch-mechanischer Zusammenhänge sind alternative Heißbemessungen für die Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit mittels Simulationen oder anderen Berechnungen in Deutschland gemäß dem nationalen Anhang DIN EN 1996-1-2 [7] nicht zulässig. Allgemein kann das Verhalten von Bauteilen aus Mauerziegeln, explizit nicht aus wärmedämmenden Hochlochziegeln, im Brandfall noch nicht zuverlässig genug beschrieben werden. So liegen unter anderem in DIN EN 1996-1-2 [6] Anhang D nur Bemessungswerte der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerziegeln der Gruppe 1 mit einer definierten normierten Druckfestigkeit von 12 N/mm² bis 20 N/mm² und einer Trockenrohdichte von 900 kg/m³ bis 1200 kg/m³ für Berechnungsmodelle vor. Wärmedämmende Hochlochziegel haben in der Regel geringere Druckfestigkeiten und Trockenrohdichten. Weiter schließen die Bemessungswerte im Anhang C der DIN EN 1996-1-2 [6] für das vereinfachte Rechenverfahren wärmedämmende Hochlochziegel aus.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit für wärmedämmende Hochlochziegel nach aktuellem Stand der Technik nur über Feuerwiderstandsprüfungen erfolgen kann.

2.2.4 Feuerwiderstandsprüfungen

Feuerwiderstandsprüfungen dienen zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer sowie der Beschreibung des Feuerwiderstands. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung legt die Bauteilart und dessen Funktion den Versuchsaufbau fest. Wärmedämmende Hochlochziegel werden üblicherweise bei tragenden, raumabschließenden Wänden verbaut. Aus diesem Grund erfolgt die Fokussierung nachfolgend auf diese Wände und deren Prüfung zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer. Feuerwiderstandsprüfungen sollen möglichst repräsentativ sein, um eine möglichst große Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die reale Bauart zu gewährleisten [5]. Die Prüfkörperabmessungen ergeben sich demnach aus der praktischen Anwendung [5]. Ist ein Maß der Ausführung größer als 3,0 m, darf dieses gemäß DIN EN 1365-1 [5] bei der Feuerwiderstandsprüfung nicht kleiner als 3,0 m sein. Aus diesem Grund sind die üblichen Maße für Mauerwerkswände bei einer Feuerwiderstandsprüfung (H x L = 3,0 m x 3,0 m).

Nachfolgend werden die relevanten Prüfkriterien für Feuerwiderstandsprüfungen zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsdauer vorgestellt. Seit dem Jahr 2000 ist auf europäischer Ebene ein Klassifizierungssystem (REI) nach DIN EN 13501-2 [26] eingeführt worden. Dieses System differenziert die einzelnen Kriterien bei der Benennung deutlich stärker als das deutsche System nach DIN EN 4102-2 [27], welches nur eine Feuerwiderstandsdauer in Abhängigkeit vom Bauteil (F für Wände, Decken, Gebäudestützen und -unterzüge sowie Treppen) definiert. Grundsätzlich ist bei allen Versuchen eine visuelle Überprüfung der Bauteile und ein Vermerk von eventuellen Auffälligkeiten während des gesamten Prüfablaufes unabdingbar. Tragende und raumabschließende Bauteile müssen nach DIN EN 13501-2 [26] auf drei Eigenschaften, die den Feuerwiderstand beschreiben, nachgewiesen werden:

1. Tragfähigkeit (R)
2. Raumabschluss (E)
3. Isolation (I)

Ein Verlust der Tragfähigkeit ist als der Zeitpunkt definiert, ab dem das Bauteil nicht mehr in der Lage ist, die aufgebrachte Beanspruchung aufzunehmen. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung bei Wänden ist die Bauteilbeanspruchung eine Normalkraft, welche üblicherweise zentrisch in den Prüfkörper eingeleitet wird. Das Versagen des Raumabschlusses wird mittels einer Wattebausch-Prüfung, Spaltlehren und visueller Überprüfung auf Flammenbildung an der brandabgewandten Wandseite nachgewiesen. Die Isolationswirkung wird über den Temperaturanstieg an der brandabgewandten Wandseite überprüft. Dieses Kriterium dient der Begrenzung der Übertragung von Feuer bzw. Wärme auf die brandabgewandte Wandseite. Für die Einhaltung darf der Temperaturanstieg ein gefordertes Niveau nicht übersteigen. Die letzten beiden Eigenschaften ergeben sich durch die Funktion der Wände im Brandfall. Sie sollen die Rettungswege vor Feuer und Rauch abschotten und müssen deswegen die Weiterleitung von heißen Gasen und hohen Temperaturen verhindern. [26]

Für die Messung der Temperaturen werden auf der brandabgewandten Wandseite Thermoelemente befestigt, um den mittleren Temperaturanstieg (≤ 140 °C) sowie den maximalen Temperaturanstieg (≤ 180 °C) zu erfassen. Bei belasteten Bauteilen wird auch die vertikale Dehnung bzw. Stauchung über geeignete Messgeräte, wie beispielsweise Wegaufnehmer ermittelt. Weitere Parameter wie die Ofeninnentemperatur und der Ofeninnendruck müssen über die gesamte Versuchsdauer erfasst werden und es gilt normativ geregelte Grenzwerte einzuhalten. Bei tragenden Wänden ist die horizontale Durchbiegung der Wand zu messen. Die genaue Anordnung der Messinstrumente kann Abb. 2.2 entnommen werden. Soll die Strahlung gemessen werden, sind Wärmestrommessgeräte nach DIN EN 1363-2 [12] zu positionieren. Optional können Thermoelemente im Wandinneren, wie beispielsweise in Anlage A dargestellt, über die Veränderung der Temperatur in Bezug auf die Wanddicke informieren.

Für die Einstufung als Brandwand muss zusätzlich die mechanische Stoßbeanspruchung (M) nach 60 bzw. 90 Minuten Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-2 [12] mittels drei genormter Pendelschläge von 3000 Nm überprüft werden. Bei nicht raumabschließenden, aber trotzdem tragenden Bauteilen ist nur die Tragfähigkeit zu überprüfen [28].

Bei allen tragenden Bauteilen ist die Feuerwiderstandsdauer die Zeitspanne, in der das Bauteil einer Brandbeanspruchung widersteht, ohne seine charakteristischen Eigenschaften zu verlieren. Je nach Feuerwiderstandsdauer wird in der bauaufsichtlichen Benennung gemäß DIN EN 4102-2 [27] zwischen verschiedenen Feuerwiderstandsklassen unterschieden. Neben den drei definierten Feuerwiderstandsklassen in der Musterbauordnung [3] (Kapitel 2.2.1), werden hochfeuerbeständige Bauteile durch eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten definiert und höchstfeuerbeständige Bauteile durch 180 Minuten Feuerwiderstandsdauer [27].

In Abb. 2.2 ist der Aufbau der Feuerwiderstandsprüfung für eine tragende und raumabschließende Mauerwerkswand gemäß DIN EN 1365-1 [5] dargestellt. Die Wand wird in einem Prüfrahmen am Wandkopf und -fuß gehalten. Die vertikalen Ränder werden gelenkig gelagert ausgeführt und können sich frei verformen. Der Abstand zwischen den vertikalen Rändern und dem Prüfrahmen muss zwischen 25 mm und 50 mm betragen. Dieser Spalt wird mit einem elastischen, nichtbrennbaren Material wie beispielsweise Mineralwolle verfüllt, um eine Abdichtung der einseitigen Brandbeanspruchung sicherzustellen und gleichzeitig die Beweglichkeit der Wand nicht einzuschränken. Die Lasteinleitung am Kopf erfolgt über eine Traverse, um die Prüflast gleichmäßig über die gesamte Dicke und Länge der Wand zu verteilen. [5]

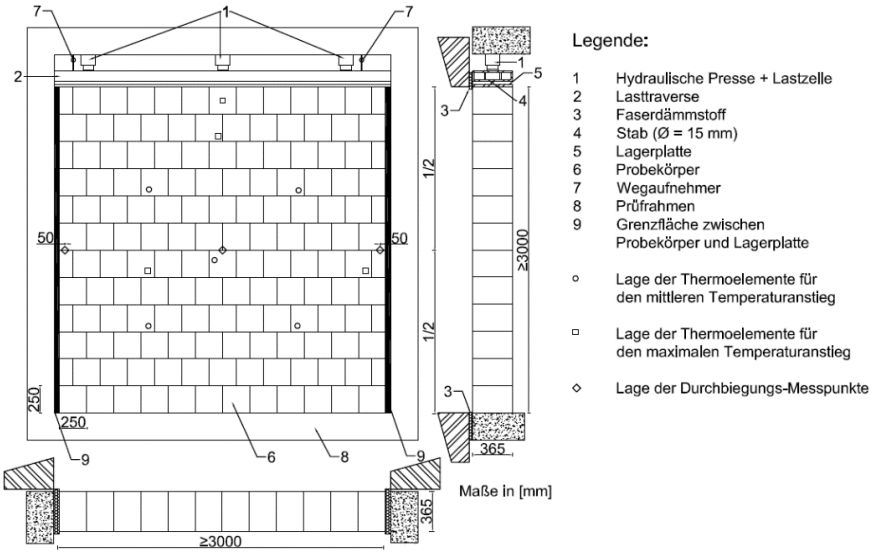


Abb. 2.2: Feuerwiderstandsprüfung mit beispielhafter Anordnung von Thermoelementen an der brandabgewandten Wandseite und Anordnung der Durchbiegungsmessungen für Ziegelmauerwerkswände gemäß DIN EN 1365-1 [5]

Der Versuchsablauf sieht vor, dass 15 Minuten vor Beginn der Feuerwiderstandsprüfung das tragende Bauteil mit der Prüflast beaufschlagt wird. Nach Ablauf der 15 Minuten werden die Brenner in der Brennkammer des Brandofens gezündet und es beginnt die eigentliche Feuerwiderstandsprüfung. Die Versuchsdauer ist entweder durch den Auftraggeber bzw. Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer vorgegeben oder durch ein frühzeitiges Versagen des Bauteils begrenzt. [5]

Der Temperaturverlauf im Brandofen wird gemäß DIN EN 1363-1 [11] geregelt. Die dort festgelegte Einheits-Temperaturzeitkurve, auch ETK genannt, ist für alle Feuerwiderstandsprüfungen dieser Dissertationsschrift zugrunde gelegt. Die Gleichung (2.1) beschreibt den Temperaturverlauf der ETK.

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

Dabei ist:

T die mittlere Ofentemperatur [°C]

t die Zeit [min]

Für den Temperaturverlauf müssen für jede Feuerwiderstandsprüfung gewisse Grenzwerte eingehalten werden. Diese sind wie folgt definiert: [11]

Für $5 < t \leq 10$ $15\ \%$

Für $10 < t \leq 30$ $(15 - 0{,}5(t - 10))\ \%$

Für $30 < t \leq 60$ $(5 - 0{,}083(t - 30))\ \%$

Für $t > 60$ $2{,}5\ \%$

Der zeitliche Verlauf der ETK mit den zugehörigen maximalen Abweichungsgrenzen bis zur 180. Prüfminute ist in Abb. 2.3 dargestellt. Der Ofendruck soll überwacht werden und gemäß DIN EN 1363-1 [11] fünf Minuten nach Beginn der Prüfung einen Druck von ±5 Pa des Nenndrucks aufweisen, der für das zu prüfende Bauteil festgelegt ist. Nach zehn Minuten und fortlaufender Zeit ist nur noch eine Abweichung von ±3 Pa zulässig. Für raumabschließende Wände soll der Nenndruck des Brandofens bei 20 Pa liegen.

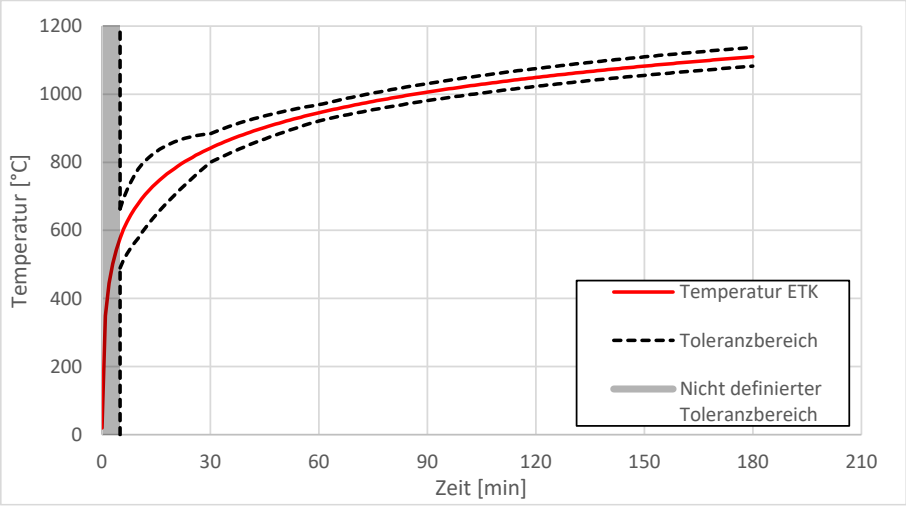


Abb. 2.3: ETK mit zugehörigem Toleranzbereich nach DIN EN 1363-1 [11]

In Abhängigkeit der Dauer einer Feuerwiderstandsprüfung sowie den Anforderungen an die zu prüfende Wand können die zuvor erläuterten Feuerwiderstandsprüfungen sehr zeitaufwendig und kostenintensiv sein. Aus diesem Grund wird die Anzahl der Feuerwiderstandsprüfungen auf ein Minimum begrenzt. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung für eine Mauerwerkswand wird diese in der Regel zentrisch druckbeansprucht. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur die Ermittlung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd} mittels des allgemeinen Nachweisverfahrens gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] genauer erläutert. Daran anknüpfend wird eine Bemessung für den Brandfall gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] erörtert.

2.2.5 Bemessung einer Mauerwerkswand im Kalt- und Brandfall

Bei einer zentrisch eingeleiteten Prüflast resultieren keine Querkräfte und Momente, weshalb in Kapitel 2.2.5.1 nur die Bemessung für den vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} erläutert wird. Die Berechnung erfolgt für eine Feuerwiderstandsprüfung nach aktuellem Stand der Technik gemäß des allgemeinen Nachweisverfahrens (DIN EN 1996-1-1 [13]). Mit diesem wird eine besonders wirtschaftliche Bemessung im Vergleich zur vereinfachten Berechnungsmethode gemäß DIN EN 1996-3 [29] erzielt. In Abhängigkeit vom Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für den Kaltfall, wird die Größe der auf die Mauerwerkswand einwirkenden zentrischen

Normalkraft bei einer Feuerwiderstandsprüfung (Prüflast) festgelegt. Aus der Einwirkung dividiert durch den Widerstand erfolgt die Berechnung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} (Gleichung 2.12), auf dessen Grundlage die Klassifizierung für den Brandfall erfolgt. Es wird nachfolgend zwischen der Bemessung für den Kaltfall und den Brandfall unterschieden.

2.2.5.1 Bemessung im Kaltfall gemäß Allgemeinen Nachweisverfahren DIN EN 1996-1-1 [13]

Für das allgemeine Nachweisverfahren gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] werden für die Ermittlung des Bemessungswerts des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} die lokalen Schnittgrößen an Wandkopf und -fuß sowie in Wandmitte benötigt. Für jede dieser Stellen ist der Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit zu führen. Der Nachweis gilt als erfüllt, sofern der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} größer oder gleich dem Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft N_{Ed} ist. Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd} berechnet sich wie folgt. [13]

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot l \cdot f_d \tag{2.2}$$

Dabei ist:

- Φ Abminderungsfaktor Φ_i am Kopf oder Fuß der Wand, bzw. Φ_m in Wandmitte
- t Wanddicke
- l Wandlänge
- f_d Bemessungswert der Druckfestigkeit des Mauerwerks

Es gilt:

$$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M} \tag{2.3}$$

Dabei ist:

- ζ Dauerstandsfaktor ζ = 0,85 zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen und weiterer Einflüsse. Für kurzzeitige Beanspruchungsarten wie beispielsweise ein Brandfall kann ζ = 1,0 eingesetzt werden. [28]
- f_k Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit des Mauerwerks
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1996-1-1/NA [28] = 1,5

Abminderungsfaktor Φ_i (Wandkopf bzw. Wandfuß)

Mit dem Abminderungsfaktor Φ_i wird unter der Annahme eines rechteckigen Spannungsblockes die Schlankheit sowie eine Lastexzentrizität am Wandkopf bzw. Wandfuß berücksichtigt. [13]

$$\Phi_i = 1 - 2 \cdot \left(\frac{e_i}{t}\right) \tag{2.4}$$

Dabei ist:

e_i Die Lastexzentrizität am Wandkopf und -fuß

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0{,}05 \cdot t \tag{2.5}$$

M_{id} Bemessungswert des Biegemoments am Wandkopf bzw. -fuß

N_{id} Bemessungswert der Vertikalkraft am Wandkopf bzw. -fuß

e_{he} Exzentrizität am Wandkopf bzw. -fuß aufgrund von Horizontallasten

e_{init} Ungewollte Ausmitte; gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [28] darf e_{init} am Wandkopf und -fuß vernachlässigt werden

t Wanddicke

Bei einer Feuerwiderstandsprüfung mit einer zentrischen Lasteinleitung sind keine planmäßigen Lastexzentrizitäten vorhanden. Ebenso ist keine Mindestausmitte ($0{,}05 \cdot t$) oder ungewollte Ausmitte (e_{init}) zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich bei einer Feuerwiderstandsprüfung mit einer zentrischen Lasteinleitung ein Abminderungsfaktor $\Phi_i = 1{,}0$. Demnach ist der Abminderungsfaktor für die Wandmitte Φ_m immer für eine Abminderung des Bemessungswerts des vertikalen Tragwiderstandes maßgebend.

Abminderungsfaktor Φ_m (Wandmitte)

Äquivalent zu der Berechnung von Φ_i sind keine planmäßigen Ausmitten zu berücksichtigen. In Bezug auf die Bestimmung der Knicklänge der Wand (h_{ef}), gilt gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] ein Abminderungsfaktor von ρ = 0,75 für den Fall einer am Wandkopf und -fuß durch beidseitig und auf gleicher Höhe aufgelagerte Stahlbetondecken bzw. Dächer [13]. Diese Lagerungsbedingungen werden bei einer Feuerwiderstandsprüfung gemäß Abb. 2.2 imitiert. Wird das Knickproblem einer zentrisch belasteten Mauerwerkswand bei einer Feuerwiderstandsprüfung auf Ersatzstäbe zurückgeführt, lässt sich eine Kombination aus dem Eulerfall 2 (Stab, welcher an beiden Enden gelenkig gelagert ist) und Eulerfall 3 (Stab, der unten eingespannt und oben gelenkig gelagert ist) feststellen [30]. Demnach würde ein Knicklängenbeiwert zwischen ~0,7 und 1,0 resultieren [30]. Eine genaue Berechnung der Knicklänge erfolgt nicht, da die relative Steifigkeit der mit der Wand verbundenen Bauteile sowie die Wirksamkeit der Verbindungen in der Praxis variiert.

Für nachfolgende Berechnungen vertikaler Tragwiderstände zentrischer Feuerwiderstandsprüfungen wird ein Abminderungsfaktor ρ von 0,75 angesetzt. Dieser resultiert aus den Überlegungen für die Lagerungsbedingungen bei einer Feuerwiderstandsprü-

fung. Ein weiteres Argument für $\rho = 0{,}75$ ist, dass dieser Wert gemäß den Lagerungsbedingungen in DIN EN 1996-1-1 [13] definiert ist, welche bei einer Feuerwiderstandsprüfung imitiert werden. Eine Sichtung vorhandener Prüfberichte in Kapitel 3 von Feuerwiderstandsprüfungen, bei welchen das allgemeine Nachweisverfahren gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] zur Ermittlung des vertikalen Tragwiderstandes verwendet wurde, zeigt ebenfalls, dass $\rho = 0{,}75$ verwendet wurde. Die von der Wandschlankheit λ abhängigen Zusatzbeanspruchungen infolge Theorie II. Ordnung werden in der Wandmitte durch den Abminderungsfaktor Φ_m berücksichtigt. Dieser wird gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [28] wie folgt berechnet.

$$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}} \tag{2.6}$$

Dabei ist:

e_{mk} Die Ausmitte der Last in halber Wandhöhe

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0{,}05 \cdot t \tag{2.7}$$

e_m Ausmitte infolge der Last

e_k Ausmitte infolge Kriechens. Die Ausmitte darf gleich null gesetzt werden, sofern eine Schlankheit gemäß NDP zu 6.1.2.2 (2) in DIN EN 1996-1-1/NA [28] eingehalten wird.

$$e_k = 0{,}002 \cdot \Phi_\infty \cdot \lambda \cdot \sqrt{t \cdot e_m} \tag{2.8}$$

Φ_∞ Die Endkriechzahl

t_{ef} Die wirksame Wanddicke. Bei einschaligen Wänden ist diese gleich der tatsächlichen Wanddicke.

λ Die Wandschlankheit, darf bei im Wesentlichen vertikal beanspruchten Mauerwerkswänden nicht größer als 27 sein [13].

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \tag{2.9}$$

h_{ef} Die Knicklänge der Wand. Die Berechnung erfolgt gemäß $h_{ef} = \rho \cdot h$ wobei h die Höhe der Wand ist und ρ ein Abminderungsfaktor bei der Berechnung der Knicklänge nach NA 5.16 in DIN EN 1996-1-1/NA [28]. Gemäß DIN EN 1996-1-1, 5.5.1.2 [13] wird bei einer Feuerwiderstandsprüfung unabhängig von der Wanddicke $\rho = 0{,}75$ angesetzt.

Aufgrund nicht vorhandener Ausmitten und Kriecheinflüsse lässt sich die Gleichung 2.6 für eine Feuerwiderstandsprüfung an zentrisch belasteten Mauerwerkswänden wie folgt vereinfachen:

$$\Phi_m = 1{,}14 - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 \tag{2.10}$$

2.2.5.2 Bemessung im Brandfall gemäß DIN EN 1996-1-2 [6]

Gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] bzw. dem zugehörigen nationalen Anhang DIN EN 1996-1-2/NA [7] wird die einwirkende Normalkraft im Brandfall abgemindert. Im Brandfall kann davon ausgegangen werden, dass nicht alle in der Bemessung angesetzten Nutzlasten und sonstigen Einwirkungen voll wirken. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandereignisses zu genau dem Zeitpunkt der maximal auftretenden Normalkrafteinwirkung ist außerordentlich gering [31]. Die Berechnung des Bemessungswertes der Normalkraft im Brandfall $N_{Ed,fi}$ erfolgt über eine Abminderung mit dem Reduktionsfaktor η_{fi}.

$$N_{Ed,fi} = \eta_{fi} \cdot N_{Ed} \tag{2.11}$$

Dabei ist:

η_{fi} Reduktionsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall; ohne genaueren Nachweis gilt $\eta_{fi} = 0{,}7$ gemäß DIN EN 1996-1-2/NA [7]

N_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft im Kaltfall

Allgemein werden die Einwirkungen im Brandfall abgemindert, da der Teilsicherheitsbeiwert im Brandfall 1,0 [6] beträgt und nicht 1,35 für ständige Einwirkungen und 1,5 für veränderliche Einwirkungen [32]. Nach DIN EN 1996-1-2 [6] kann eine genaue Berechnung des Reduktionsfaktors η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältniswert der ständigen Einwirkungen und der maßgebenden veränderlichen Einwirkung erfolgen bzw. wird vereinfachend $\eta_{fi} = 0{,}65$ empfohlen. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung wirkt nur eine konstant ständige Last auf den Prüfkörper ein. Wird ohne genaueren Nachweis gemäß DIN EN 1996-1-2/NA [7] η_{fi} mit 0,7 angesetzt, resultiert daraus eine Reduzierung der Bemessungseinwirkung auf 70 % des Kaltfalls. Wird der abgeminderte Bemessungswert der Normalkraft im Brandfall durch den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes des Mauerwerks im Kaltfall geteilt, ergibt sich der Ausnutzungsfaktor α_{fi} [7].

$$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}} \triangleq \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} \rightarrow N_{Ed,fi} = \alpha_{fi} \cdot N_{Rd} \leq 0{,}7 \cdot N_{Rd} \tag{2.12}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

$N_{Ed,fi}$ Bemessungswert der Normalkraft im Brandfall

N_{Rd} Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes im Kaltfall

Demnach entspricht ein Ausnutzungsfaktor α_{fi} = 0,7 einer vollen Tragfähigkeit bei der kalten Bemessung gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [28] nach dem allgemeinen Nachweisverfahren [33]. Der Ausnutzungsfaktor α_{fi} ist in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. allgemeinen Bauartgenehmigungen für Ziegel angegeben, sofern diese für den Feuerwiderstand klassifiziert sind. Anhand der aufgeführten Ausnutzungsfaktoren α_{fi} in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsfähigkeit kann ein Nachweis durch einen Abgleich erfolgen. Dieser ist erbracht, sofern die Mauerwerkswand einen geringeren Ausnutzungsfaktor α_{fi} für die gemäß Bauordnung definierte Feuerwiderstandsfähigkeit (siehe Tab. 2.2) aufweist.

Des Weiteren existiert in DIN EN 1996-1-2/NA [7] ein umfangreiches Tabellenwerk zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Mauerwerk. Damit die bereits existierenden Mindestanforderungen aus DIN 4102-4 [34] von 1994 ohne die Durchführung neuer Versuche in die neue Normen übernommen werden können, ist in DIN EN 1996-1-2/NA [7] der Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ als Ersatz für den Ausnutzungsfaktor α_2 aufgeführt. Dieser ist notwendig, da für die Erstellung der Tabellen in DIN 4102-4 [34] die Bemessung nach dem vereinfachten Verfahren gemäß DIN 1053-1 [35] verwendet wurde. Mit dem Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ soll berücksichtigt werden, dass die maximal zulässigen Normalkräfte nach dem allgemeinen Nachweisverfahren DIN EN 1996-1-2 [6] größer oder kleiner sein können als es bei der Bemessung nach DIN 1053-1 [35] der Fall war [33]. Dies ergibt sich neben der bei einer genaueren Berechnung im Regelfall ohnehin höheren rechnerischen Bemessungswiderstand im Wesentlichen aus der neu definierten Berechnung der Tragfähigkeit für den Versagensfall Knicken sowie aufgrund der neu festgelegten und in einigen Fällen deutlich höheren charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k [33]. Die Berechnung von $\alpha_{6,fi}$ erfolgt nach DIN EN 1996-1-2/NA [7] in Abhängigkeit der Schlankheit des Mauerwerks und verschiedener anderer Parameter wie beispielsweise dem Anpassungsfaktor der Mauerwerkskenngröße ω. Bei vollständiger Auslastung der maximal zulässigen Beanspruchung im Kaltfall nach DIN 1053-1 [35] beträgt $\alpha_{6,fi} = 0{,}7$.

Wärmedämmende Hochlochziegel werden wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, für die Klassifizierung mit Tabellenwerten ausgeschlossen. Es existiert für diese Ziegel auch kein Anpassungsfaktor ω. Üblicherweise erfolgt die Klassifizierung für den Feuerwiderstand auf Grundlage der bauaufsichtlichen Zulassung bzw. allgemeinen Bauartgenehmigung. Alternativ kann ein Nachweis im Einzelfall mit einer Feuerwiderstandsprüfung gemäß DIN EN 1365-1 [5] erbracht werden.

Angaben zum Feuerwiderstand in bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. allgemeinen Bauartgenehmigungen basieren in der Regel auf einer Feuerwiderstandsprüfung. Wärmedämmende Hochlochziegel werden hauptsächlich verwendet, wenn auf eine zusätzliche Wärmedämmung bei einer Außenwand verzichtet werden soll. Zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte für die wärmedämmenden Eigenschaften und der statischen Nachweise werden Mauerwerkswände meistens in einer Dicke von 300 mm oder 365 mm ausgeführt. Aus diesem Grund werden Feuerwiderstandsprüfungen meist an Wänden dieser Dicke durchgeführt. Abhängig von der Wanddicke, dem charakteristischen Wert der Druckfestigkeit des Mauerwerks und dem Abminderungsfaktor resultiert der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} des Mauerwerks im Kaltfall. Wird dieser mit dem Reduktionsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall η_{fi} multipliziert, kann ein Rückschluss auf den vertikalen Tragwiderstand des Mauerwerks im Brandfall $N_{Rd,fire}$ erfolgen. Aufgrund von Erfahrungswerten und der jeweils angestrebten Feuerwiderstandsdauer, erfolgt die Festlegung der Prüflast meist auf Grundlage einer individuellen Abminderung von $N_{Rd,fire}$. In Abhängigkeit von dem Ausnutzungsfaktor α_{fi} (Gleichung (2.12)) und der aus der Feuerwiderstandsprüfung resultierenden Feuerwiderstandsdauer kann der Grad der Ausnutzung auch für geringere Feuerwiderstandsklassen angesetzt werden. Aus diesem Grund sind in Zulassungen meist für die definierten Feuerwiderstandsklassen gleiche Wanddicken und Ausnutzungsfaktoren α_{fi} aufgeführt.

3 Auswertung vorhandener Prüfberichte

Wird eine Feuerwiderstandsprüfung durchgeführt, wird üblicherweise ein Prüfbericht angefertigt. Forschungsergebnisse in Bezug auf wärmedämmende Hochlochziegel im Brandfall bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren α_{fi} existieren nicht. Für die Festlegung von Tabellenwerten zur Klassifizierung des Feuerwiderstandes von wärmedämmenden Hochlochziegeln werden Prüfberichte genannter Ziegel analysiert, bevor zusätzliche Feuerwiderstandsprüfungen durchgeführt werden.

Die aus der Recherche der Prüfberichte gewonnenen Erkenntnisse sollen das allgemeine Bauteilverhalten von Mauerwerkswänden aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einer einseitigen Brandbeanspruchung bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren α_{fi} bei zentrischer Lasteinleitung aufzeigen. Ebenso sollen maßgebende Einflussfaktoren identifiziert werden, welche zum Feuerwiderstand einer tragenden Wand aus wärmedämmenden Hochlochziegel beitragen und für die Bildung der Mindestfeuerwiderstandsklassen relevant sind. Diese müssten demnach bei den Anwendungsgrenzen berücksichtigt werden. Zudem soll das Bauteilverhalten infolge der außergewöhnlichen Bemessungssituation untersucht werden, um Vergleiche zu eigens durchgeführten Versuchen anzuführen. Mittels dieser Analyse soll ein Verständnis für die Wahl der Bauteilausnutzung für das Versuchsprogramm der eigenen Forschung gewonnen werden.

Es werden Prüfberichte von Feuerwiderstandsprüfungen analysiert, welche an drei Prüfinstituten in den 1990er bzw. den 2000er-Jahren durchgeführt wurden. Aufgrund der zu den jeweiligen Jahren gültigen Berechnungsverfahren resultieren Unterschiede bei der Berechnung der vertikalen Tragwiderstände. Nach aktuellem Stand der Technik wird zur Berechnung des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd} seit der Umstellung auf die europäischen Normen das in Kapitel 2.2.5.1 aufgeführte allgemeine Nachweisverfahren (DIN EN 1996-1-1 [13]) verwendet. Vor der Umstellung wurde Mauerwerk gemäß DIN 1053-1 [35] bemessen. Für eine Vergleichbarkeit der Prüfberichte untereinander wurden die Bemessungswerte der vertikalen Tragwiderstände N_{Rd} mittels des allgemeinen Nachweisverfahrens gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] mit exakten Eingangsgrößen auf gleicher Grundlage berechnet.

Die Tragfähigkeit einer Mauerwerkswand im Brandfall ist insbesondere von der Prüflast abhängig [33]. Wird eine Feuerwiderstandsprüfung an einer Mauerwerkswand durchgeführt, entspricht die einwirkende Normalkraft im Brandfall $N_{Ed,fi}$ gleich der frei wählbaren Prüflast $P_{gewählt}$. Oft wird neben dem Ausnutzungsfaktor α_{fi} auch der Grad der Ausnutzung im Brandfall γ_{fi} angegeben. Der Zahlenwert 1,0 entspricht einer Ausnutzung von 100 %. Der Grad der Ausnutzung im Brandfall γ_{fi} ist wie folgt definiert bei einem Reduktionsfaktors η_{fi} von 0,7:

$$\gamma_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd} \cdot \eta_{fi}} \triangleq \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd} \cdot \eta_{fi}} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd,fi}} \qquad \text{bzw.} \qquad \gamma_{fi} = \frac{\alpha_{fi}}{\eta_{fi}} \tag{3.1}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

$N_{Ed,fi}$ Bemessungswert der Normalkraft im Brandfall

N_{Rd} Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes im Kaltfall

η_{fi} Reduktionsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall; ohne genaueren Nachweis gilt $\eta_{fi} = 0,7$

$N_{Rd,fi}$ Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes im Brandfall

Insgesamt liegen für die Auswertung 31 Prüfberichte von Mauerwerkswänden hergestellt aus wärmedämmenden Hochlochziegeln vor, aus welchen 33 Prüfergebnisse ausgewertet werden können. Dies liegt daran, dass bei dem Prüfbericht c.Pr-17-2.061-De [36] die Mauerwerkswand nach 60 Minuten einer Prüfung zur Brandwand gemäß DIN EN 1363-2 [12] ausgesetzt wurde, dieser standhielt (Prüfberichtzusatz (a)) und die Feuerwiderstandsprüfung anschließend fortgesetzt wurde (Prüfberichtzusatz (b)). Bei dem Prüfbericht PB 3.2/16-292-1 [37] wurde die Prüflast nach 60 Minuten reduziert aber die Prüfung fortgesetzt, woraus sich auch zwei Ergebnisse ableiten lassen (Prüfberichtzusatz (a) und (b)). Die Tab. 3.1 fasst die relevantesten Informationen der Prüfberichte in Bezug auf die Klassifizierung der Feuerwiderstände zusammen. Die Angaben wurden teilweise auf Grundlage der in den Prüfberichten angegebenen Materialkennwerte eigenständig berechnet und die Prüflasten und Tragwiderstände wurden auf ganze Zahlen gerundet. Begründet wird dies mit einem schwanken der Prüflast von ± 1,0 kN. Dadurch können geringfügige Änderungen in Bezug auf die Ausnutzungen α_{fi} und γ_{fi} der Tab. 3.1 und den angegebenen Werten in den Prüfberichten resultieren. Der Grad der Ausnutzung im Brandfall γ_{fi} resultiert aus der Division von dem Ausnutzungsfaktor α_{fi} durch den Reduktionsfaktors η_{fi} = 0,7.

Tab. 3.1: Übersicht Prüfberichte

Ziegeltyp	Name Prüfbericht	Wanddicke [mm]	Wandhöhe [m]	f_k-Wert [N/mm²]	Abminderungsfaktor Φ_m [-]	Bauteilwiderstand Kaltfall N_{Rd} (DIN EN 1996-1-1) [kN]	Prüflast $N_{Ed,fi}$ [kN]	α_{fi} [-]	γ_{fi} [-]	Prüfdauer [min] + Ergebnis
Großkammer verfüllt	(2100/457/15)-Wein	241,0	3,25	1,82	0,90	787	551	0,70	1,00	93 + Bauteilversagen
	PB 3.2/16-181-1	294,1	3,05	3,50	0,95	1963	680	0,35	0,50	95 + M
	PB 3.2/16-302-1 Á	298,7	3,00	4,02	0,96	2304	1400	0,61	0,87	94 + Versuchsabbruch
	PB 3.2/17-031-1	305,3	3,00	3,20	0,96	1882	1315	0,70	1,00	90 + (M)
	(3713/840/13)-TM	304,5	3,25	2,41	0,95	1391	860	0,62	0,89	96 + M
	(3771/705/09)-TM	300,9	3,25	2,30*	0,95	1309	765	0,58	0,83	126 + M
	(3365/426/14)-TM	365,0	3,25	4,82	0,98	3447	2000	0,58	0,83	97 + M
	(3768/953/12)-TM	365,0	3,25	1,72	0,98	1230	570	0,46	0,66	91 + Bauteilversagen
	3930/7061-PK	365,0	3,00	1,90*	0,99	1376	876	0,64	0,91	180 + Versuchsabbruch
	(2101/273/16)-Kip	364,2	3,25	1,56	0,98	1113	777	0,70	1,00	94 + M
	(3542/743/13)-TM	363,2	3,25	1,74	0,98	1237	870	0,70	1,00	99 + M
Kleinlochung unverfüllt	(3197/6895)-TM	115,0	3,25	3,10	0,63	450	135	0,30	0,43	150 + Versuchsabbruch
	(3001/106/12)-TM	175,5	3,25	4,44	0,81	1257	876	0,70	1,00	100 + M
	(2101/399/16)-Kip	363,0	3,25	1,62	0,98	1151	806	0,70	1,00	97 + M
	PB 3.2/14-169-1	365,0	3,00	3,10*	0,99	2245	986	0,44	0,63	106 + M
	PB 3.2/14-169-2	363,0	3,00	1,92*	0,99	1382	768	0,56	0,80	97 + M
	PB 3.2/09-211	365,0	3,00	2,64*	0,99	1912	767	0,40	0,57	96 + M
Kleinlochung verfüllt	(2100/173/15)-Kip	297,2	3,25	2,88	0,94	1615	640	0,40	0,57	99 + M
	(2100/860/15)-Wein	300,1	3,25	2,49	0,95	1412	671	0,48	0,69	96 + (M)
	(3297/050/09)-TM	301,6	3,25	4,00*	0,95	2283	1207	0,53	0,76	75 + Bauteilversagen
	(3436/507/14)-TM	299,3	3,25	2,70*	0,94	1527	1250	0,82	1,17	60 + Bauteilversagen
	(3748/823/09)-TM	304,9	3,25	2,40*	0,95	1388	544	0,39	0,56	97 + M
	(3797/073/12)-TM	298,1	3,25	4,00*	0,94	2251	700	0,31	0,44	95 + M
	PB 3.2/16-292-1 (a)	298,0	3,00	3,40	0,96	1943	1371	0,71	1,01	60 + Prüflastreduzierung
	PB 3.2/16-292-1 (b)	298,0	3,00	3,40	0,96	1943	1234	0,64	0,91	93 + M
	(2101/400/16)-Kip	361,0	3,25	4,96	0,98	3502	2000	0,57	0,81	75 + Bauteilversagen
	(3311/496/12)-TM	360,9	3,25	4,10*	0,98	2894	1735	0,60	0,86	61 + (M)
	(3376/813/11)-TM	366,6	3,25	2,40*	0,98	1725	682	0,40	0,57	98 + M
	(3752/833/14)-TM	363,6	3,25	2,62	0,98	1865	725	0,39	0,56	93 + (M)
	c.Pr-17-2.061-De (a)	364,5	3,27	2,20	0,98	1569	882	0,56	0,80	64 + M
	c.Pr-17-2.061-De (b)	364,5	3,27	2,20	0,98	1569	882	0,56	0,80	106 + Versuchsabbruch
	PB 3.2/17-411-1	366,0	3,00	3,00	0,99	2179	1369	0,63	0,90	93 + Versuchsabbruch
	(3419/685/11)-TM	364,6	3,25	4,20*	0,98	3000	820	0,27	0,39	98 + M

*** Es war in den Prüfbericht kein f_k-Wert angegeben, da dort eine Bemessung mit dem nicht mehr gültigen vereinfachten Verfahren gemäß DIN 1053-1 durchgeführt wurde. Die f_k-Werte wurde mit den Druckfestigkeiten der Ziegel und den zugehörigen Zulassungen bestimmt.**
Das Ergebnis "M" kennzeichnet Versuche, welche zusätzlich mit einer mechanischen Belastung nach DIN EN 1363-2 beansprucht wurden und dieser Beanspruchung standgehalten haben. Das Ergebnis "(M)" hingegen kennzeichnet Versuche, welche dieser nicht standgehalten haben.

Wie Tab. 3.1 zeigt, wurde eine Vielzahl der Feuerwiderstandsprüfungen nach einem gewissen Zeitraum beendet, ohne dass ein Bauteilversagen erfolgte. In diesen Fällen wurde ein definiertes Prüfziel erreicht. Das meistens eine Branddauer von 90 Minuten mit einer anschließenden mechanischen Beanspruchung nach DIN EN 1363-2 [12] zwecks einer Klassifizierung zur Brandwand mit Ziegeln in einer Breite von 300 mm bzw. 365 mm angestrebt wird, ist den baulichen Anforderungen an den Brandschutz sowie den Wärmeschutz geschuldet. Aufgrund der Prüfung zur Brandwand ist nicht absehbar, nach wie vielen weiteren Minuten Brandbeanspruchung sich ein Versagen unter der aufgebrachten Prüflast eingestellt hätte. Wird ein definiertes Prüfziel nicht erreicht, wird nicht immer ein Prüfbericht angefertigt. Aus diesem Grund liegen wenige Prüfberichte von Feuerwiderstandsprüfungen mit einem Bauteilversagen vor.

Angesichts der unterschiedlichen Versuchsergebnisse ist ein Vergleich der Feuerwiderstandsprüfungen untereinander nur bedingt möglich. Die Datengrundlage mit 33 Prüfergebnissen ist zu gering, weshalb für manche Merkmale bzw. Materialeigenschaften der Ziegelwände keine aussagekräftigen Ergebnisse generiert werden können. Des Weiteren liegen nur für fünf gleiche wärmedämmende Hochlochziegel mehr als ein Prüfbericht in gleicher Ziegelbreite vor, wie die Tab. 3.2 zeigt.

Tab. 3.2: Übersicht Prüfberichte mit gleichen Ziegeln

Ziegel	Ziegel-breite [mm]	Prüfberichte		
ThermoPlan MZ 80 G	300	PB 3.2/16-181-1 [38]	PB 3.2/17-031-1 [39]	-
UNIPOR WS 08 CORISO	300	(2100/860/15)-Wein [40]	(3436/507/14)-TM [41]	PB 3.2/16-292-1 [37]
UNIPOR WS 10 CORISO	300	(3297/050/09)-TM [42]	(3797/073/12)-TM [43]	-
UNIPOR WS 09 CORISO	365	(3311/496/12)-TM [44]	(3419/685/11)-TM [45]	-
UNIPOR W 07 CORISO	365	(3752/833/14)-TM [46]	(3376/813/11)-TM [47]	-

Aufgrund vieler Einflussfaktoren, die aus dem Material oder einem Brandereignis an sich resultieren, weisen Ergebnisse von Feuerwiderstandsprüfungen eine große Streuung auf. Gemäß Model Code 3.2 kann der Variationskoeffizient für die Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Normalmauermörtel zu 17 % angenommen werden [48]. Demnach ist Mauerwerk ein Baustoff mit stark streuenden Materialeigenschaften. Aufgrund einer Temperatureinwirkung ist davon auszugehen, dass größere Streuungen durch den zusätzlichen Einfluss resultieren. Die Streuung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden bei Feuerwiderstandsprüfungen wurde bisher nicht erforscht. Ob die Streuung abhängig vom Ausnutzungsfaktor α_{fi} ist, ist nicht bekannt.

Die Daten der Tab. 3.1 zeigen, dass teils sehr unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern und Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen mit nahezu gleichen Ausnutzungsfaktoren α_{fi} resultieren bzw. nicht immer ein niedrigerer Ausnutzungsfaktor α_{fi} zu

einer längeren Feuerwiderstandsdauer führt. Ein weiteres Indiz für eine große Streuung bei den Versuchsergebnissen zeigen die Prüfberichte (3376/813/11)-TM [47] und (3752/833/14)-TM [46] der Feuerwiderstandsprüfungen, welche mit dem Ziegel UNIPOR W07 CORISO durchgeführt wurden. Der Tab. 3.1 kann entnommen werden, dass die Mauerwerkswand mit dem höheren Ausnutzungsfaktor α_{fi} (Prüfbericht (3376/813/11)-TM [47]) die Prüfung zur Brandwand bestanden hat, während die um den Faktor 0,01 geringer ausgenutzte Mauerwerkswand (Prüfbericht (3752/833/14)-TM [46]) diese nicht bestanden hat.

Für eine gezielte Auswertung von Feuerwiderstandsprüfungen ist eine Datengrundlage notwendig, welche eine fehlerfreie und vollständige Dokumentation vorweist. Bei einigen Prüfberichten war dies nicht der Fall, wie beispielsweise bei dem Prüfbericht (3768/953/12)-TM [49]. Dort wurde bei der Berechnung für den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} ein Teilsicherheitsbeiwert von γ_M = 1,8 anstelle von γ_M = 1,5 verwendet. Weitere Beispiele sind die Prüfberichte (3436/507/14)-TM [41], PB 3.2/14-169-1 [50] und PB 3.2/14-169-2 [51], bei welchen die Berechnung für den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} nicht aufgeführt ist. Um möglichst vergleichbare und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, gilt es viele Einflussparameter bei einer Feuerwiderstandsprüfung gleich zu setzen. Bei eigens durchzuführenden Feuerwiderstandsprüfungen in Kapitel 4.4 werden aus diesem Grund identische Mauerwerkswände bei unterschiedlichen Lastniveaus bis zu ihrem Versagen geprüft. Die Erkenntnisse folgen in den Kapiteln 3.1 bis 3.5.

3.1 Lagerungsdauer

Bei der Lagerungsdauer des Prüfkörpers ist die Dauer in Tagen gemeint, die zwischen der Errichtung des Bauteils und der Feuerwiderstandsprüfung liegen. Gemäß DIN EN 1363-1 [11] dürfen Bauteile aus Mauerwerk erst geprüft werden, wenn diese nach deren Herstellung mindestens für eine Dauer von 28 Tagen konditioniert wurden. In dieser Zeit bindet der Mörtel bzw. der Putz ab und das Anmachwasser wird kristallin gebunden. Ein maximales Prüfkörperalter wird nicht definiert.

Bis auf eine Mauerwerkswand wurden alle Probekörper in einer Zeitspanne zwischen 28 Tagen und 91 Tagen geprüft [1]. Gemäß dem Prüfbericht (3768/953/12)-TM [49] wurde die darin aufgeführte Mauerwerkswand 356 Tage nach Herstellung einer Feuerwiderstandsprüfung ausgesetzt. In dem Prüfbericht heißt es, dass die Festigkeit und der Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Prüfung annähernd dem Zustand entsprachen, der bei der üblichen Verwendung zu erwarten ist [49]. Gemäß [1] kann festgestellt werden, dass eine Lagerungsdauer größer 28 Tage keinen erkennbaren ungünstigen Einfluss auf das Ergebnis einer Feuerwiderstandsdauer besitzt. Aus diesem Grund konnten im Rahmen des Versuchsprogrammes direkt mehrere Probekörper auf einmal hergestellt werden.

3.2 Horizontales Verformungsverhalten

Bei einer Mauerwerkswand treten in Abhängigkeit von deren Lagerung und der Wandschlankheit λ sowie der Größe der einwirkenden Normalkraft horizontale Verformungen auf. Bei gleicher Wandhöhe und Lagerung resultieren bei dünneren Wänden in Abhängigkeit von der einwirkenden Normalkraft größere horizontale Verformungen.

Dieser gleiche Grundsatz gilt für den Brandfall. Des Weiteren gilt bei einer Feuerwiderstandsprüfung, dass sich die Mauerwerkswand aufgrund der einwirkenden Temperatur ausdehnt, woraus zusätzliche Verformungen resultieren. Die Erfassung der horizontalen Verformungen erfolgt mittels Wegaufnehmern oder optischen Messsystemen, welche jeweils an den beiden seitlichen Rändern in halber Wandhöhe und in Wandmitte gemäß Abb. 2.2 die Verformung messen. In halber Wandhöhe sind die größten Verformungen zu erwarten.

Bei Betrachtung des Verformungsverhaltens bei den zentrisch normalkraftbelasteten Ziegelwänden bei einseitiger Brandbeanspruchung ist bei 58 % der betrachteten Versuche eindeutig erkennbar, dass sich die Wand zu Beginn der Feuerwiderstandsprüfung in Richtung des Brandofens krümmt. Die hohen Temperaturen auf der brandzugewandten Wandseite führen zu starken temperaturabhängigen Dehnungen. Auf der brandabgewandten Wandseite herrscht nach wie vor Raumtemperatur, sodass es dort zu keiner Dehnungszunahme kommt. Durch die Längendifferenz zwischen Außen- und Innenseite krümmt sich die Wand, wie der Verformungsfigur gemäß Abb. 3.1 zu entnehmen ist. Allgemein werden bei der Darstellung der Verformungen einer Mauerwerkswand bei einer Feuerwiderstandsprüfung die horizontalen und vertikalen Verformungen aus der 15-minütigen Vorbelastung nicht mitberücksichtigt und bei manchen Prüfinstituten auch nicht mit gemessen. Demnach handelt es sich eigentlich bei der Ausgangslage zum Beginn der Brandbeanspruchung mit der ETK um eine bereits verformte Wandposition. [52]

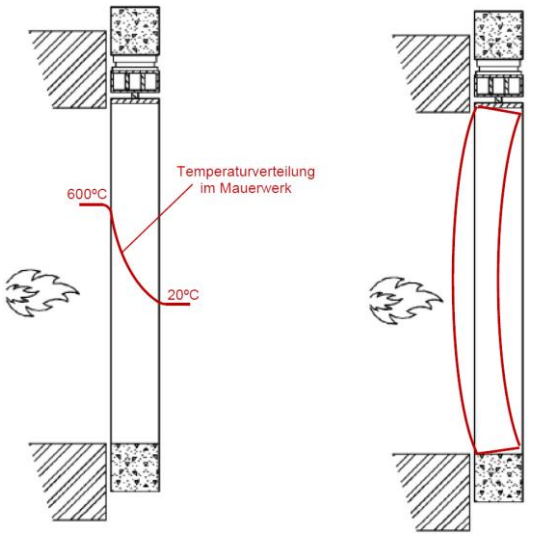


Abb. 3.1: Überproportionale Darstellung der Verformung einer Mauerwerkswand zum Beginn einer Feuerwiderstandsprüfung [52]

Das in Abb. 3.1 dargestellte Verformungsverhalten konnte bei 19 von 33 Feuerwiderstandsprüfungen eindeutig identifiziert werden. Bei den restlichen Prüfungen konnte nicht eindeutig erkannt werden, wie das Verformungsverhalten war. In zwei Fällen verformt sich die Wand am Anfang der Feuerwiderstandsprüfung zur Kaltseite. Gründe

hierfür könnten in der Herstellung liegen oder in der Ausrichtung der Mauerwerkswand vor dem Brandofen.

Im Verlauf der Feuerwiderstandsprüfung nimmt die horizontale Verformung der Mauerwerkswand im Allgemeinen nicht weiter in Richtung brandzugewandter Wandseite zu. Hohe Temperatureinwirkungen bei zusätzlicher Normalkraftbeanspruchung führen zu Rissen im Mauerwerk, wodurch sich eine Verringerung der Materialfestigkeit vom Mauerwerk bis hin zum vollständigen Festigkeitsverlust einstellt (siehe Abb. 3.2, links). Aufgrund der sich einstellenden verminderten Materialfestigkeit auf der Wandinnenseite resultiert eine exzentrische Belastung bei gleichbleibenden Lasteinleitungspunkt. Durch die sehr hohe Temperatureinwirkung können ebenfalls Teile der wärmedämmenden Hochlochziegel auf der brandzugewandten Wandseite abplatzen (siehe Abb. 3.2, Mitte). Dadurch verringert sich die Querschnittsfläche der Mauerwerkswand und bei fortlaufenden Abplatzungen wird die ursprünglich zentrisch eingeleitete Prüflast vermehrt zu einer exzentrischen Belastung bei gleichbleibenden Lasteinleitungspunkt. Resultierend daraus nimmt die sich zuvor eingestellte horizontale Verformung der Mauerwerkswand wieder ab. Mit andauernder Prüfdauer kann eine Verformung zur brandabgewandten Wandseite erfolgen (siehe Abb. 3.2, rechts) [52]. In Kombination mit Putz- und Ziegelabplatzungen kann dies auch schlagartig erfolgen.

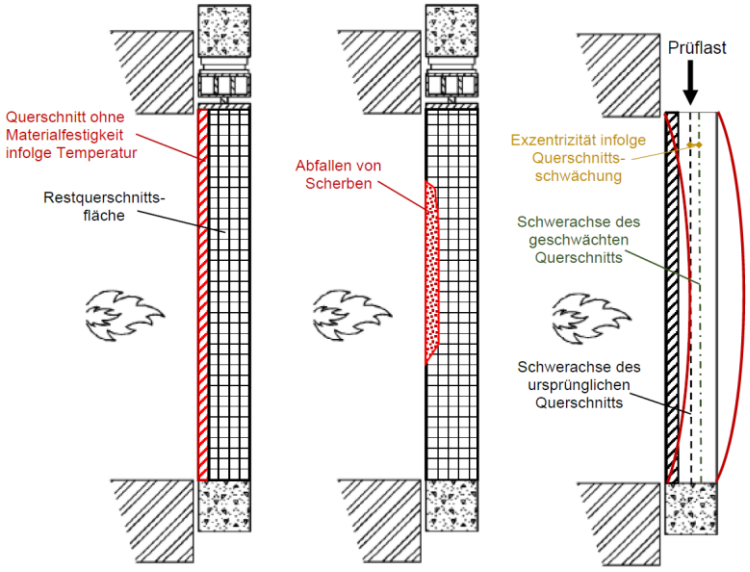


Abb. 3.2: Materialverhalten und überproportionale Darstellung der Verformung einer Mauerwerkswand bei andauernder Feuerwiderstandsprüfung [52]

Für die weiteren Untersuchungen ist die Größe der Verformungen und die Richtungsänderung von dieser von Bedeutung. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch ohne sichtbare Schädigungen bei schlagartigen Verformungen bzw. Verformungsänderungen in eine andere Richtung Teile vom Mauerwerk geschädigt werden, welches sich auf die Gesamttragfähigkeit der Wandkonstruktion auswirkt. Je größer die Quer-

schnittsschwächung der Wand ist und die dadurch entstehende Exzentrizität der Prüflast für eine größere horizontale Verformungen sorgt, desto mehr steigt die Gefahr eines Stabilitätsversagens. [52]

Zur Veranschaulichung des erläuterten Verformungsverhaltens dient das nachfolgende Verformungsdiagramm aus dem Prüfbericht (3419/685/11)-TM [53], bei welchem die Messdaten der Verformungen alle zwei Minuten abgetragen sind. Bei der dort durchgeführten Feuerwiderstandsprüfung handelt es sich um eine 365 mm dicke Ziegelwand, welche aus einem kleingelochten und mit Mineralwolle verfüllten Ziegel (UNIPOR WS09 CORISO) hergestellt wurde. Nach der Erstellung wurde die Wand noch beidseitig verputzt. Die Dicke des Putzes auf der brandzugewandten Wandseite beträgt 15 mm und auf der brandabgewandten Wandseite 20 mm.

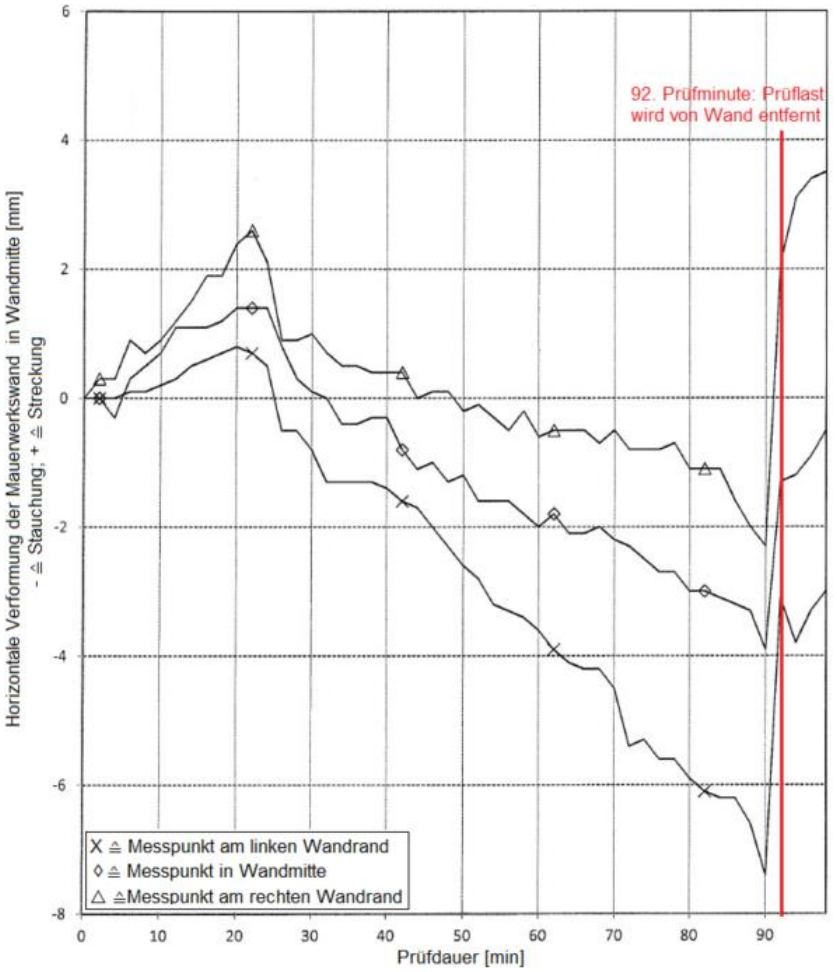


Abb. 3.3: Exemplarische Verformung einer Mauerwerkswand bei einer Feuerwiderstandsprüfung [53]

Wie Abb. 3.3 zeigt, findet zu Beginn der Feuerwiderstandsprüfung eine Verformung zur brandzugewandten Wandseite statt. Anhand von allen Messpunkten kann festgestellt werden, dass es zu einer Richtungsänderung der Verformung kommt. Diese erfolgt bei Prüfminute 20 bzw. 22 je nach Messpunkt. Die Mauerwerkswand verformt sich von der brandzugewandten Wandseite hin zur brandabgewandten. Die Richtungsänderung der Verformung erfolgte vermutlich schlagartig und aufgrund zuvor erwähnter Abplatzungen auf der brandzugewandten Wandseite. Dies bestätigt auch das Beobachtungsprotokoll der Feuerwiderstandsprüfung. In Tab. 3.3 sind die Prüfbeobachtungen für die brandzugewandte Wandseite bis zur 54. Prüfminute aufgeführt. Bei der Feuerwiderstandsprüfung wurde nach 90 Minuten die Pendelschlagprüfung für eine Eignung zur Brandwand gemäß DIN EN 1363-2 [12] durchgeführt. Demnach wurde vor dem dritten Pendelschlag in der 92. Prüfminute die Prüflast von der Wand entfernt, wodurch ein Rückgang der Verformung verzeichnet werden kann.

Tab. 3.3: Auszug des Beobachtungsprotokolls der Feuerwiderstandsprüfung aus Abb. 3.3 [53]

Prüfdauer [min]	Beobachtung
10	Putz verfärbt sich dunkel, es sind keine Risse oder ähnliches zu sehen
23	Putzabplatzungen im oberen Wandbereich
26	Deutliche ungerichtete Risse im Putz in Wandmitte
34	Abplatzungen haben deutlich zugenommen
39	Putz fällt mit Steinscherben ab
54	Weitere Abplatzungen der Ziegelscherben, allerdings nicht mehr so stark wie zu Beginn

Im Zuge der Abplatzungen in der 23. Prüfminute ist davon auszugehen, dass Teile der tragenden Mauerwerkswand an Tragfähigkeit verlieren. Dies bestätigt auch eine Durchsicht weiterer Beobachtungsprotokolle der in Tab. 3.1 aufgeführten Prüfberichte. Den Prüfberichten (3419/685/11)-TM [53] und (3311/496/12)-TM [54] ist zu entnehmen, dass es unter anderen vereinzelte Knackgeräusche aus dem Wandinneren nach 17 Minuten gab.

Bei der Durchsicht der in Tab. 3.1 aufgeführten Prüfberichte ist allerdings nicht immer ein derartiges Verformungsverhalten zu beobachten. Einigen Prüfberichten ist zu entnehmen, dass sich die Mauerwerkswandwand bei der Feuerwiderstandsprüfungen lediglich in eine Richtung verformt. Bei diesen Prüfungen (z. B. (3525-5226)-TM [55] bzw. (3197/6895)-TM [56]) traten keine bzw. nur geringfügige Schädigungen des Putzes oder Ziegelmaterials auf.

Tendenziell ist bei dünneren Mauerwerkswänden (≤ 240 mm) zu erkennen, dass diese zu größeren horizontalen Verformungen neigen. Aufgrund der geringen Datenmenge von Mauerwerkswänden mit einer Dicke von ≤ 240 mm, welche in einer Feuerwiderstandsprüfung bis zum Versagen geprüft wurden, kann nicht untersucht werden, ob die Größe der horizontalen Verformungen einen unmittelbaren Einfluss auf die Feuerwiderstandsdauer hat.

Bei sehr filigranen wärmedämmenden Hochlochziegeln ist ein großer Einfluss von Abplatzungen auf die horizontale Verformung zu erwarten, da dabei der Querschnitt sehr stark geschwächt wird. Bei sehr kompakten wärmedämmenden Hochlochziegeln führen abfallende Ziegelscherben nur zu einer geringen Querschnittsschwächung und folglich zu einer kleineren exzentrischen Lasteinleitung bei gleichbleibendem Lasteinleitungspunkt. [52]

3.3 Einfluss Putz

Einen Einfluss auf das Ergebnis einer Feuerwiderstandsprüfung hat die Wahl und Ausführung des Putzes. Bis auf eine Ausnahme wurden alle Ziegelwände beidseitig verputzt. Auf der brandzugewandten Wandseite wurde eine Schichtstärke von 15 mm aufgetragen. Auf der brandabgewandten Wandseite betrug die Dicke des Putzes zwischen 15 mm und 20 mm. In Bezug auf die Tragfähigkeit bei einer Feuerwiderstandsprüfung hat nur der brandzugewandte Putz Relevanz. Bei den untersuchten Prüfberichten wurde in 29 von 33 Fällen ein Kalk-Gipsputz verwendet. Bei zwei Feuerwiderstandsprüfungen (PB 3.2/16-292-1 (a) und (b) [37]) wurde ein Kalk-Zementputz auf die Wandoberfläche aufgetragen. Einem Prüfbericht (3930/7061-PK [57]) ist zu entnehmen, dass ein Faser-Leichtputz verwendet wurde. Einen Einfluss der unterschiedlichen Putze auf die Feuerwiderstandsdauer kann nicht ausfindig gemacht werden.

Informationen zu der unverputzten Wand sind in dem Prüfbericht (3001/106/12)-TM [58] aufgeführt, welcher die Feuerwiderstandsprüfung an der 175 mm dicken Mauerwerkswand beschreibt. Hergestellt wurde diese aus kleingelochten unverfüllten Ziegeln. In Bezug auf den Ausnutzungsfaktor α_{fi} und das Ergebnis der Feuerwiderstandsprüfung kann anhand Tab. 3.1 kein Unterschied zu den dort aufgeführten verputzen Wänden festgestellt werden.

Putz wirkt als Schutzschicht und schützt das dahinterliegende Mauerwerk vor einem direkten Wärmeeintrag. Je besser die Verarbeitung und Ausführung des Putzes, desto länger haftet dieser auf der Wandoberfläche und kann seine schützende Funktion im Brandfall ausüben. Der Haftverbund zum Ziegel und die Beschaffenheit der Oberfläche vom Putz kann im Brandfall aufgrund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien sowie der horizontalen Verformung der Mauerwerkswand beeinflusst werden. Bei auftretenden Rissen oder partiellen Abplatzungen liegt es nahe, dass die einheitliche Oberfläche gestört wird und demnach schneller weitere Fehlstellen im Putz auftreten können. Den Prüfberichten ist zu entnehmen, dass es meistens kurze Zeit nach den Abplatzungen von Putz auch zu Abplatzungen vom Ziegelmaterial auf der brandzugewandten Wandseite kommt oder dass diese zeitgleich auftreten. Üblicherweise folgen daraufhin weitere Abplatzungen von Ziegelscherben, woraus eine Reduzierung der Querschnittsdicke resultiert [53].

Auf der brandabgewandten Wandseite erfolgt bei keinem Prüfbericht eine Abplatzung vom Putz. Bei 19 von 33 Feuerwiderstandsprüfungen kam es zu einer Rissbildung auf der brandabgewandten Wandseite. Hierzu zählen auch Risse, welche direkt nach dem Aufbringen der Prüflast entstanden sind. Ein Putz auf der brandabgewandten Wandseite dient nicht nur zur Ausbildung einer glatten Oberfläche, sondern kann auch einen Rauchdurchtritt verhindern und den Wärmedurchgang reduzieren.

Brandschutztechnisch wirksame Putze sind gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] Leichtputze nach DIN 18550-4 [59] sowie gipshaltige Putze nach DIN 18550-2 [60]. Nach dem Europäischen Normen sind Gipsputzmörtel nach DIN EN 13279-1 [61] oder Leichtputzmörtel nach DIN EN 998-1 [62] brandschutztechnisch wirksam. Auch für Kalk-Innenputze nach DIN EN 998-1 [62] wurden gute Ergebnisse in Bezug auf den Brandschutz für Ziegelmauerwerk erzielt [33].

3.4 Stegdicken

Wärmedämmende Hochlochziegel haben unterschiedlichste Steganordnungen. Während Großkammerziegel in der Regel keine Diagonalstege aufweisen, sind diese vereinzelt bei kleingelochten Ziegeln vorhanden. Außen- und Innenstege, jeweils in Längs- und Querrichtung, können unterschiedliche Dicken aufweisen. Am relevantesten ist der Außenlängssteg, da dieser als erstes den Einwirkungen infolge der Brandbeanspruchung ausgesetzt ist.

3.4.1 Außenlängssteg

Je dicker der Außenlängssteg, desto robuster ist dieser in der Regel. Dies gilt auch in Bezug auf die erhöhte Spannung, welche auf die Außenlängsstege infolge der in Kapitel 3.2 beschriebenen horizontalen Verformung während einer Feuerwiderstandsprüfung einwirken können. Demnach resultieren aus dicken Außenlängsstegen bei horizontalen Verformungen, sofern es zu keinen bzw. nur geringen Schädigungen von diesen während einer Feuerwiderstandsprüfung kommt, gute Brandschutzeigenschaften. Weißt ein Ziegel dicke Längsstege auf, hat dieser üblicherweise in Summe weniger Längsstege über den Querschnitt angeordnet und dementsprechend tendenziell weniger Lochreihen. Erfolgt ein Abplatzen von Längsstegen, wie es bei Feuerwiderstandsprüfungen vorkommen kann, fallen diese demnach stärker ins Gewicht, was sich negativ auf die Tragfähigkeit auswirken kann.

Es konnte anhand der Prüfberichte festgestellt werden, dass dicke Außenstege im Brandfall zu geringeren Abplatzungen und zu einer Rissbildung neigen [1]. Bei einem Vergleich von Prüfbeobachtungen von Ziegeln mit einem ähnlichen Ausnutzungsfaktor, aber unterschiedlicher Außenlängsstegdicke, neigen die Ziegel mit den dünneren Stegen vermehrt und früher zu Knackgeräuschen und einer Rissbildung sowie zu Abplatzungen. Beispiele hierfür sind die Feuerwiderstandsprüfungen der Prüfberichte PB 3.2/16-302-1 Ä [63] und (3713/840/13)-TM [64] im Vergleich zu (3365/426/14)-TM [65] und (3768/953/12)-TM [49] bei den Großkammerziegeln sowie bei den kleingelochten unverfüllten Ziegeln die Prüfung in Bericht (2101/399/16)-Kip [66] im Vergleich zu (3001/106/12)-TM [58].

Des Weiteren gilt gemäß DIN EN 15080-12 [67], dass bei vertikal gelochten Mauersteinen die Prüfergebnisse auf Mauersteine unter definierten Anforderungen angewendet werden können, die dieselbe oder eine größere Dicke der Innen- und Außenstege aufweisen. Dies spricht ebenfalls dafür, dass sich dickere Außenlängsstege positiv bei Feuerwiderstandsprüfungen auswirken.

3.4.2 Summe Materialstärke in Wanddickenrichtung

Wird eine Mauerwerkswand einer einseitigen Temperaturbeanspruchung ausgesetzt, stellt sich in der Wand ein Temperaturgefälle ein. Kommt es aufgrund der erhöhten Temperatur und einer Normalkraftbeanspruchung zu Ziegelabplatzungen, platzen die Längsstege beginnend von der brandbeanspruchten Wandseite nach und nach ab. Es ist davon auszugehen, dass sich eine größere Anzahl vieler dünner bzw. resistenterer dicker Längsstege in Reihe geschaltet positiv auf die Feuerwiderstandsdauer einer Mauerwerkswand auswirken [1]. Ebenso kann eine Übertragbarkeit von Prüfergebnissen unter definierten Anforderungen gemäß DIN EN 15080-12 [67] erfolgen, sofern der nicht bei einer Feuerwiderstandsprüfung klassifizierte Ziegel einen höheren Wert für die Summe der Stegdicken aufweist.

3.5 Weitere Ziegeleigenschaften

Neben den bereits untersuchten Ziegeleigenschaften werden weitere Kennwerte in Anlehnung an zu untersuchende Eigenschaften für eine Klassifizierung aufgeführt, welche einen wärmedämmenden Hochlochziegel definieren und einen Einfluss auf das Ergebnis einer Feuerwiderstandsprüfung haben könnten. Es gilt zu beachten, dass der Gesamtlochquerschnitt, die Lochreihenanzahl sowie die Stegdicken in Wanddickenrichtung (demnach auch die Außenlängsstegdicke) und die Größe der Lochkammern in Abhängigkeit zueinanderstehen stehen. Demnach bringt eine Änderung von einem Parameter mindestens eine Änderung von einem anderen mit sich. Zu den in Tab. 3.4 gelisteten Eigenschaften konnten aus den Prüfberichten der Tab. 3.1 keine konkreten Erkenntnisse erlangt werden. Es werden diesbezüglich Erkenntnisse aus dem Kaltfall anhand von theoretischen Überlegungen auf den Brandfall übertragen. Diese fließen bei der Festlegung der Anwendungsgrenzen für die definierten Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk in Kapitel 6.1 ein.

Tab. 3.4: Theoretische Überlegungen in Bezug auf den Feuerwiderstand

Eigenschaft	Kaltfall	Theoretische Überlegung Brandfall
Ausnutzungsfaktor	Sofern die Einwirkung größer ist als der Tragwiderstand resultiert ein Bauteilversagen.	Je höher der Ausnutzungsfaktor α_{fi}, desto geringer die Feuerwiderstandsdauer.
Steindruckfestigkeit	Die Mauerwerksdruckfestigkeit setzt sich aus der Festigkeit der Steine und des Mörtels zusammen. Demnach beeinflusst die Steindruckfestigkeit den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für die Kalttragfähigkeit.	Der Ausnutzungsfaktor α_{fi} ist abhängig von dem Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd}. Demzufolge resultieren bei Feuerwiderstandsprüfungen mit gleicher Prüflast aber höheren Steindruckfestigkeiten geringere Ausnutzungsfaktoren α_{fi}, was sich positiv auf die Feuerwiderstandsdauer auswirken sollte. Gemäß DIN EN 15080-12 [67] wirkt ein höher deklarierter Wert der Druckfestigkeit sich bei identischen oder geringeren Ausnutzungsfaktor positiv im Brandfall aus.
Wandschlankheit λ	Die Wandschlankheit λ wird bei der Berechnung des Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für die Kalttragfähigkeit berücksichtigt. Schlankere Wände neigen zu größeren horizontalen Verformungen.	Schlankere Wände neigen bei einer Feuerwiderstandsprüfung zu größeren horizontalen Verformungen, woraus früher ein Stabilitätsversagen resultieren kann.
Rohdichte	Die Rohdichte wird indirekt über die Festigkeit des Mauerwerks bei der Berechnung des Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für die Kalttragfähigkeit berücksichtigt. Je größer die Rohdichte, desto größer die spezifische Festigkeit.	Eine große spezifische Festigkeit sollte sich positiv auf die Tragfähigkeit im Brandfall auswirken und zu längeren Feuerwiderstandsdauern beitragen. Gemäß DIN EN 1996-1-2/NA [7] und DIN EN 15080-12 [67] wirken größere Rohdichten sich positiv im Brandfall aus.
Gesamtlochquerschnitt	Bei einem geringeren Gesamtlochquerschnitt ist bei ansonsten identischen Materialkennwerten mehr Ziegelmaterial zur Lastabtragung vorhanden. Es resultieren dickere oder mehr Ziegelstege. Dies wirkt sich positiv auf die Tragfähigkeit aus.	Dickere Ziegelstege sollten weniger stark bei einer Feuerwiderstandsprüfung zum Abplatzen neigen. Bei mehr Ziegelstegen fällt ein Abplatzen von einem Ziegelsteg nicht so stark ins Gewicht. Des Weiteren gilt gemäß DIN EN 15080-12 [67], dass eine Übertragung von Prüfergebnissen auf Ziegel mit gleichen oder geringerem prozentualen Lochanteil möglich ist.
Lochreihenanzahl	Die Summe der Ziegelstegfläche setzt sich zusammen aus der Anzahl und der Größe der Lochreihen. Bei gleichbleibender Lochreihengröße gilt, dass bei geringerer Lochreihenanzahl mehr Ziegelmaterial zur Lastabtragung vorhanden ist.	Mehr Ziegelmaterial zur Lastabtragung sollte sich positiv auf die Feuerwiderstandsdauer auswirken, da von geringeren Abplatzungen auszugehen ist.

4 Experimentelle Untersuchungen

Zur Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen sowie der Definition von Anpassungsfaktoren für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen resultierend aus einer kleineren Prüfkörpergeometrie reicht eine Analyse der Prüfberichte des Kapitels 3 nicht aus. Aus diesem Grund werden experimentelle Untersuchungen an wärmedämmenden Hochlochziegeln für jeden der in Kapitel 2.1.2 definierten Ziegeltypen durchgeführt. Bei der Verwendung von identischen Ziegeln bei den Feuerwiderstandsprüfungen kann der Einfluss von unterschiedlichen Ziegeleigenschaften auf die Feuerwiderstandsdauer auf ein Minimum begrenzt werden.

An den ausgewählten Produkten wurden verschiedene Eigenschaften gemäß den Normenteilen der DIN EN 772 untersucht, sowie Teilflächenbelastungen und Biegehaftzugfestigkeiten im Normaltemperaturbereich bestimmt. Im Anschluss daran erfolgten gezielt ausgewählte Untersuchungen zum temperaturabhängigen Materialverhalten im erhöhten Temperaturbereich, welche zur Erforschung des Bauteilverhaltens bei Brandbeanspruchung dienen. Ebenso wurden Feuerwiderstandsprüfungen an Mauerwerkswänden (H x L = 3,0 m x 1,0 m) in unterschiedlichen Dicken durchgeführt, um den Einfluss der Schlankheit zu untersuchen. Ziel der Versuche an den Mauerwerkswänden war es, Feuerwiderstandsdauern zwischen 30 und 120 Minuten zu erreichen, um aus diesen Mindestfeuerwiderstandsklassen zu definieren.

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgten Feuerwiderstandsprüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 3,0 m) mit einer Wanddicke von 0,365 m. Mittels dieser Versuche sollen für verschiedene Feuerwiderstandsdauern Faktoren ermittelt werden, womit auf den Feuerwiderstand der großformatigeren Wandprüfungen nach DIN EN 1365-1 [5] (H x L = 3,0 m x 3,0 m) geschlossen werden kann. Durch die Alternative der Prüfung von den kleinformatigeren Mauerwerkswänden würde die Anzahl der Prüfinstitute mit einer Möglichkeit zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsfähigkeit von wärmedämmenden Hochlochziegeln erhöht werden. Abschließend wurden zwei Validierungsversuche gemäß DIN EN 1365-1 [5] mit den normativ geregelten Wandabmessungen (H x L = 3,0 m x 3,0 m) durchgeführt. Diese Versuche dienen zum einem zur Überprüfung der Versuchsergebnisse mit den Prüfkörpern mit einer reduzierten Länge auf 1,0 m sowie zum anderen zur Validierung des Brandofens und des Prüfstands der RPTU.

4.1 Ziegelauswahl und Bestimmung derer Eigenschaften

In Bezug auf eine möglichst große Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Ziegel des gleichen Typs war es das Ziel, einen repräsentativen wärmedämmenden Hochlochziegel mit einer Großkammerlochung sowie einer Kleinlochung jeweils verfüllt und unverfüllt auszuwählen. Für die Auswahl der Ziegel wurden Voruntersuchungen mit verschiedenen Füllstoffen für die Ziegelkammern durchgeführt. Die Hauptkriterien für die Ziegelauswahl waren folgende:

1) Niedrige Druckfestigkeiten, da nach DIN EN 15080-12 [67] gilt, dass Prüfergebnisse übertragen werden können, sofern das Mauerwerk denselben oder einen höheren deklarierten Wert der Druckfestigkeit von den Mauersteinen bei einer Prüfung nach DIN EN 772-1 [68] aufweist und denselben oder einen

geringeren Ausnutzungsfaktor besitzt. Des Weiteren können an der RPTU nur Feuerwiderstandsprüfungen mit einer maximalen Prüflast von 600 kN realisiert werden.

2) Eine gute Teilbarkeit der Ziegel für Feuerwiderstandsprüfungen mit halber Ziegelbreite zur Untersuchung der Wandschlankheit λ. Durch ein Zerteilen der Ziegel kann ein Einfluss aus einer anderen Ziegelcharge ausgeschlossen werden.
3) Nahezu identische Angaben für die Druckfestigkeit, die Wärmeleitfähigkeit sowie für die Rohdichte von dem kleingelochten und dem Großkammer-Hochlochziegel, um direkte Einflüsse von der Lochung bzw. Dämmstofffüllung zu erhalten.

Für die experimentellen Untersuchungen mit einem verfüllten Großkammerziegel fiel anschließend die Wahl auf den wärmedämmenden Hochlochziegel ThermoPlan MZ70 (Z-17.1-1084) [69]. Als kleingelochter verfüllter Ziegel wurde der UNIPOR W07 CORISO (Z-17.1-1056) [70] ausgewählt. Der gleiche Ziegel wurde auf Anfrage unverfüllt gefertigt. Somit konnte dieser auch für die Untersuchungen an Ziegeln der Kategorie „kleingelocht unverfüllt“ verwendet werden. Weitere Informationen zu den ausgewählten Ziegeln können den Kapiteln 4.1.2 und 4.1.3 entnommen werden.

4.1.1 Voruntersuchungen

Für die Ziegelauswahl wurden Voruntersuchungen durchgeführt, um die für den Brandfall kritischste Dämmstofffüllung in Bezug auf die Feuerwiderstandsdauer zu ermitteln [1]. Nach einer Recherche bzgl. unterschiedlicher Dämmstofffüllungen bei wärmedämmenden Hochlochziegeln wurde ein Brandversuch durchgeführt, bei welchem ein Ziegel mit Mineralwollfüllung und ein Ziegel mit Holzfaserfüllung miteinander verglichen wurden. Hierfür wurden jeweils drei Ziegel übereinandergesetzt und in einem Brandofen einseitig für 90 Minuten mit der ETK beflammt. In Abb. 4.1 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Abb. 4.1: Rückansicht vom Versuchsaufbau zur Bestimmung der kritischsten Dämmstofffüllung für den Brandfall

Der linke Dreisteinkörper (A) besteht aus UNIPOR W07 SILVACOR Ziegeln (Z-17.1-1162) [71], welche mit einem Dämmstoff aus reiner Holzfaser verfüllt sind. Der rechte Dreisteinkörper (B) besteht aus UNIPOR W07 CORISO Ziegeln (Z-17.1-1056), welche mit einer nicht brennbaren Mineralwolle verfüllt sind. Die Ziegel wurden nicht miteinander vermörtelt, da bei dem in Abb. 4.1 dargestellten Versuchsaufbau keine Kraftübertragung zwischen den Ziegeln erfolgt. Die Temperaturmessungen während des Brandversuchs erfolgte jeweils bei dem mittleren Ziegel beider Dreisteinkörper. Die Thermoelemente für die Temperaturmessung waren an identischen Positionen montiert. Die Temperaturmessungen erfolgten an der brandzugewandten und brandabgewandten Seite sowie jeweils in der ersten, dritten und achten Lochreihe von insgesamt 15 Lochreihen bei einer Breite von 365 mm. Der Abb. 4.2 sind die gemessenen Temperaturen zu entnehmen.

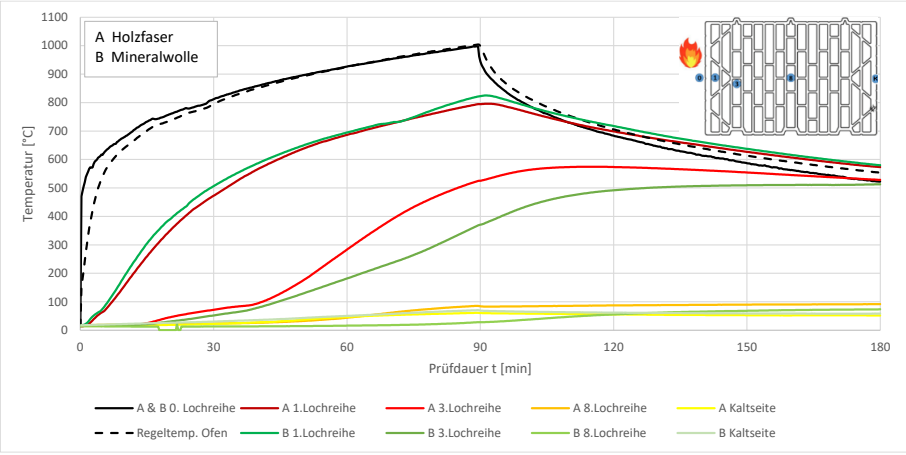


Abb. 4.2: Temperaturverläufe über den Ziegelquerschnitt während der Feuerwiderstandsprüfung

Gemäß Abb. 4.2 sind die Temperaturen auf der Kaltseite nach 90 Minuten Brandbeanspruchung für beide Ziegel (A = 60,6 °C; B = 69,1 °C) bereits ab der 30. Prüfminute höher als für den mit Mineralwolle verfüllten Ziegel in der achten Lochreihe. Die Temperaturen der achten Lochreihe, welche sich ungefähr auf halber Ziegelbreite befinden, betragen nach 90 Minuten Brandbeanspruchung für den Ziegel A 84,0 °C und für den Ziegel B nur 28,3 °C. Demnach ist die Temperatur auf der Kaltseite im Verhältnis zu anderen Feuerwiderstandsprüfungen mit verfüllten Hochlochziegeln für den Dreisteinkörper B außerordentlich hoch. Anderen Prüfberichten mit wärmedämmenden Hochlochziegeln ist zu entnehmen, dass die Temperaturen auf der brandabgewandten Wandseite nach 90 Minuten Branddauer für verputzte, ungefüllte Ziegel mit einer äquivalenten Breite von 365 mm um ~5 °C nach 90 Minuten zunehmen, während bei verputzten, verfüllten Ziegeln fast kein Temperaturanstieg zu verzeichnen ist. Es ist davon auszugehen, dass die fehlende Putzschicht nicht für den großen Temperaturunterschied verantwortlich ist. Begründet wird die hohe Temperatur auf der brandabgewandten Wandseite des Dreisteinkörpers B bei dem durchgeführten Versuch mit Undichtigkeiten im Versuchsaufbau. Dadurch konnte Wärme seitlich an den Ziegeln

vorbei an die Rückseite gelangen. Hierfür spricht auch die niedrigere Temperatur der achten Ziegelreihe von dem Ziegel mit Mineralwollfüllung.

Gemäß Abb. 4.2 sind die Temperaturen in der ersten Lochreihe für beide Ziegel nahezu identisch. Das Temperaturgefälle zwischen der ersten und dritten Lochreihe ist bei dem Ziegel mit Mineralwolle (B) stärker ausgeprägt als bei dem Ziegel der mit reiner Holzfaser (A) verfüllt ist. Ein Grund für das größere Temperaturgefälle ist, dass die brennbare Holzfaser Dämmstofffüllung nach 90 Minuten bis zur achten Lochreihe verbrannt ist. Im Gegensatz dazu ist bei dem Ziegel mit Mineralwollfüllung lediglich die Dämmung in der ersten Lochreihe verkohlt und ab der 2. Lochreihe die Dämmung als solches noch zu erkennen.

Aufgrund der höheren Temperaturunterschiede über einen geringeren Ziegelquerschnitt können größere temperaturbedingte Spannungen bei dem mit Mineralwolle verfüllten Ziegel auftreten. Dies kann zu einer stärkeren Rissbildung oder Abplatzungen führen, welche in der Praxis unter einer einwirkender Normalkraft nochmals zunehmen. Die nachfolgenden Fotos (Abb. 4.3) zeigen die Schadensbilder beider Dreisteinkörper nach dem Brandversuch.

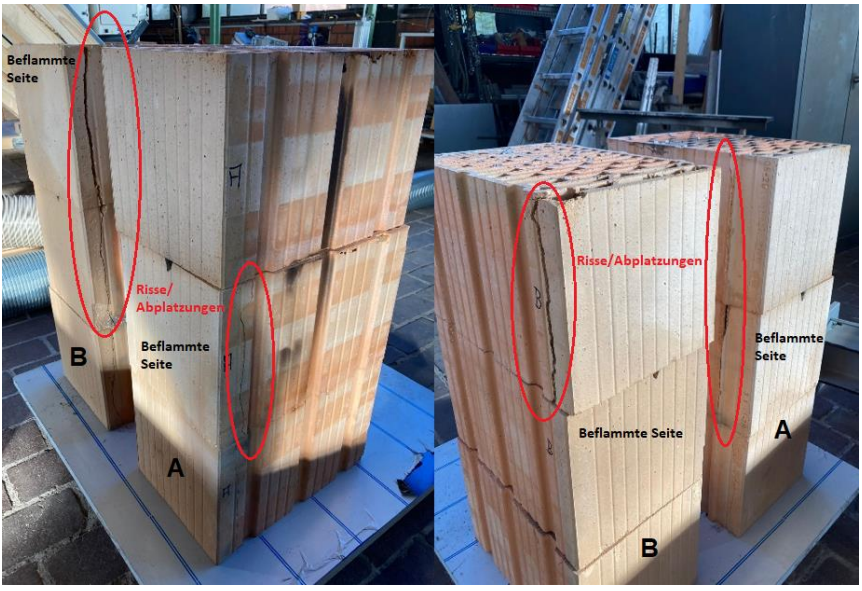


Abb. 4.3: Schadensbilder beider Dreisteinkörper nach dem Brandversuch

Wie in Abb. 4.3 zu erkennen, weisen beide Dreisteinkörper Schädigungen auf. Bei einem Vergleich der Schadensbilder beider Dreisteinkörper A und B ist zu erkennen, dass deutlich stärkere Risse aufgrund der temperaturbedingten Spannungen bei den mit Mineralwolle verfüllten Ziegeln (Dreisteinkörper B) auftreten. Für weitere Untersuchungen in Hinblick auf eine große Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde eine Mineralwollfüllung für die verfüllten Ziegel gewählt.

4.1.2 Technische Daten der wärmedämmenden Hochlochziegel

4.1.2.1 Verfüllter Großkammer-Hochlochziegel ThermoPlan MZ70 (Z-17.1-1084)

Es folgen in Tab. 4.1 die relevantesten Informationen des ausgewählten Großkammer-Hochlochziegels für die nachfolgenden Untersuchungen.

Tab. 4.1: Produktdaten Großkammer-Hochlochziegel ThermoPlan MZ70 [72]

Zulassung	Z-17.1.1084
Hersteller	August Lücking GmbH & Co. KG
Steindruckfestigkeitsklasse	8
Charakt. Mauerwerksdruckfestigkeit f_k	2,2 N/mm^2
Rohdichteklasse	0,55; 0,60; 0,60 kg/dm^3 (0,55 gemäß Zulassung mit ermittelter Rohdichte und Banderole und 0,60 gemäß Zulassung mit ermittelter Rohdichte)
Wärmeleitfähigkeit λ_R	0,07 W/(m·K)
Dämmstoff	Brickrock®, Baustoffklasse A1
Getestete Ziegelbreiten	240; 365; 490 mm
Länge	248 mm
Höhe	249 mm
Längsstegdicke	≥ 13,2 mm (240 mm); ≥ 14,9 mm (365 mm); ≥ 15,8 mm (490 mm)
Außenquerstegdicke	≥ 7,0 mm
Innenquerstegdicke	≥ 8,0 mm
Lochreihenanzahl	4 (240 mm); 6 (365 mm); 8 (490 mm)
Gesamtlochquerschnitt	≤ 65 % (240 mm); ≤ 64 % (≥ 365 mm)

Der Abb. 4.4 sind die Steganordnungen und Abmessungen sowie das Erscheinungsbild des Ziegels ThermoPlan MZ70 in der exemplarischen Breite von 365 mm zu entnehmen. Gewisse Toleranzen von den angegebenen Maßen sind zulässig. Die Grenzmaßabweichungen betragen -10 bis +5 mm für die Länge und -10 bis +8 mm für die Breite sowie -1 bis +1 mm für die Ziegelhöhe [69].

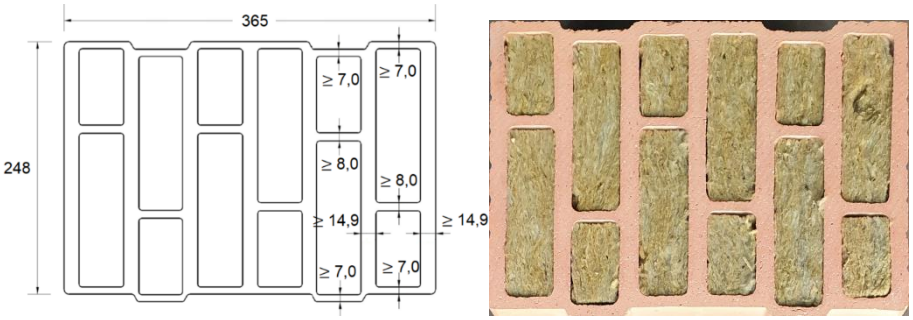


Abb. 4.4: Steganordnungen und Abmessungen ThermoPlan MZ70 (Längsstege exemplarisch bei Ziegelbreite 365 mm) [69]

4.1.2.2 Verfüllter kleingelochter Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO (Z-17.1-1056)

Äquivalent zu dem Großkammer-Hochlochziegel folgen in Tab. 4.2 die für die nachfolgenden Untersuchungen und Feuerwiderstandsprüfungen relevantesten Informationen zu dem verwendeten kleingelochten verfüllten Hochlochziegel.

Tab. 4.2: Produktdaten kleingelochter Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO [73]

Zulassung	Z-17.1.1056
Hersteller	Ziegelwerke Otto Bergmann GmbH
Steindruckfestigkeitsklasse	6
Charakt. Mauerwerksdruckfestigkeit f_k	2,2 N/mm^2
Rohdichteklasse	0,65 kg/dm^3 (gemäß Banderole und DIN V 105-2)
Wärmeleitfähigkeit λ_R	0,07 W/(m·K)
Dämmstoff	UNIPOR CORISO Mineralwolle, Baustoffklasse A1
Getestete Ziegelbreiten	365 mm
Länge	247 mm
Höhe	249 mm
Außenlängsstegdicke	≥ 12,0 mm
Innenlängsstegdicke	≥ 5,2
Außenquerstegdicke	≥ 6,3 mm
Innenquerstegdicke	≥ 4,4 mm
Diagonalstegdicke	≥ 4,0 mm
Lochreihenanzahl	15
Gesamtlochquerschnitt	≤ 65 %

Abb. 4.5 können die Steganordnungen und Abmessungen sowie das Erscheinungsbild des verwendeten Ziegels UNIPOR W07 CORISO entnommen werden. Die Grenzmaßabweichungen sind identisch zum Großkammer-Hochlochziegel [70].

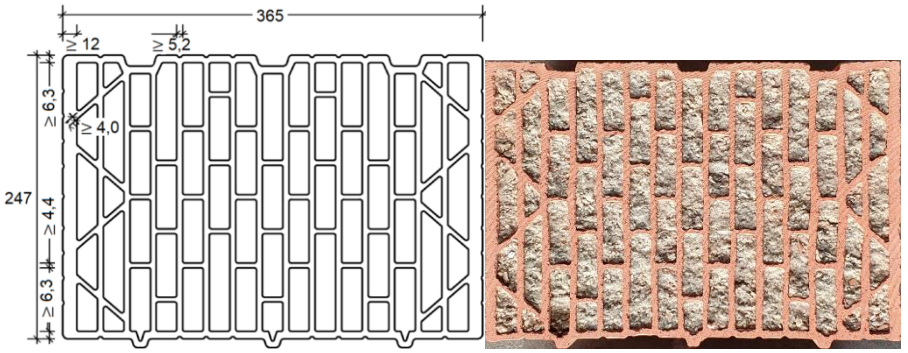


Abb. 4.5: Steganordnungen und Abmessungen UNIPOR W07 CORISO [70]

4.1.2.3 Unverfüllter kleingelochter Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO (I.A.a. Z-17.1-1056)

Bei diesem Ziegeltyp handelt es sich um den identischen Scherben wie von dem verfüllten, kleingelochten Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO. Einziger Unterschied zu diesem Ziegel ist, dass diese in der Fertigung nicht mit der UNIPOR CORISO Mineralwolle verfüllt wurden. Die wesentlichen Produkteigenschaften der Ziegel sind demnach nahezu identisch mit Ausnahme des Werts für die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit der unverfüllten Ziegel sollte größer als λ_R = 0,07 W/mK sein, da die Kammern nicht mit einem wärmedämmenden Material verfüllt sind. In Bezug auf die Rohdichte ist der Ziegel gemäß DIN V 105-2 in die Rohdichteklasse 0,55 einzuteilen [74].

4.1.3 Bestimmung der Ziegeleigenschaften

Nach der Auswahl und Beschaffung der wärmedämmenden Hochlochziegel wurden dessen Eigenschaften bestimmt [1]. Diese werden für eine spätere Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf andere Ziegel benötigt. Besonderes Augenmerk wird auf die Ermittlung der Druckfestigkeit gelegt, da diese einen großen Einfluss auf den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} hat. Abhängig von diesem wird die Prüflast bei einer Feuerwiderstandsprüfung gewählt, mit welchem sich der Ausnutzungsfaktor α_{fi} gemäß Gleichung (2.12) berechnen lässt. Es wurden folgende Eigenschaften bestimmt:

- Bestimmung der Abmessungen (Länge, Breite und Höhe) gemäß DIN EN 772-16 [75]
- Trockenmasse verfüllt und unverfüllt gemäß DIN EN 772-13 [76]
- Ziegelrohdichte verfüllt und unverfüllt gemäß DIN EN 772-13 [76]
- Rohdichte des Dämmstoffs (Differenz aus Rohdichte verfüllt und unverfüllt und unter Einbeziehung des Lochanteils)

- Maximale Druckkraft sowie die daraus resultierende Druckfestigkeit gemäß DIN EN 772-1 [68]
- Ermittlung der Kammerreihen und des Gesamtlochquerschnitts gemäß DIN EN 772-9 [77]
- Stegabmessungen sowie Summe der Querstegdicken gemäß DIN EN 772-16 [75]
- Bestimmung des Gewichts (trocken, nass und unter Wasser) gemäß DIN EN 772-13 [76]
- Scherbenrohdichte gemäß DIN EN 772-13 [76]
- Brutto- und Nettovolumen gemäß DIN EN 772-9 [77]
- Prozentualer Lochanteil gemäß DIN EN 772-9 [77]
- Masse feucht und nach der Trocknung sowie die Bezugsfeuchtegehalte gemäß DIN EN ISO 12571 [78]
- Ebenheit der Probekörper gemäß DIN EN 772-20 [79]
- Parallelität der Probekörper gemäß DIN EN 772-16 [75]

Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Ziegel sowie für die variierenden Ziegelbreiten sind Anlage B zu entnehmen. Die dort aufgeführten Prüfergebnisse stammen von der Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH in Essen. Aufgrund abweichender Summen für die Querstegdicken oder von den Toleranzen in Bezug auf die Ziegellänge oder -höhe bzw. größeren Ziegelrohdichten erfüllen die Ziegel nicht die definierten Eigenschaften gemäß Zulassung. Spätere Anwendungsbedingungen (Tab. 6.2) bezüglich der Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen werden aus diesem Grund in Abhängigkeit von den Messwerten und nicht von den Zulassungswerten definiert. In Bezug auf die Druckfestigkeiten wurden jeweils zehn Ziegel verfüllt und unverfüllt geprüft, um einen möglichen Einfluss der Dämmstofffüllung in Bezug auf die Druckfestigkeit bei einem Einzelstein zu untersuchen. Des Weiteren wurden Untersuchungen am verwendeten Mörtel sowie dem unterschiedlichen Innen- und Außenputz durchgeführt, welche zur Definition von Materialparametern dienen. In Kombination mit den mechanischen Untersuchungen bei Raumtemperatur und der Bestimmung von thermischen Materialeigenschaften soll das Bauteilverhalten bei Brandbeanspruchung näher erforscht werden.

4.1.3.1 Großkammerziegel ThermoPlan MZ70

Für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 sind gemäß der Zulassung Z-17.1.1084 [69] folgende Druckfestigkeiten dem charakteristischen Wert der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k zugeordnet:

f_k = 1,8 N/mm² ≙ ≥ 7,5 N/mm² im Mittel und ≥ 6,0 N/mm² als kleinsten Einzelwert [69]

f_k = 2,2 N/mm² ≙ ≥ 10,0 N/mm² im Mittel und ≥ 8,0 N/mm² als kleinsten Einzelwert [69]

Gemäß der Zulassung Z-17.1.1084 [69] wird für die Klassifizierung der charakteristischen Druckfestigkeit von Mauerwerk ein Mittel- und Einzelwert der Druckfestigkeit benötigt. Dieser berechnet sich aus den Steinabmessungen und der maximal aufnehmbaren Kraft aus einer vollflächigen Druckfestigkeitsprüfung. Ausgehend von den angegebenen Mittel- und Einzelwerten der Druckfestigkeit und den zugehörigen cha-

rakteristischen Werten der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k wurden Zwischenwerte interpoliert sowie eine Extrapolation in Anlehnung an DIN EN 1996-1-1 [13] von diesen vorgenommen.

$$Druckfestigkeit_{(interpoliert)} = y_1 + \left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1}\right) \cdot (y_2 - y_1) \quad (4.1)$$

$$Druckfestigkeit_{(extrapoliert)} = \left(\frac{x}{x_{1\ bzw.2}}\right)^{\frac{1,0}{0,7}} \cdot y_{1\ bzw.2} \quad (4.2)$$

Dabei ist:

x Zu extrapolierender f_k-Wert

x_1 Bekannter geringerer f_k-Wert

x_2 Bekannter höherer f_k-Wert

y_1 Bekannte Druckfestigkeit (zugehörig zu x_1)

y_2 Bekannte Druckfestigkeit (zugehörig zu x_2)

Tab. 4.3 zeigt die aus den geprüften Steindruckfestigkeiten resultierenden charakteristischen Werte der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k.

Tab. 4.3: Aus Steindruckfestigkeiten resultierende charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70

Ziegelbreite [mm]	Dämmstofffüllung	Prüfzeugnis (Anlage B)	Minimaler Wert Druckfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert Druckfestigkeit [N/mm²]	f_k [N/mm²]
240	Nein	002/22/S/3a	9,7	10,8	2,3*
240	Ja	002/22/S/3b	8,3	10,9	2,2
Maßgebender f_k-Wert aus gemeinsamer Auswertung***					2,2
365	Nein	002/22/S/2	12,8	13,9	2,7*
365	Ja	002/22/S/2a	12,1	13,6	2,7*
Maßgebender f_k-Wert aus gemeinsamer Auswertung***					2,7*
490	Nein	002/22/S/4	9,0	9,9	2,1**
490	Ja	002/22/S/4b	8,7	10,0	2,2
Maßgebender f_k-Wert aus gemeinsamer Auswertung***					2,1**
* Extrapoliert; ** Interpoliert; *** Gemeinsame Auswertung aufgrund von nahezu identischen Mittelwerten und Varianzen < 1,75 möglich. Zudem konnte kein Ausreiser gemäß dem Q-Test von Dixon identifiziert werden.					

4.1.3.2 Kleingelochter Ziegel UNIPOR W07 CORISO

Für den kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO verfüllt und unverfüllt sind gemäß der Zulassung Z-17.1.1056 [70] folgende Druckfestigkeiten dem charakteristischen Wert der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k zugeordnet:

f_k = 1,5 N/mm² ≙ ≥ 5,0 N/mm² im Mittel und ≥ 4,0 N/mm² als kleinsten Einzelwert [70]

f_k = 2,2 N/mm² ≙ ≥ 7,5 N/mm² im Mittel und ≥ 6,0 N/mm² als kleinsten Einzelwert [70]

f_k = 2,6 N/mm² ≙ ≥ 10,0 N/mm² im Mittel und ≥ 8,0 N/mm² als kleinsten Einzelwert [70]

Ausgehend von den angegebenen Mittel- und Einzelwerten der Druckfestigkeit und den zugehörigen charakteristischen Werten der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k wurden Zwischenwerte gemäß der Gleichung 4.1 interpoliert. Die aus den Steindruckfestigkeiten resultierenden charakteristischen Werte der Mauerwerksdruckfestigkeit f_k sind Tab. 4.4 zu entnehmen.

Tab. 4.4: Aus Steindruckfestigkeiten resultierende charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k für den kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO

Ziegelbreite [mm]	Dämmstofffüllung	Prüfzeugnis (Anlage B)	Minimaler Wert Druckfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert Druckfestigkeit [N/mm²]	f_k [N/mm²]
365	Nein	002/22/S/5b	7,7	9,0	2,4*
365	Ja		8,7	9,6	2,5*
Maßgebender f_k-Wert aus gemeinsamer Auswertung**					2,4
* Interpoliert; ** Gemeinsame Auswertung aufgrund von nahezu identischem Mittelwert und Varianz < 0,60 möglich. Zudem konnte kein Ausreiser gemäß dem Q-Test von Dixon identifiziert werden.					

Eine weitere Größe, die für die Berechnung von dem Tragwiderstand einer Mauerwerkswand benötigt wird, ist die tatsächliche Breite der Ziegel nach DIN EN 772-16 [75]. Nachfolgend sind die gemessenen Mittelwerte der exakten Steinbreiten gemäß den Prüfergebnissen der Anlage B aufgeführt:

ThermoPlan MZ70 (240 mm) = 239 mm

ThermoPlan MZ70 (365 mm) = 364 mm

ThermoPlan MZ70 (490 mm) = 497 mm

UNIPOR W07 CORISO (365 mm) = 362 mm

Alle gemessenen Ziegelbreiten liegen innerhalb der Toleranz gemäß zugehöriger Zulassung. Für genauere Ergebnisse wurden bei sämtlichen Berechnungen die tatsächlich vorhandenen Steinbreiten angesetzt. Der Einfachheit halber werden nachfolgend immer die Nennmaße der Hersteller genannt, wodurch die Ziegel besser in Gruppen zusammengefasst werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit besteht darin, kleinformatige Wände gemäß den Anforderungen aus

DIN EN 1052-1 [80] zu prüfen. Hierfür wurden Kleinprüfkörper mit den Abmessungen von 1,50 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge hergestellt. In Summe wurden acht solcher Druckfestigkeitsprüfungen an 365 mm dicken Wänden durchgeführt [1]. Insgesamt wurden sechs Wände mit dem kleingelochten unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO geprüft und je eine Wand bestehend aus dem gleichen kleingelochten verfüllten Ziegel und den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70. Der Tab. 4.5 sind die Versuchsergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen zu entnehmen.

Tab. 4.5: Ergebnisse der maximalen vertikalen Tragwiderstände $N_{Rm,Versuch}$ der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) bei 21 °C

Ziegeltyp	$N_{Rm,Versuch}$ [kN]		Wanddicke [mm]	Spannung [N/mm²]	Kommentar
MZ70	1459,6		364	4009,9	Gedeckelte Fugen
W07 V	1350,1		362	3729,6	Gedeckelte Fugen
W07 UV	989,8	Mittelwert: 1030,2	362	2734,3	Gedeckelte Fugen
W07 UV	979,5		362	2705,8	Keine gedeckelten Fugen
W07 UV	1064,0*		362	2939,2	Keine gedeckelten Fugen
W07 UV	1075,0*		362	2969,6	Keine gedeckelten Fugen
W07 UV	1053,0*		362	2908,8	Keine gedeckelten Fugen
W07 UV	1020,0*		362	2817,7	Keine gedeckelten Fugen
* Keine Dokumentation der Messdaten					

Die ermittelten maximalen vertikalen Tragwiderstände auf Mittelwertniveau $N_{Rm,Versuch}$ der Tab. 4.5 zeigen, dass die Deckelung der Lagerfuge bei gleichem Ziegel (UNIPOR W07 CORISO unverfüllt) keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit einer Mauerwerkswand im Kaltfall besitzt. Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse des kleingelochten unverfüllten Ziegels UNIPOR W07 CORISO ergibt sich ein Streubereich von 979,5 kN bis 1075,0 kN. Es kann ein Mittelwert von 1030,2 kN bestimmt werden. Die Absolutwerte für den maximalen vertikalen Tragwiderstand für jeden Ziegeltypen werden für spätere Berechnungen in Kapitel 5.3.2 benötigt.

Gemäß DIN EN 1052-1 [80] kann für die Mauerwerkswand bestehend aus dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 eine charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit von f_k = 3,36 N/mm² berechnet werden. Die charakteristische Druckfestigkeit der Mauerwerkswand bestehend aus dem Ziegel UNIPOR W07 CORISO verfüllt berechnet sich zu f_k = 3,12 N/mm². Für die Wände bestehend aus dem gleichen Ziegel ohne Dämmstofffüllung (unverfüllt) kann eine charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit von f_k = 2,38 N/mm² berechnet werden.

Während die Druckfestigkeiten der Einzelsteine der verfüllten und unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO aufgrund geringer Unterschiede in den Messwerten zusammen ausgewertet wurden, wird dies bei den erzielten Ergebnissen für die Druckfestigkeit anhand der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) nicht gemacht. Begründet wird dies mit deutlichen Abweichungen der Ergebnisse für die Druckfestigkeit für die Wände bestehend aus den unverfüllten und verfüllten kleingelochten Ziegel. Aus den Versuchsergebnissen wird nicht klar, ob es sich bei der Prüfung mit dem verfüllten kleingelochten Ziegel mit einem maximalen vertikalen Tragwiderstand von 1350,1 kN um einen Ausreißer handelt oder ob durch die Dämmstofffüllung und der deckelnden Verklebung der Ziegel höhere Festigkeiten erzielt werden können. Demnach wäre der Versuch mit dem kleingelochten Ziegel ohne Dämmstofffüllung mit einer gedeckelten Lagerfuge (989,8 kN) ebenso ein Ausreißer. Zusammenfassend zeigt Tab. 4.6 die verschiedenen Arten der Ermittlung sowie die zugehörigen Ergebnisse der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k.

Tab. 4.6: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k

Ziegel	Wanddicke [mm]	Prüfkörper	f_k [N/mm²]
MZ70	240	10x Prüfungen an Einzelsteinen*	2,3
MZ70	240	10x Prüfungen an Einzelsteinen	2,2
MZ70	240	-	2,2**
MZ70	490	10x Prüfungen an Einzelsteinen*	2,1
MZ70	490	10x Prüfungen an Einzelsteinen	2,2
MZ70	490	-	2,2**
MZ70	365	10x Prüfungen an Einzelsteinen*	2,7
MZ70	365	10x Prüfungen an Einzelsteinen	2,7
MZ70	365	1x Prüfung an Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m)	3,3
MZ70	365	-	2,2**
W07 UV	365	10x Prüfungen an Einzelsteinen	2,4
W07 UV	365	6x Prüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m)	2,4
W07 UV	365	-	2,2**
W07 V	365	10x Prüfungen an Einzelsteinen	2,5
W07 V	365	1x Prüfung an Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m)	3,1
W07 V	365	-	2,2**
* Dämmstofffüllung wurde entfernt; ** gemäß Produktdatenblatt			

Tab. 4.6 ist zu entnehmen, dass es auffällig starke Abweichungen zwischen den Ergebnissen der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k ermittelt aus den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) und den Einzelsteinen gibt. Eine Begründung für die Abweichungen könnte sein, dass nicht immer mindestens drei Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) für jeden Ziegel geprüft wurden, wie es gemäß DIN EN 1052-1 [80] vorgeschrieben ist. Bei nur einem Prüfergebnis kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob es sich bei dem Ergebnis um einen Ausreißer handelt oder nicht. Wurde die Druckfestigkeit an mehr als nur einem Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) ermittelt, wie für den kleingelochten unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO, kann mit dem Mittelwert eine gute Übereinstimmung in Bezug auf die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k zu der Ermittlung aus den Einzelsteinprüfungen festgestellt werden. Dass teilweise die ermittelten Druckfestigkeiten höher sind als im Datenblatt angegeben, ist nicht untypisch, da die Hersteller diesen in der Regel als untersten Grenzwert auf der sicheren Seite liegend definieren. Im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift werden die aus den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) ermittelten charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k aufgrund stark abweichender Ergebnisse zu den Einzelsteinprüfungen, welche alle Anforderungen gemäß DIN EN 772-1 [68] einhalten, nicht weiter berücksichtigt.

Zusammenfassend kann anhand Tab. 4.3 und Tab. 4.4 festgehalten werden, dass mittels der Ergebnisse für die Druckfestigkeiten der Einzelsteine kein Einfluss aus der Dämmstofffüllung in Bezug auf die Druckfestigkeit des Ziegels resultiert. Des Weiteren sprechen die zuvor berechneten Varianzen dafür, dass die Daten der Einzelsteinprüfungen der verfüllten und unverfüllten Ziegel zusammen ausgewertet werden können. Eine Klassifikation der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k erfolgte gemäß den Zulassungen der jeweiligen Ziegel mit dem Mittelwert und dem kleinsten geprüften Einzelwert für die Druckfestigkeit. Für weitere Berechnungen im Rahmen der Dissertationsschrift werden die tatsächlich ermittelten Ziegelabmessungen sowie die maßgebenden charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k der Tab. 4.7 verwendet. Die Ziegelbreite entspricht der Wanddicke ohne Putz.

Tab. 4.7: Maßgebenden Ziegelabmessungen und charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k

Ziegel	Ziegelbreite x Ziegellänge x Ziegelhöhe [mm]	f_k [N/mm^2]
W07 V+UV	175 (zersägter 362 mm Ziegel) x 244 x 249	2,4
W07 V+UV	362 x 244 x 249	2,4
MZ70	190 (zersägter 364 mm Ziegel) x 252 x 250	2,7
MZ70	239 x 250 x 251	2,2
MZ70	364 x 252 x 250	2,7
MZ70	497 x 253 x 249	2,1

4.1.4 Technische Daten des Dünnbettmörtels maxit mur 900 D

Bei dem verwendeten Mörtel handelt es sich um einen Dünnbettmörtel zur Herstellung von gedeckeltem Planziegelmauerwerk. Weitere Informationen können den Daten der Tab. 4.8 entnommen werden, welche aus dem Produktdatenblatt des Herstellers stammen.

Tab. 4.8: Produktdaten vom Dünnbettmörtel maxit mur 900 D [81]

Druckfestigkeit nach 28 Tagen	> 10,0 N/mm^2
Biegezugfestigkeit	> 3,0 N/mm^2
Trockenrohdichte	< 1,0 kg/dm^3
Körnung	0-1 mm
Wärmeleitfähigkeit	λ_{10tro} = 0,21 W/(m·K)

Anhand von Mörtelprismen (B x H x L = 160 mm x 40 mm x 40 mm) wurde die Biegefestigkeit sowie die Druckfestigkeit überprüft. Der Anlage C sind die jeweiligen Ergebnisse zu entnehmen. Nicht alle Ergebnisse für die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit der Mörtelproben erfüllen die Herstellerangaben. Einige Mörtelprismen waren deformiert. Werden diese nicht mit ausgewertet, wird die Herstellerangabe für die Druckfestigkeit immer erreicht. In Bezug auf die Herstellerangabe für die Biegezugfestigkeit konnte diese in zehn von insgesamt 18 Fällen nicht einhalten werden, wobei diese bei einer Berechnung des Mittelwertes (3,05 N/mm^2) eingehalten wird. Die Ursache dafür konnte nicht ermittelt werden. Ebenso ist Anlage C zu entnehmen, dass die Mörtelproben nicht immer 28 Tage nach der Herstellung geprüft wurden, sondern überwiegend am Tag der Feuerwiderstandsprüfung der zugehörigen Wand. Aufgrund der teilweise geringeren Ergebnisse für die Biegezugfestigkeit als im Produktdatenblatt angegeben, kann davon ausgegangen werden, dass die aus den Feuerwiderstandsprüfungen an den Mauerwerkswänden erzielten Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen.

4.1.5 Technische Daten vom Außen- und Innenputz

Gipsputze sind in Bezug auf das Materialverhalten im Brandfall vorteilhafter als Kalk- bzw. Kalkzementputze. Dies liegt unter anderem daran, dass der Gipsputz bei starker Erhitzung das im Gips gebundene Kristallwasser freisetzt. Allgemein sind Gipsputze sowie Kalk- und Kalkzementputze in die Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) nach DIN 4102 [21] eingeordnet. Aufgrund der vorteilhafteren Eigenschaften in Bezug auf das Materialverhalten im Brandfall von Gipsputzen zu Kalk- bzw. Kalkzementputzen ist somit eine Übertragbarkeit gegeben. Eine dickere Putzschicht ist ebenfalls im Brandfall als vorteilhafter anzusehen. Auf Basis dieser Überlegungen wurde für die Feuerwiderstandsprüfungen im Rahmen der Dissertation ein geeigneter Außen- und Innenputz mit einer geringen Schichtdicke von maximal 15 mm gewählt.

Alle Mauerwerkswände für die Feuerwiderstandsprüfungen wurden mit Putz von der Firma Baumit GmbH versehen. Für die Außen- und Innenseite wurden verschiedene Putze verwendet, welche sich aus den Anforderungen für Wohngebäude ergaben. Der Tab. 4.9 und Tab. 4.10 können die Produkteigenschaften sowie die aufgebrachte Putz-

dicke entnommen werden. Die Putzoberflächen wurden jeweils ohne separaten Oberputz hergestellt und lediglich mit abgezogener, geschlossener Oberfläche ausgeführt. Bei Feuerwiderstandsprüfungen wurde immer die Wandseite einer Brandbeanspruchung ausgesetzt, welche mit dem Innenputz versehen wurde.

4.1.5.1 Außenputz (brandabgewandte Wandseite)

Es folgen in Tab. 4.9 die relevantesten Informationen und Produktdaten des verwendeten Außenputzes.

Tab. 4.9: Produktdaten vom Außenputz Baumit MineralporLeichtputz MP 69 Speed [82]

Putztyp	Kalkzementleichtputz Typ 2
Mörtelgruppe	Leichtputzmörtel LW nach DIN EN 998-1; P II nach DIN 18550
Festigkeit	CS II nach DIN 998-1
Körnung	0-1,2 mm
Druckfestigkeit	1,5-5,0 N/mm^2
Haftzugfestigkeit	≥ 0,08 N/mm^2
Wärmeleitzahl $\lambda_{10,\,dry,\,mat}$	≤ 0,25 W/(m·K) (für P = 50 %)
Aufgebrachte Putzdicke	10-15 mm

Zum Verputzen wurden an die Abschlüsse der Wände Anschlagbretter zur Einstellung der Putzschichtstärke angebracht. Insgesamt wurden die Wände 3- bis 4-mal vorgenässt. Auf der brandzugewandten Wandseite wurde bündig gemauert. Daher konnten auf der brandabgewandten Wandseite Versätze festgestellt werden. Aufgrund der Versätze wurde der Putz mit einer gesamten Schichtstärke von 10 mm bis 15 mm aufgetragen. Die Ausführung erfolgte nass in nass. Die Oberfläche wurde mit einer Abziehlatte abgezogen. Nach dem Abbinden wurden die Oberflächen noch 3- bis 4-mal mit Wasser besprüht und die Löcher in den Wandseiten, welche aus dem Anbringen der Anschlagbretter resultierten, mit dem Baumit Kalkputz Klima KP 36 W verschlossen.

Der Anlage C sind die Ergebnisse für die Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit zu entnehmen, welche anhand von Putzprismen (B x H x L = 160 mm x 40 mm x 40 mm) ermittelt wurden. Die Ergebnisse für die Druckfestigkeit liegen innerhalb des Toleranzbereiches (1,5 N/mm^2 bis 5,0 N/mm^2) bzw. weisen höhere Druckfestigkeiten auf. Eine Überschreitung der Druckfestigkeit wird nicht als kritisch angesehen, da der Putz bei einer Feuerwiderstandsprüfung nicht belastet wird.

4.1.5.2 Innenputz (brandzugewandte Wandseite)

Der nachfolgenden Tab. 4.10 sind die für den Innenputz relevantesten Daten zu entnehmen.

Tab. 4.10: Produktdaten vom Innenputz Baumit Kalkputz Klima KP 36 W [83]

Putztyp	Kalkputz
Mörtelgruppe	Normalputzmörtel GP nach DIN EN 998-1; P II nach DIN 18550
Festigkeit	CS II nach DIN 998-1
Körnung	0-1,0 mm
Druckfestigkeit	1,5-5,0 N/mm^2
Haftzugfestigkeit	≥ 0,08 N/mm^2
Wärmeleitzahl $\lambda_{10,\,dry,\,mat}$	≤ 0,82 W/(m·K) (für P = 50 %)
Aufgebrachte Putzdicke	15 mm

Die Ausführung des 15 mm dick aufgetragenen Innenputzes erfolgte äquivalent wie beim Außenputz. Nach dem Trocknen des Putzes waren bei diesem vereinzelt kleine netzartige Risse erkennbar. Besonders bei dem verwendeten Innenputz in Kombination mit dem Großkammerziegel. Bei diesem Putz handelt es sich um einen 2-lagigen Kalkputz, der auch mit einem dispersionshaltigen Grundiermittel sowie mit einer gefilzten Lage von 3 mm Schichtstärke überzogen ausgeführt werden kann. Durch diese zweite Lage werden solche Risse dauerhaft überarbeitet. Um eine möglichst große Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten, wurde bei der Ausführung auf das Grundiermittel und die gefilzte Lage verzichtet.

Der Anlage C sind die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit zu entnehmen, welche anhand von Putzprismen (B x H x L = 160 mm x 40 mm x 40 mm) ermittelt wurden. Die Ergebnisse für die Druckfestigkeit liegen innerhalb des Toleranzbereiches (1,5 N/mm^2 bis 5,0 N/mm^2).

4.1.5.3 Überprüfung der Putzhaftzugfestigkeit

Zur Kontrolle der Haftzugfestigkeit von beiden verwendeten Putzen wurden einzelne Hochlochziegel verputzt und gemäß den Prüfverfahren aus DIN EN 1015-12 [84] geprüft. Wie Tab. C.30 und Tab. C.31 in Anlage C zeigen, wurde jeweils bei jedem Einzelwert beider Putze die vom Hersteller angegebene Haftzugfestigkeit von 0,08 N/mm^2 überschritten. Dies spricht für eine ordnungsgemäße Verarbeitung des Putzes. Im Mittel beträgt die Haftzugfestigkeit für den Kalkputz Klima KP 36 W 0,34 N/mm^2 und für den Kalk-Zement-Leichtputz MP 69 Speed 0,19 N/mm^2. Die Ergebnisse wurden nach 46 Tage bzw. 69 Tagen nach Probenherstellung erzielt. Es wird davon ausgegangen, dass die Herstellerangabe von 0,08 N/mm^2 auch bereits nach 28 Tagen überschritten ist.

Wie in Kapitel 3.3 festgestellt, kommt es bei Feuerwiderstandsprüfungen nur zu Abplatzungen von Putz auf der brandzugewandten Wandseite. In Bezug auf die hohe

Haftzugfestigkeit der Putze, explizit auf der brandzugewandten Wandseite, ist anzumerken, dass es sich bei der Herstellerangabe von 0,08 N/mm² um eine Mindesthaftzugfestigkeit handelt. Bei den aufgeführten Prüfberichten der Tab. 3.1 wurde bei 21 von 33 Prüfungen auf der brandzugewandten Wandseite der Kalk-Gips-Maschinenputz maxit ip 23 F verwendet. Bei diesem soll mindestens eine Haftzugfestigkeit von 0,1 N/mm² eingehalten werden [85]. Mindesthaftzugfestigkeiten < 0,08 N/mm² konnten bei den in den Prüfberichten verwendeten Putzen auf der brandzugewandten Wandseite nicht festgestellt werden. Allgemein wurde bei keinem Prüfbericht der in Tab. 3.1 aufgeführten Feuerwiderstandsprüfungen die Haftzugfestigkeit der Putze untersucht. Dass Aufgrund der großen Abweichung der geprüften Haftzugfestigkeit auf der brandzugewandten Wandseite (im Mittel 0,34 N/mm²) zu der Mindestherstellerangabe (≥ 0,08 N/mm²) wesentlich längere Feuerwiderstandsdauern resultieren, kann demnach nicht bestätigt werden.

4.1.6 Prüfkörperherstellung

Die Prüfköper in Form von 3,0 m hohen Mauerwerkswänden unterschiedlichster Längen und Dicken wurden von ausgebildeten Maurern einer externen Baufirma (Weber Bauunternehmen GmbH) hergestellt. Die halb so hohen Mauerwerkswände wurden von einem technischen Mitarbeiter gemauert. Bei der Herstellung der Wände wurden die Stoßfugen nicht vermörtelt und ein Überbindemaß von $0{,}4 \cdot h$ wurde eingehalten. Aufgrund der Imperfektionen der Ziegel wurde die spätere Innenseite, welche dem Brand ausgesetzt ist, ebenmäßig ausgebildet, sodass dort auch flächenmäßig die einheitliche Schichtdicke vom Putz sichergestellt werden konnte.

Nach der Herstellung der Wände wurden diese noch verputzt (siehe Kapitel 4.1.5). Das Verputzen hat ein Mitarbeiter von der Baumit GmbH durchgeführt. Insgesamt lagerten die Wände nach der Herstellung und dem Verputzen mindestens 28 Tage gemäß DIN EN 1363-1 [11], bevor diese einer Feuerwiderstandsprüfung unterzogen wurden. Wie in Kapitel 3.1 dokumentiert, ist die Lagerungsdauer einer Mauerwerkswand nach einer Abbindungsdauer von mindestens 28 Tagen nicht weiter relevant und wird demnach im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift nicht weiter berücksichtigt.

4.2 Mechanische Untersuchungen im Normaltemperaturbereich

Das Verformungsverhaltens einer Mauerwerkswand im Brandfall bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung wurde in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben. Aufgrund der sich einstellenden horizontalen Verformungen kann es zu einem Aufklaffen der Lagerfugen sowie einer Teilflächenbelastung kommen. Das Materialverhalten soll mithilfe von teilflächenbelasteten Versuchen sowie Versuchen zur Biegehaftzugfestigkeit im nachfolgenden Verlauf genauer untersucht werden.

4.2.1 Teilflächenbelastungen

Die Versuche zur Teilflächenbelastung wurden in Anlehnung an DIN EN 772-1 [68] durchgeführt, welche zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit bei einer vollflächigen Belastung dient. Die an DIN EN 772-1 [68] angelehnten Versuche mit einer Teilflächenbelastung dienen zum Abbilden der erhöhten Spannungen im Randbereich des

Ziegels, welche sich aufgrund der Verformungen während eines Brandereignisses einstellen können. Bei diesen Versuchen werden demnach lokale Druckbeanspruchungen in einen Randbereich eines Hochlochziegels eingeleitet. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, da die Prüfeinrichtung nicht für den Brandfall konzipiert ist. Es ist davon auszugehen, dass der Grad der Schädigung im Brandfall zunimmt, da sich dort infolge zusätzlicher thermischer Spannungen meist Risse bilden und es zu Schädigungen der äußeren Ziegelstruktur kommen kann. Abb. 4.6 zeigt den Versuchsaufbau, bei welchem nur eine Teilfläche des Ziegels belastet wird.

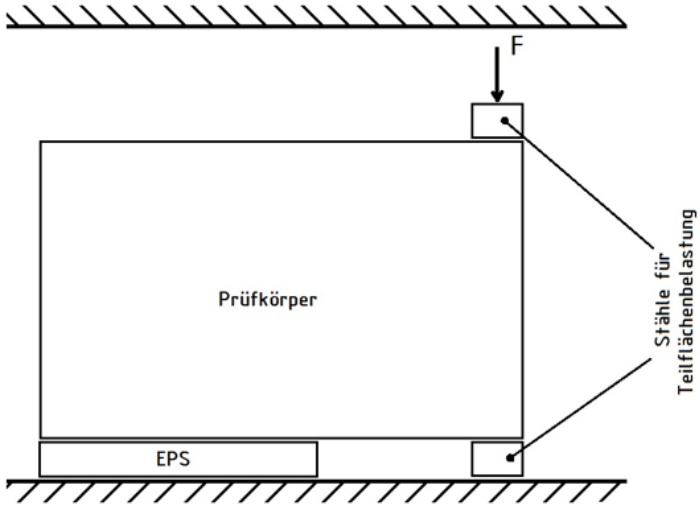


Abb. 4.6: Versuchsaufbau für Teilflächenbelastungen

Insgesamt wurden jeweils fünf Prüfungen mit unterschiedlichen Teilflächenbelastungen über die gesamte Ziegellänge (25 mm ≙ 7 %von Gesamtfläche, 50 mm ≙ 14 %von Gesamtfläche, 75 mm ≙ 21 % von Gesamtfläche) bei den ausgewählten Ziegeln durchgeführt [1]. Tab. 4.11 enthält die Versuchsergebnisse für den geprüften Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 (Prüfgeschwindigkeit 0,15 N/mm^2/s) sowie den kleingelochten verfüllten und unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO (Prüfgeschwindigkeit 0,05 N/mm^2/s) in einer Breite von 365 mm. Dass die kleingelochten Ziegel mit einer geringeren Prüfgeschwindigkeit getestet wurden, ist der zu erwartenden Druckfestigkeit geschuldet, für welche in der Prüfnorm verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten definiert sind [68]. Die Brucherkennung aller Versuche lag bei einer Abweichung von 0,5 %. Die Dicke der Längsstege beträgt beim Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 14,9 mm, bei einer Breite der verfüllten Kammer von ca. 43,5 mm. Beim kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO beträgt die Dicke des Außensteges 12,0 mm, während die Dicke der innenliegenden Längsstege 5,2 mm beträgt. Die Kammern zwischen den Stegen weisen eine Breite von ca. 17,9 mm auf.

Tab. 4.11: Ergebnisse der Teilflächenbelastungen

Nummer und Ziegel	Prüfgeschwindigkeit [N/mm²/s]	Bruchspannung bei 25 mm ≙ 7 % Teilflächenbelastung [N/mm²]		Bruchspannung bei 50 mm ≙ 14 % Teilflächenbelastung [N/mm²]		Bruchspannung bei 75 mm ≙ 21 % Teilflächenbelastung [N/mm²]	
1. MZ70	0,15	5,36*	Mittelwert: 10,22	8,32	Mittelwert: 8,96	14,88	Mittelwert: 13,18
2. MZ70		5,92*		9,81		12,79	
3. MZ70		14,88		8,36		12,61	
4. MZ70		12,82		9,02		13,88	
5. MZ70		12,12		9,30		11,76	
1. W07 V	0,05	10,53	Mittelwert: 11,43	9,16	Mittelwert: 8,92	9,57	Mittelwert: 9,48
2. W07 V		12,02		7,53		8,28	
3. W07 V		12,45		9,04		9,46	
4. W07 V		11,61		9,80		10,18	
5. W07 V		10,55		9,05		9,91	
1. W07 UV	0,05	9,51	Mittelwert: 10,11	11,72	Mittelwert: 9,51	8,56	Mittelwert: 8,63
2. W07 UV		9,58		12,56		7,99	
3. W07 UV		10,31		7,63		8,92	
4. W07 UV		10,05		7,58		8,39	
5. W07 UV		11,09		8,06		9,28	

* Die Ziegel waren sehr wahrscheinlich vorgeschädigt. Dies war jedoch nicht direkt sichtbar. Aus diesem Grund erfolgt kein Ausschluss der Ergebnisse.

Die Ergebnisse für die Großkammerziegel und die kleingelochten Ziegel zeigen keine großen Unterschiede bei einer Teilflächenbelastung von 25 mm auf. Die ersten beiden Versuchsergebnisse für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 weisen im Vergleich zu den restlichen Ergebnissen eine um mehr als die Hälfte reduzierte Bruchspannung auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ziegel bereits vorgeschädigt waren, dies aber vor der Prüfung von außen nicht ersichtlich war. Die beiden Ergebnisse können nicht als Ausreißer bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ definiert werden. Ein Mittelwert für die Spannung von ca. 12,5 N/mm² wäre realistisch, wenn die ersten beiden Ergebnisse ähnlich wie die restlichen wären. Bei einer Teilflächenbelastung von 25 mm ergibt sich daraus, dass der Großkammerziegel mit seinem dicken Außensteg resistenter wäre als die kleingelochten Ziegel mit den über die Teilfläche verteilten vielen dünnen Stegen.

Bei einer 50 mm Teilflächenbelastung ist der Einfluss des dicken Außenstegs des Großkammerziegels in Relation äquivalent in Bezug auf die Bruchspannung wie ein Längsaußensteg und ein halb so dicker Längsinnensteg sowie ein querverlaufender Innensteg der kleingelochten Ziegel. Ein signifikanter Unterschied zwischen dem kleingelochten verfüllten und unverfüllten Ziegel kann nicht festgestellt werden.

Während bei dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 bei einer Teilflächenbelastung von 25 mm und 50 mm nur der äußere Längssteg belastet wird, wird bei einer Teilflächenbelastung von 75 mm auch der nachfolgend angeordnete gleich dicke Längssteg im Abstand von 73,3 mm belastet. Aus diesem Grund sind die ermittelten Bruchlasten bei dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 bei 75 mm im Verhältnis zu den kleingelochten Ziegeln UNIPOR W07 CORISO deutlich höher, bei welchem unabhängig von der Teilflächenbelastung immer mehrere Längsstege aufgrund der kleineren Lochung belastet werden.

Je nachdem wie groß die teilflächige Belastung im Brandfall aufgrund der horizontalen Verformung der Wand ist, können die dicken Außenstege von Großkammerziegeln sich positiv auf die Feuerwiderstandsdauer auswirken. Diese bereits in Kapitel 3.4.1 aufgestellte Theorie auf Grundlage der untersuchten Prüfberichte kann anhand der Bruchspannungen bei verschiedenen Teilflächenbelastungen für die unterschiedlichen Ziegel bestätigt werden. Es gilt zu beachten, dass die horizontale Verformung einer Mauerwerkswand im Brandfall gemäß Kapitel 3.2 abhängig von deren Lagerung und der Wandschlankheit λ sowie der Größe der einwirkenden Normalkraft ist. Demnach müsste sich der Einfluss der Stegdicke bei größerer horizontaler Wandverformung bemerkbar machen. Es gilt zu beachten, dass Ziegel mit dicken Außenlängsstegen oftmals in Summe weniger Längsstege über den Querschnitt angeordnet aufweisen, welches sich negativ bei Abplatzungen auswirkt.

4.2.2 Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit

Die Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit erfolgt gemäß DIN EN 1052-5 [86]. Zur Ermittlung der Biegehaftzugfestigkeit wird ein einzelner Ziegel durch das Aufbringen eines Biegemoments aus einem Mauerwerkskörper herausgebrochen und die Biegehaftzugfestigkeit berechnet sowie das Schadensbild beurteilt. Mit diesen Versuchen soll untersucht werden, welche Kraft für ein Aufklaffen der Lagerfugen benötigt wird. Dieses Schadensbild kann sich im Brandfall aufgrund der sich einstellenden horizontalen Verformungen ergeben bzw. ein Versagen der Mauerwerkswand hervorrufen. Bei einer Brandbeanspruchung ist von geringeren Biegehaftzugfestigkeiten auszugehen, da bei Temperaturbeanspruchungen ab 100 °C eine Kombination physikalischer und chemischer Veränderungen im Zementleim, im Sand und an der Grenzfläche zwischen beiden stattfinden [87]. Die Abminderung der Biegehaftzugfestigkeit ist abhängig von der Dauer der Feuerwiderstandsprüfung und der daraus resultierenden höheren Temperatur im Ziegelquerschnitt bzw. der Lagerfuge.

Untersuchungen der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. konnten bereits zeigen, dass die Biegehaftzugfestigkeit eines Mauerwerkskörpers aus Hochlochziegeln (insbesondere bei Planziegelmauerwerk) und Dünnbettmörtel senkrecht zur Lagerfuge vorhanden ist [88]. Versuche zur Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit sollen zeigen, wie sich die Biegehaftzugfestigkeit bei Dünnbettmörtel in Kombination mit den meist dünnen Stegen von filigranen wärmedämmenden Hochlochziegeln verhält. Inwiefern dieses Kriterium für den Brandfall und die Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmende Hochlochziegel einen Einfluss besitzt, soll untersucht werden. In Abb. 4.7 ist der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit dargestellt.

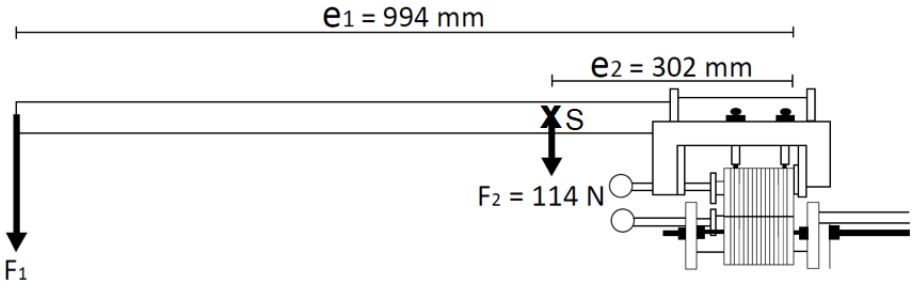


Abb. 4.7: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit

Es wurden abweichend von der DIN EN 1052-5 [86] für den kleingelochten Ziegeltyp jeweils 14x Zweisteinkörper und für den Großkammerziegel jeweils 12x Zweisteinkörper anstelle von in der Höhe mehrlagigen Probekörpern geprüft [1]. Ein Einfluss auf die Biegehaftzugfestigkeit resultiert aufgrund von Erfahrungswerten nicht [1]. Die Trocknungszeit für den Dünnbettmörtel betrug zwischen 32 und 47 Tagen. Die Biegehaftzugprüfungen wurden mit dem in Abb. 4.7 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Bei dieser hat die Klemmvorrichtung mit Hebelarm (Länge 994 mm) inklusive Klemme, bei einem Abstand vom Massemittelpunkt S (Hebel und Klemme) bis zur Zugrandseite von 302 mm, eine Masse von 114 N. Im Mittel konnten nachfolgende Biegehaftzugfestigkeiten in Abhängigkeit des Widerstandsmoments des Grundrisses der Bruchfläche ermittelt werden.

W07 UV: Biegehaftzugfestigkeit F_1 = 0,198 N/mm^2 (Anzahl der Ziegelbrüche: 3)

W07 V: Biegehaftzugfestigkeit F_1 = 0,222 N/mm^2 (Anzahl der Ziegelbrüche: 4)

MZ70: Biegehaftzugfestigkeit F_1 = 0,150 N/mm^2 (Anzahl der Ziegelbrüche: 3)

Die mittleren Biegehaftzugfestigkeiten zeigen, dass der Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 mit insgesamt weniger Längsstegen, aber ungefähr gleichem Gesamtlochquerschnitt eine geringere Biegehaftzugfestigkeit aufweist als der kleingelochte Ziegel UNIPOR W07 CORISO. In Bezug auf die Dämmstofffüllung weist ein verfüllter Ziegel eine geringfügig höhere Biegehaftzugfestigkeit auf als ein unverfüllter Ziegel. Dies könnte daran liegen, dass der Dünnbettmörtel, welcher als eine Art Kleber fungiert, gedeckelt ausgeführt wird und somit auch eine Klebeverbindung bei einer Dämmstofffüllung aufweist.

Bezogen auf den Brandfall müsste sich demnach zuerst bei dem Großkammerziegel ein Aufklaffen der Lagerfugen einstellen, bevor dies bei dem kleingelochten Ziegel erfolgt. Den Ergebnissen nach müsste der kleingelochte verfüllte Ziegel den größten Widerstand gegen ein Aufklaffen der Lagerfugen im Brandfall aufgrund von sich einstellenden horizontalen Verformungen aufweisen.

4.3 Untersuchung thermischer Materialeigenschaften

4.3.1 Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Bei einer einseitigen Brandbeanspruchung liegen in Abhängigkeit der Wanddicke und der Wärmeleitfähigkeit der Ziegel große lokale Temperaturunterschiede über den Ziegelquerschnitt vor. Daraus resultiert eine unterschiedlich starke Ausdehnung des Ziegelmaterials. Je nachdem wie stark die temperaturbedingte Ausdehnung erfolgt, ergeben sich daraus Spannungen in den Ziegeln. Bei Wänden mit einer geringen Wanddicke (z. B. ≤ 175 mm), bei welchen eine schnellere Durchwärmung des Querschnitts erfolgt, hat ein gleicher Wärmeausdehnungskoeffizient α einen größeren Einfluss auf die horizontale Verformung bei einer Feuerwiderstandsprüfung als bei einer dickeren Wand. Bei der Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten α handelt es sich um eine thermoanalytische Messung zur Bestimmung von Dimensionsänderungen, welche ohne extern einwirkende Kräfte bzw. Einspannung untersucht wird. Allgemein handelt es sich hierbei um eine stoffspezifische Materialkonstante. Die resultierenden Längenänderungen des Ziegelmaterials bei steigender Temperatur werden untersucht.

Der technische Ausdehnungskoeffizient ($\alpha_{tech.}$) bezieht die Längenänderung auf Normalbedingungen [89]. Der physikalische Wärmeausdehnungskoeffizient ($\alpha_{phys.}$) beschreibt die Längenänderung eines Materials in einem infinitesimalen kleinen Temperaturbereich. Im Bauwesen ist der technische Wärmeausdehnungskoeffizient relevant, da dieser die Längenänderung für einen Temperaturbereich beschreibt [90].

Quarz ist ein wesentlicher Bestandteil von keramischen Materialien, worunter auch Ziegel fallen. In der Regel tritt bei diesem Werkstoff eine Volumenvergrößerung bei 450 °C bis 650 °C auf. Als Quarzsprung, welcher bei ~573 °C stattfindet, wird der Moment bezeichnet, bei welchem innerhalb kürzester Zeit eine Zunahme des Volumens erfolgt [91]. Abb. 4.8 zeigt die Messergebnisse für die Wärmeausdehnung des Großkammerziegels ThermoPlan MZ70.

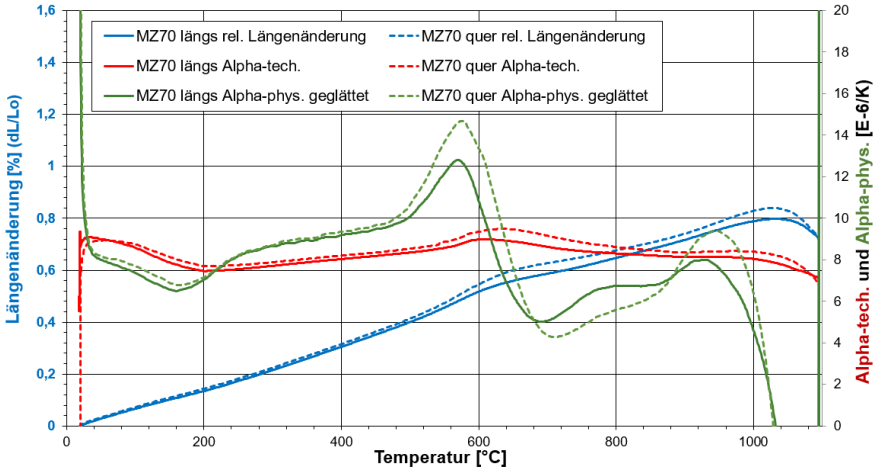


Abb. 4.8: Messergebnisse der Wärmeausdehnung in Längs- und Querrichtung des Großkammerziegels ThermoPlan MZ70 [1]

Abb. 4.8 zeigt, dass die Längenänderung in Längs- und Querrichtung nahezu identisch ist, bis es zum Quarzsprung bei ~573 °C kommt. Gemäß den Messdaten fällt die Wärmeausdehnung des Ziegelmaterials zwischen 500 °C und 600 °C am größten aus. Ab ~573 °C nehmen die Abweichungen für die Längs- und Querrichtung für die relative Längenänderung sowie den technischen und physikalischen Ausdehnungskoeffizienten zu. Aufgrund von natürlichen Schwankungen des Rohmaterials können temperaturbedinge Umwandlungen in den Tonmineralien unterschiedlich ausfallen. Abb. 4.9 zeigt die Messergebnisse für die Wärmeausdehnung des kleingelochten Ziegels UNIPOR W07 CORISO.

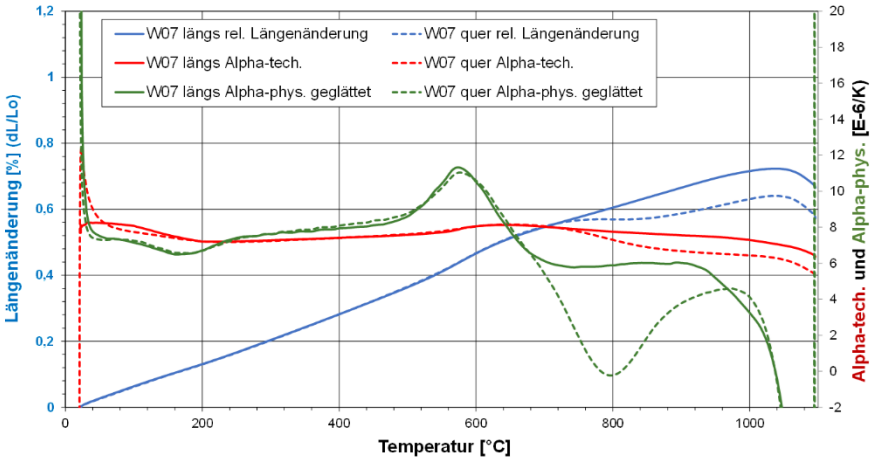


Abb. 4.9: Messergebnisse der Wärmeausdehnung in Längs- und Querrichtung des kleingelochten Ziegels UNIPOR W07 CORISO [1]

Abb. 4.9 zeigt ähnliche Messergebnisse wie Abb. 4.8. Einzig die Abweichung in Querrichtung für den physikalischen Ausdehnungskoeffizienten ($\alpha_{phys.}$) fallen größer aus. Bei einem Vergleich der Messdaten ist zu erkennen, dass der Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 mehr zum Ausdehnen neigt als der kleingelochte Ziegel UNIPOR W07 CORISO. Allgemein sorgen Wärmeausdehnungen für zusätzliche Spannungen in dem Ziegelmaterial. Demnach ist der Großkammerziegel anfälliger für eine Rissbildung infolge einer Temperaturbeanspruchung [91]. Die Versuchsergebnisse zeigen keine weiteren Auffälligkeiten in Bezug auf die temperaturabhängige Ausdehnung.

4.3.2 Bestimmung der Resttragfähigkeit nach definierter Brandbeanspruchung

In Kapitel 4.1.3 wurden die maximalen vertikalen Tragwiderstände ($N_{Rm,Versuch}$) anhand von Kleinprüfkörpern mit den Abmessungen von 1,0 m in der Länge und 1,50 m in der Höhe bei einer Wanddicke von 0,365 m bestimmt. Bei diesen Versuchen wurde die zentrisch eingeleitete Normalkraft mit 300 kN/min kontinuierlich gesteigert, bis es zu einem signifikanten Lastabfall kam. Die Versuchsergebnisse bei Raumtemperatur dienen als Referenz für die nachfolgenden Untersuchungen an gleichen Mauerwerksprüfkörpern im Hochtemperaturbereich. Durch die Bestimmung der Resttragfähigkeit soll

untersucht werden, wie groß der Einfluss unterschiedlich langer Brandbeanspruchungen auf die Tragfähigkeit einer Mauerwerkswand, hergestellt aus wärmedämmenden Hochlochziegeln, ist. Die Erkenntnisse für die Relation der Dauer der Brandbeanspruchung zur Tragfähigkeit sollen bei der Festlegung der Prüflast für die Feuerwiderstandsprüfungen in Kapitel 4.4 beitragen.

Zur Bestimmung der Resttragfähigkeit nach einer definierten Brandbeanspruchung wurden Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) für mindestens 15 Minuten mit einer Grundlast von ca. 100 kN beansprucht (ausgenommen die Versuche W07 UV, welche gedeckelt 60 und 120 Minuten mit der ETK beflammt wurden, da dort die Grundlast ca. 120 kN betrug). Im Anschluss daran wurden die 1,5 m hohen Probekörper einer einseitigen Temperaturbeanspruchung gemäß ETK ausgesetzt, während die Grundlast aufrechterhalten blieb. Resultierend aus dem Prüfaufbau gemäß Abb. 4.11 beträgt die direkt beflammte Wandhöhe nur 1,25 m. Nach 60, 90 bzw. 120 Minuten einseitiger Brandbeanspruchung wurden die Probekörper mit einer ansteigenden, zentrisch eingeleiteten Normalkraft (300 kN/min) weiter auf Druck belastet, bis es zu einem Versagen kam. Abb. 4.10 verbildlicht den beschriebenen Versuchsablauf am Beispiel mit einer Brandbeanspruchung gemäß ETK von 60 Minuten.

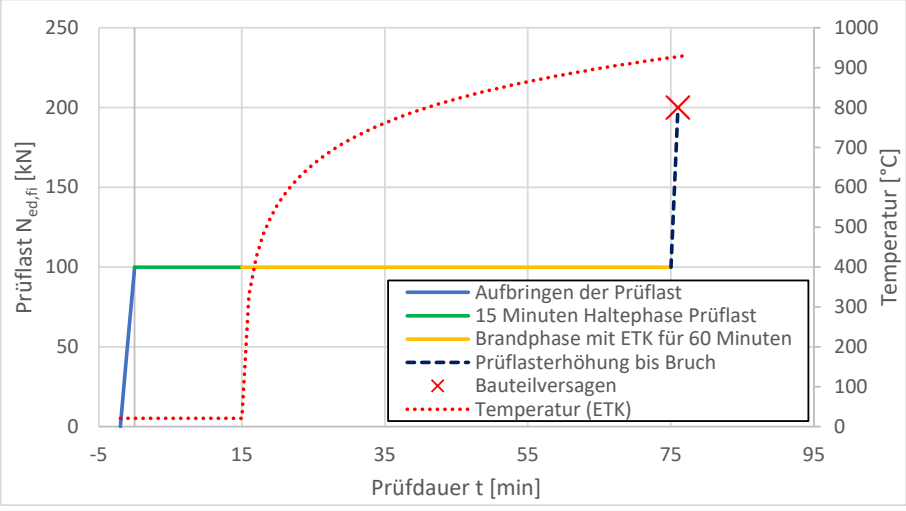


Abb. 4.10: Darstellung der Versuchsdurchführung mit 60 Minuten Brandbeanspruchung

Abb. 4.11 zeigt den verwendeten Prüfstand für die Versuche an den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m). Die Dicke der Lasteinleitungsplatte beträgt 40 mm. Die Begrenzung der maximal aufzubringenden Prüflast liegt bei 5000 kN.

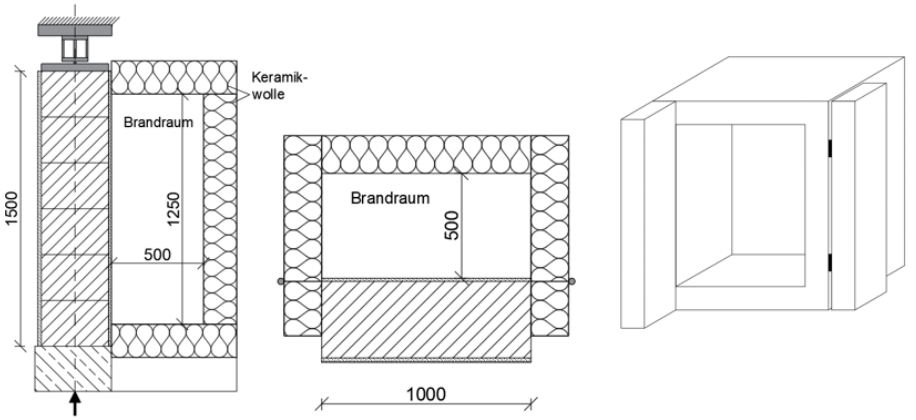


Abb. 4.11: Prüfstand für Feuerwiderstandsprüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m)

Tab. 4.12 können die Resttragfähigkeiten nach den definierten Brandeinwirkungen mittels der ETK für die jeweiligen Ziegeltypen entnommen werden. Ebenso ist das prozentuale Verhältnis der Resttragfähigkeit zu dem ermittelten vertikalen Tragwiderstand für den Kaltfall $N_{Rm,Versuch}$ gemäß Tab. 4.5 angegeben. Versuche, welche mit einem Sternchen gekennzeichnet sind, wurden im Tauchverfahren vermörtelt und nicht gedeckelt mit einem Mörtelschlitten, wie vom Hersteller gefordert, hergestellt.

Tab. 4.12: Resttragfähigkeit nach unterschiedlich langer Brandbeanspruchung

Temperatureinwirkung	Resttragfähigkeit MZ70 [kN] (≙ x % von $N_{Rm,Versuch}$)	Resttragfähigkeit W07 V [kN] (≙ x % von $N_{Rm,Versuch}$)	Resttragfähigkeit W07 UV [kN] (≙ x % von $N_{Rm,Versuch}$)
60 Minuten Brandbeanspruchung gemäß ETK	771,9 (≙ 53 %)	681,8 (≙ 50 %)	628,6 (≙ 61 %) 452,4* (≙ 44 %)
90 Minuten Brandbeanspruchung gemäß ETK	1094,4 (≙ 75 %)	660,0 (≙ 49 %)	609,5 (≙ 59 %) 349,1* (≙ 34 %)
120 Minuten Brandbeanspruchung gemäß ETK	200,8 (≙ 14 %)	563,5 (≙ 42 %)	507,6 (≙ 49 %) 519,8* (≙ 50 %)
* Keine gedeckelten Lagerfugen			

Bei der Versuchsreihe mit dem Großkammerziegel MZ70 resultierte eine Resttragfähigkeit nach der 90-minütigen Brandbeanspruchung, die größer der nach 60 Minuten ist. Im Allgemeinen ist bei einer längeren Brandbeanspruchung von einer fortlaufenden Schädigung des Materials und einer geringeren Resttragfähigkeit auszugehen. Eine

gedeckelte Vermörtelung der Lagerfuge scheint einen positiven Einfluss auf die Resttragfähigkeit nach einer definierten Brandbeanspruchung zu besitzen, auf welches die Resttragfähigkeiten nach 60 und 90 Minuten Brandbeanspruchung für den Ziegel W07 UV hindeuten. Bei den Versuchen mit dem kleingelochten Ziegel W07 UV ohne gedeckelter Vermörtelung der Lagerfuge traten während der Brandbeanspruchung keine Abplatzungen auf und es konnte sich somit kein Kamineffekt einstellen, bei welchem heiße Rauchgase durch vertikal angeordnete Öffnungen (z. B. Ziegelkammern) strömen. Des Weiteren ist in Bezug auf die Versuchsreihe mit dem kleingelochten Ziegel W07 UV ohne gedeckelte Lagerfuge festzustellen, dass die Resttragfähigkeit nach 120 Minuten Brandbeanspruchung zu hoch ausfällt. Abb. 4.12 zeigt eine grafische Darstellung der Versuchsergebnisse der Tab. 4.12.

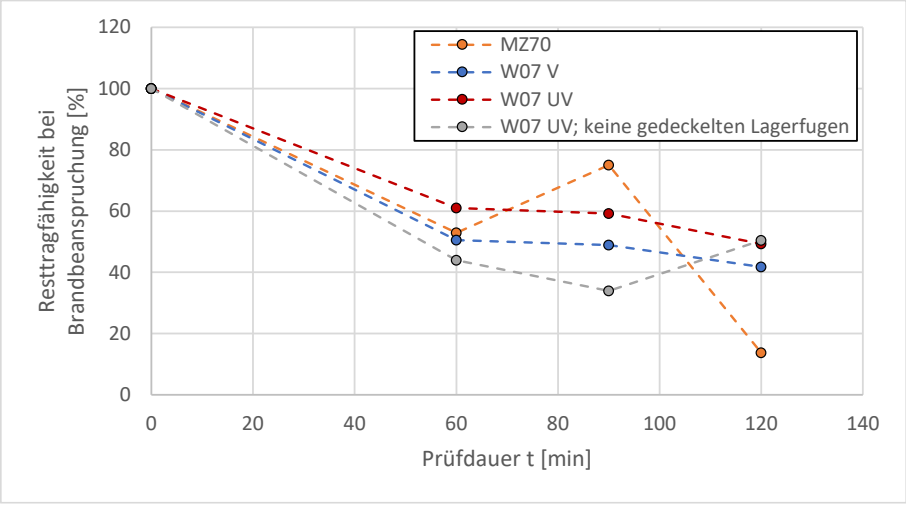


Abb. 4.12: Graphische Darstellung der Resttragfähigkeiten nach unterschiedlich langen Brandbeanspruchungen

Wie den Datenpunkten in Abb. 4.12 zu entnehmen ist, nimmt die Tragfähigkeit einer Mauerwerkswand in den ersten 60 Minuten im Vergleich zu den darauffolgenden 60 Minuten stärker ab. Des Weiteren ist anhand der durchgeführten Versuche in Kombination mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.1.3 erkennbar, dass die Versuchsergebnisse von Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einer Brandbeanspruchung im Vergleich zu Prüfungen bei Raumtemperatur einer Zunahme der Streuung bzw. der Unsicherheit einzelner Ausreißer unterliegen.

4.4 Feuerwiderstandsprüfungen

Mithilfe von Feuerwiderstandsprüfungen an 3,0 m hohen Mauerwerkswänden in verschiedenartigen Wanddicken sollen Angaben zur Feuerwiderstandsdauer für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk bei unterschiedlichen Ausnutzungsfaktoren α_{fi} definiert werden. Zudem wird anhand von 1,5 m hohen Mauerwerkswänden untersucht, inwiefern die Feuerwiderstandsprüfungen eine zuverlässige Bewertung des Feuerwiderstands ermöglichen.

Die Standarddicke für wärmedämmende Hochlochziegel ist 0,365 m. Aus diesem Grund wurde diese Ziegeldicke nachfolgend hauptsächlich untersucht. Insgesamt wurden 26 Feuerwiderstandsprüfungen mit einer Wanddicke von 0,365 m durchgeführt sowie weitere acht mit verschiedenen Wanddicken (viermal 0,175 m, zweimal 0,190 m sowie je einmal 0,240 m und 0,490 m). Die dabei verwendete Messtechnik kann Anlage D entnommen werden.

4.4.1 Versuchsserie A (H x L = 3,0 m x 1,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m)

Die nachfolgend aufgeführten Feuerwiderstandsprüfungen wurden in Anlehnung an die allgemeinen Anforderungen für Feuerwiderstandsprüfungen gemäß DIN EN 1363-1 [11] sowie DIN EN 1365-1 [5] für tragende Wände durchgeführt. Abweichend zu den Normen weisen die Wände nicht eine beflammte Höhe und Länge von 3,0 m auf, sondern wurden auf 1,0 m in der Länge reduziert. Prüfaufbaubedingt wurden von der 3,0 m hohen Wand die unteren 0,15 m nicht direkt beflammt. Aus der verringerten Prüfkörperlänge ergeben sich andere Temperatur- und Verformungsmessstellen. Bei den Feuerwiderstandsprüfungen wurden die Temperaturen und Verformungen auf der Wandoberfläche gemäß der Abb. 4.13 in Anlehnung an DIN EN 1365-1 [5] gemessen. Des Weiteren wurden die Temperaturen im Ziegelinneren gemäß Anlage A bestimmt.

Mit der Reduzierung der Prüfkörperlänge auf 1,0 m werden nicht nur Ziegel eingespart, sondern es kann auch ein schnellerer Ablauf der Versuchsserie infolge kürzerer Umbauzeiten erfolgen. Gemäß zurückgezogener Norm DIN 1053-1 [35] gelten als „kurze Wände“ Mauerwerkswände oder -pfeiler, deren Querschnittsflächen <1000 cm^2 sind. Gemauerte Querschnitte < 400 cm^2 sind als tragende Bauteile unzulässig. In der derzeit gültigen Bemessungsnorm für das allgemeine Nachweisverfahren zur Berechnung des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd} (DIN EN 1996-1-1 [13]) ist definiert, dass eine tragende Wand mindestens einen Nettoquerschnitt von 400 cm^2 unter Berücksichtigung von Schlitzen und Aussparungen aufweisen muss. Ebenso ist in der Norm geregelt, dass die Bemessungsfestigkeit des Mauerwerks bei einem Wandquerschnitt < 1000 cm^2 mit einem Faktor von $0{,}7 + 3 \cdot A$ (belastete Bruttoquerschnittsfläche in m^2) abgemindert werden muss. Zusammenfassend ergibt sich daraus, dass ein tragender Mauerwerkspfeiler Abmessungen zwischen 400 cm^2 und 1000 cm^2 aufweisen muss und alles ab 1000 cm^2 als Mauerwerkswand definiert wird.

Für die Durchführung von den Feuerwiderstandsprüfungen in diesem Kapitel wurden Wände mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m aus wärmedämmenden Hochlochziegeln

erstellt und beidseitig verputzt. Gemäß den zuvor erläuterten Definitionen wäre demnach eine Mauerwerkslänge von 27,4 cm ausreichend, um einen Querschnitt größer 1000 cm^2 aufzuweisen und somit als Wand eingestuft zu werden. Aufgrund der Steganordnungen und einer notwendigen Zerteilung der wärmedämmenden Hochlochziegel, um normativ geforderte Überbindemaße einzuhalten, ist es nicht möglich, solch eine kurze Wandlänge zu realisieren. Die gewählte Wandlänge von 1,0 m weist mit einer Ziegelbreite von 0,365 m eine Querschnittsfläche von 3650 cm^2 auf. Ebenfalls werden in den Berechnungsverfahren zur Tragfähigkeit von Mauerwerk immer Einwirkungen pro Meter Wandlänge ermittelt, was ebenso für eine Klassifizierung der Probekörper als Wand spricht. Allgemein sind alle zu prüfenden Versuchskörper im Rahmen der Dissertation als Wände zu klassifizieren, da die geringsten Abmessungen der Probekörper 1,0 m in der Länge und 0,175 m in der Dicke sind.

Bei allen Feuerwiderstandsprüfungen erfolgte eine einseitige Brandbeanspruchung mit der ETK. Sechs Platten-Thermometer werden für die Messung der Temperaturen im Brandraum verwendet. Bei den Versuchen erfolgte die zentrische Lasteinleitung normgerecht am Wandkopf gemäß DIN EN 1365-1 [5]. Der Ofendruck wurde nach DIN EN 1363-1 [11] eingestellt. Die Last wurde 15 Minuten vor Beginn der Feuerwiderstandsprüfung aufgebracht. Die Messung der vertikalen Stauchung bzw. Ausdehnung der Mauerwerkswände erfolgte jeweils an beiden oberen Seiten der Mauerwerkswand.

Abb. 4.13 zeigt den verwendeten Prüfstand für normalkraftbelastete Mauerwerkswände mit den Abmessungen von 1,0 m in der Länge und 3,0 m in der Höhe, die einer Feuerwiderstandsprüfung unterzogen werden sollen. Das am Wandkopf ausgeführte Zementmörtelbett mit einer Dicke von ca. 10 mm bis 15 mm zur Ausrichtung der Lasteinleitungsplatte liegt außerhalb der beflammten Wandhöhe und wurde mindestens fünf Tage vor Beginn einer Feuerwiderstandsprüfung hergestellt. Zum Zeitpunkt der Feuerwiderstandsprüfung konnte für dieses anhand von drei Mörtelprismen eine mittlere Druckfestigkeit von 44,41 MPa ermittelt werden. Die Lasteinleitungsplatte ist eine Stahlplatte in der Länge und Breite der Mauerwerkswand und besitzt eine Dicke von 20 mm, welche ohne Gefälle ausgerichtet wird und somit Unebenheiten der Mauerwerkswand ausgleicht. Auf dieser befindet sich ein Vierkant mit den Abmessungen von 15 mm x 15 mm, auf welchen ein Stahlbalken drückt, wodurch die Prüflast in die Wand eingeleitet wird. Am Fußpunkt steht die Wand auf einer 30 mm dicken Platte auf. Diese ist auf einem 30,0 cm dicken Stahlträger positioniert. Die Stahlplatte mit der darauf befindlichen Wand wird immer so ausgerichtet, dass die Wand mittig auf dem Träger steht. Die 1,0 m langen seitlichen Wände bestehen aus Porenbeton Planblöcken mit den Abmessungen L x B x H = 599 mm x 240 mm x 249 mm. Diese werden auf der brandzugewandten Wandseite zusätzlich mit einer 10,0 cm dicken Schicht aus Dämmwolle gegen eine Brandeinwirkung geschützt. Beide seitlichen Ränder der Wände aus den Porenbeton Planblöcken sind mit 25 mm bis 50 mm breiten Mineralwollstreifen verfüllt. Dadurch wird auch gemäß DIN EN 1365-1 [5] sichergestellt, dass die zu prüfende Mauerwerkswand eine freie Beweglichkeit an beiden vertikalen Rändern besitzt.

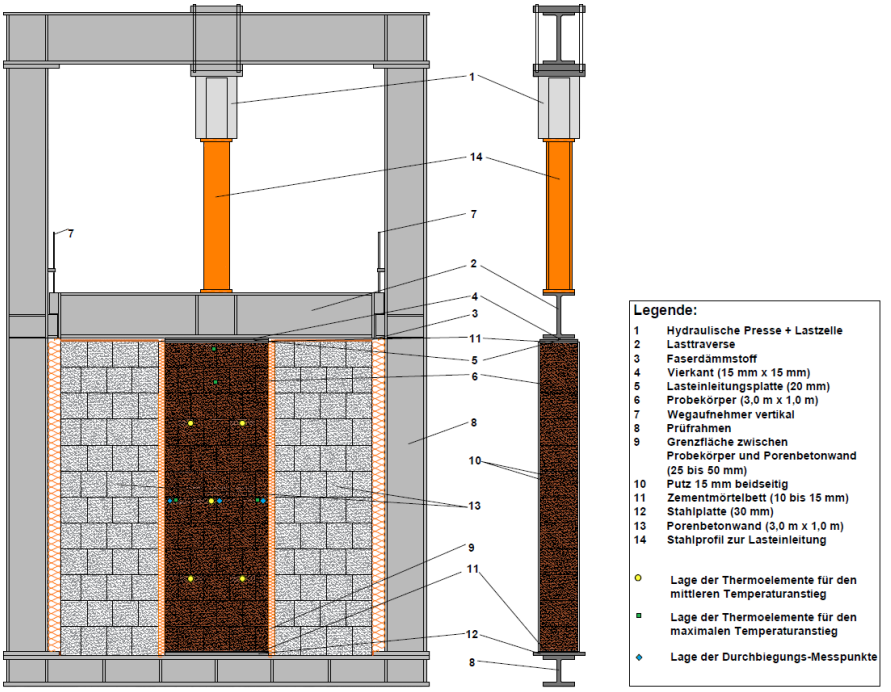


Abb. 4.13: Prüfstand für Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden H x L = 3,0 m x 1,0 m

Insgesamt wurden zwölf Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m durchgeführt. Das Prüfprogramm beinhaltet jeweils drei Versuche mit dem verfüllten Großkammerziegel ThermoPlan MZ70, drei Versuche mit dem kleingelochten verfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO sowie drei Versuche mit dem unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO je mit gedeckelter und nicht gedeckelter Lagerfuge. Ziel der Feuerwiderstandsprüfungen war es, ein Versagen der 1,0 m langen und 3,0 m hohen Wände über die Zeitspanne von 30 Minuten bis 120 Minuten hervorzurufen. Dies hängt mit den brandschutztechnischen Anforderungen für Außenwände von Wohngebäuden gemäß Kapitel 2.2.1 zusammen. Zur Erreichung der Zeiträume wurde die zentrisch eingeleitete Prüflast ($P_{gewählt}$) jeweils nach jeder Feuerwiderstandsprüfung individuell aufgrund der gewonnenen Erfahrung aus Kapitel 4.3.2 angepasst.

Aufgrund von verschiedenen Wanddicken und charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeiten f_k resultieren unterschiedliche Bemessungswerte für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd}, bei welchen die Wandschlankheit λ über den Abminderungsfaktor Φ_m gemäß Gleichung (2.6) berücksichtigt wird. In Abhängigkeit von dem Bemessungswert für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd} ergeben sich bei gleicher gewählter Prüflast $P_{gewählt}$ unterschiedliche Ausnutzungsfaktoren α_{fi}, welche die Feuerwiderstandsdauer beeinflussen. Aufgrund schwankender Prüflasten $P_{gewählt}$ von ungefähr ± 1,0 kN während aller Feuerwiderstandsprüfungen erfolgt eine Rundung des Bemessungswerts für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd} auf ganze Zahlen. Tab. 4.13 können die genannten Informationen zu den Feuerwiderstandsprüfungen entnommen werden.

Tab. 4.13: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A

Ziegel	Wanddicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	Φ_m [-]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuer-wider-stands-dauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]
MZ70	364	2,7	0,99	650	375	0,58	82	A1-MZ70-365mm-375kN
MZ70	364	2,7	0,99	650	240	0,37	72	A2-MZ70-365mm-240kN
MZ70	364	2,7	0,99	650	200	0,31	105	A3-MZ70-365mm-200kN
W07 V	362	2,4	0,99	574	509	0,89	39	A4-W07 V-365mm-509kN
W07 V	362	2,4	0,99	574	375	0,65	70	A5-W07 V-365mm-375kN
W07 V	362	2,4	0,99	574	280	0,49	69	A6-W07 V-365mm-280kN
W07 UV	362	2,4	0,99	574	375	0,65	47	A7-W07 UV-365mm-375kN
W07 UV	362	2,4	0,99	574	280	0,49	65	A8-W07 UV-365mm-280kN
W07 UV	362	2,4	0,99	574	200	0,35	89	A9-W07 UV-365mm-200kN
W07 UV NG	362	2,4	0,99	574	375	0,65	16	A10-W07 UV NG-365mm-375kN
W07 UV NG	362	2,4	0,99	574	200	0,35	56	A11-W07 UV NG-365mm-200kN
W07 UV NG	362	2,4	0,99	574	135	0,24	66	A12-W07 UV NG-365mm-135kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$ siehe Gleichung (2.6)

$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$ mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$ siehe Gleichung (2.3)

$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$ mit $l = 1{,}0\ m$ siehe Gleichung (2.2)

$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$ siehe Gleichung (2.12)

Anlage E können zusätzliche Informationen wie die während der Feuerwiderstandsprüfung aufgezeichneten Messdaten entnommen werden. Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgt in Kapitel 5.3.1.

4.4.2 Versuchsserie B (H x L = 3,0 m x 1,0 m mit verschiedenartigen Nennmaßdicken ungleich 0,365 m)

Bei den nachfolgenden Feuerwiderstandsprüfungen handelt es sich um identische Versuche in Bezug auf den Prüfaufbau, welcher in Kapitel 4.4.1 beschrieben wurde. Bei der Versuchsserie B werden Prüfkörpern mit einer Nennmaßdicke ungleich 0,365 m untersucht. Es wurden jeweils zwei Prüfungen an Wänden aus dem verfüllten und unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO mit einer Breite von 0,175 m durchgeführt sowie an 0,190 m dicken Wänden bestehend aus dem Ziegel ThermoPlan MZ70. Diese Maße wurden durch ein Zersägen der 0,365 m breiten Ziegel erzielt, wobei darauf geachtet wurde, dass die zerteilten Ziegel trotzdem noch beidseitig Stege auf den Außenseiten aufwiesen. Aufgrund unterschiedlich dicker Innen- und Außenstege bei dem kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO ergaben sich nach dem Zersägen unterschiedliche Außenstegdicken. Bei den nachfolgenden Feuerwiderstandsprüfungen wurde die Wandseite mit dem dickeren Außensteg der Brandbeanspruchung zugewandt. Bei den Großkammerziegeln weisen Innen- und Außenstege ein gleiches Maß auf, wodurch die Außenstege nach dem Zersägen der Ziegel gleich dick blieben.

Des Weiteren wurde je eine 3,0 m hohe und 1,0 m lange Mauerwerkswand in den Nenndicken 0,240 m und 0,490 m mit dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 hergestellt und diese in einer Feuerwiderstandsprüfung geprüft. Dadurch wird das Bauteilverhalten von Wänden mit einer Dicke von 0,175 m, 0,190 m, 0,240 m, 0,365 m bis hin zu 0,490 m untersucht. Es folgen in Tab. 4.14 analog zu Tab. 4.13 Informationen zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen.

Tab. 4.14: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie B

Ziegel	Wanddicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	Φ_m [-]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuer-wider-stands-dauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]
MZ70	190	2,7	0,86	293	200	0,68	129	B1-MZ70-190mm-200kN
MZ70	190	2,7	0,86	293	200	0,68	86	B2-MZ70-190mm-200kN
MZ70	239	2,2	0,91	320	200	0,63	48	B3-MZ70-240mm-200kN
MZ70	497	2,1	1,00	696	375	0,54	80	B4-MZ70-490mm-375kN
W07 V	175	2,4	0,83	233	200	0,86	58	B5-W07 V-175mm-200kN
W07 V	175	2,4	0,83	233	154	0,66	72	B6-W07 V-175mm-154kN
W07 UV	175	2,4	0,83	233	200	0,86	62	B7-W07 UV-175mm-200kN
W07 UV	175	2,4	0,83	233	82	0,35	184*	B8-W07 UV-175mm-82kN

* Kein Bauteilversagen nach 180 Minuten. Anschließend Last erhöht bis Bauteilversagen bei 176,3 kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)

Weitere Informationen wie die Messdaten der durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen können der Anlage F entnommen werden. Eine Auswertung der Daten der Feuerwiderstandsprüfungen erfolgt in Kapitel 5.3.1.

4.4.3 Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m)

Der für die Feuerwiderstandsprüfungen verwendete Prüfstand ist identisch mit dem, welcher in Kapitel 4.3.2 beschrieben wurde und in Abb. 4.11 dargestellt ist. Die Prüfkörper waren ebenfalls gleich und wiesen 1,50 m in der Höhe (1,25 m beflammte Höhe) und 1,0 m in der Länge auf, wodurch diese im Vergleich zu den Probekörpern in Kapitel 4.4.1 um die Hälfte in der Höhe reduziert waren. Mithilfe dieser Versuche sollten die Feuerwiderstandsdauern sowie das Bauteilverhalten im Brandfall der in der Höhe ver-

kleinerten Probekörper untersucht werden. Das bezüglich einer Reduzierung der Prüfkörperabmessungen für Brandversuche Bedarf besteht, zeigen bereits in der Vergangenheit durchgeführte Untersuchungen [92]. Tab. 4.15 sind Informationen zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen zu entnehmen. Die aufgeführten Parameter und Eigenschaften sind identisch zu der vorherigen Tab. 4.13 und Tab. 4.14.

Tab. 4.15: Daten der kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C

Ziegel	Wanddicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	Φ_m [-]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuer-wider-stands-dauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]
MZ70	364	2,7	1,00	655	850	1,30	60	C1-MZ70-365mm-850kN
MZ70	364	2,7	1,00	655	700	1,07	124	C2-MZ70-365mm-700kN
MZ70	364	2,7	1,00	655	512	0,78	141	C3-MZ70-365mm-512kN
MZ70	364	2,7	1,00	655	375	0,57	161	C4-MZ70-365mm-375kN
W07 V	362	2,4	1,00	579	512	0,88	58	C5-W07 V-365mm-512kN
W07 V	362	2,4	1,00	579	460	0,79	198	C6-W07 V-365mm-460kN
W07 V	362	2,4	1,00	579	425	0,73	145	C7-W07 V-365mm-425kN
W07 V	362	2,4	1,00	579	365	0,63	128	C8-W07 V-365mm-365kN
W07 UV	362	2,4	1,00	579	512	0,88	71	C9-W07 UV-365mm-512kN
W07 UV	362	2,4	1,00	579	485	0,84	99	C10-W07 UV-365mm-485kN
W07 UV	362	2,4	1,00	579	460	0,79	123	C11-W07 UV-365mm-460kN
W07 UV	362	2,4	1,00	579	375	0,65	154	C12-W07 UV-365mm-375kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$ siehe Gleichung (2.6)

$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$ mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$ siehe Gleichung (2.3)

$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$ mit $l = 1{,}0\ m$ siehe Gleichung (2.2)

$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$ siehe Gleichung (2.12)

Bei einem Vergleich der in Tab. 4.13 aufgeführten Bemessungswerte für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd} der Versuchsserie A mit denen aus Tab. 4.15 (Versuchsserie C) ist festzustellen, dass die berechneten Tragwiderstände für die Feuerwiderstandsprüfungen der halb so hohen Wände (1,50 m anstelle von 3,0 m) mit identischer Wanddicke nur geringfügig höher ausfallen. Rückzuführen ist dies auf den Abminderungsfaktor Φ_m, welcher in Abhängigkeit von der Wandschlankheit λ Zusatzbeanspruchungen infolge Theorie II. Ordnung in Wandmitte berücksichtigt. Dieser berechnet sich für die Versuchsserie A zu Φ_m = 0,99 und für die Versuchsserie C zu Φ_m = 1,0. Aufgrund der verhältnismäßig geringen berechneten Bemessungswerte für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd} der Wände der Versuchsserie C, durch welche die Prüflasten $P_{gewählt}$ geteilt werden, resultieren Ausnutzungsfaktoren α_{fi} > 1,0.

Abb. 4.14 zeigt eine grafische Darstellung der Versuchsergebnisse der Versuchsserie C in Bezug auf den Ausnutzungsfaktor α_{fi}. Ebenso in dem Diagramm aufgeführt sind die versuchstechnisch ermittelten maximalen vertikalen Tragwiderstände $N_{Rm,Versuch}$ bei einer Prüfdauer von 0 Minuten der einzelnen Ziegeltypen, welche Tab. 4.5 entnommen werden können. Des Weiteren sind die Prüflasten $P_{gewählt}$ und die zugehörigen Versagenszeitpunkte aufgeführt. In Abb. 4.14 wird sichtbar, inwiefern die gewählte Prüflast und die Dauer der Brandbeanspruchung mittels der ETK einen Einfluss auf die Tragfähigkeit besitzt.

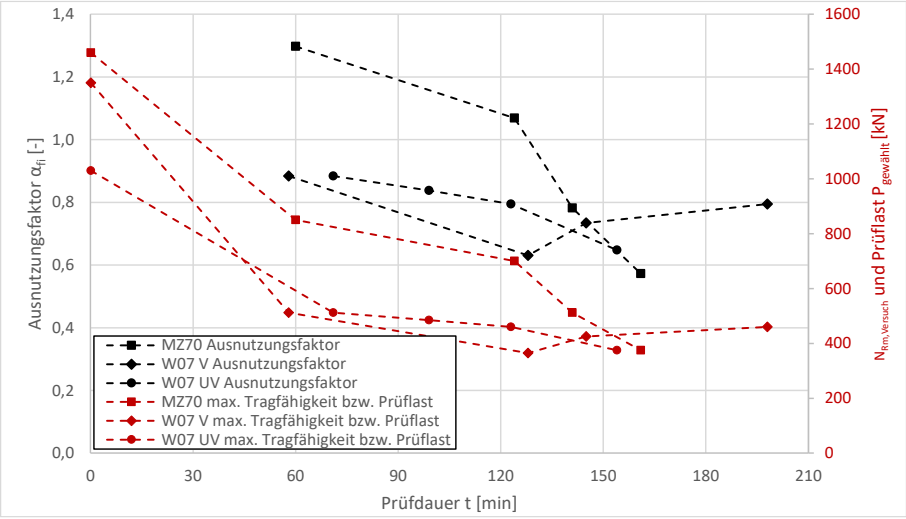


Abb. 4.14: Grafische Darstellung der Versuchsergebnisse der kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C

Weitere Informationen zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen sowie den Messdaten können der Anlage G entnommen werden. Eine Auswertung der Versuchsergebnisse folgt in Kapitel 5.3.2.

4.4.4 Versuchsserie D (H x L = 3,0 m x 3,0 m mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m)

Für den Abgleich und eine Übertragbarkeit der Ergebnisse von den Feuerwiderstandsprüfungen in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 wurden zwei großformatige Validierungsversuche durchgeführt. Ein Validierungsversuch (D1-MZ70-365mm-200kN/m) mit einer Wandhöhe von 3,0 m wurde in dem Brandofen der RPTU durchgeführt, wobei prüfaufbaubedingt die unteren 0,15 m nicht direkt beflammt wurden. Eine weitere Feuerwiderstandsprüfung (D2-MZ70-365mm-200kN/m) wurde bei der MPA BS durchgeführt, welcher mit einer beflammten Wandhöhe von 3,0 m alle Anforderungen an DIN EN 1365-1 [5] einhält [93]. Beide Validierungsversuche wiesen eine Länge von 3,0 m auf. Für diese Feuerwiderstandsprüfungen wurde jeweils eine Wand mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m mit dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 hergestellt. Diese Versuche sollen zum einen zeigen, welche Abweichungen zu einer Mauerwerkswand mit einer Länge von 1,0 m im Vergleich zu 3,0 m Länge bestehen und zum anderen soll gezeigt werden, dass die ermittelten Ergebnisse der Prüfinstitute unabhängig voneinander sind. Die Anordnung der Messtechnik kann Abb. 4.15 sowie Abb. A.3 und Abb. A.4 in Anlange A entnommen werden. Die Abb. 4.15 zeigt den Prüfrahmen und Prüfaufbau der RPTU für den großformatigen Validierungsversuch mit den Wandabmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge.

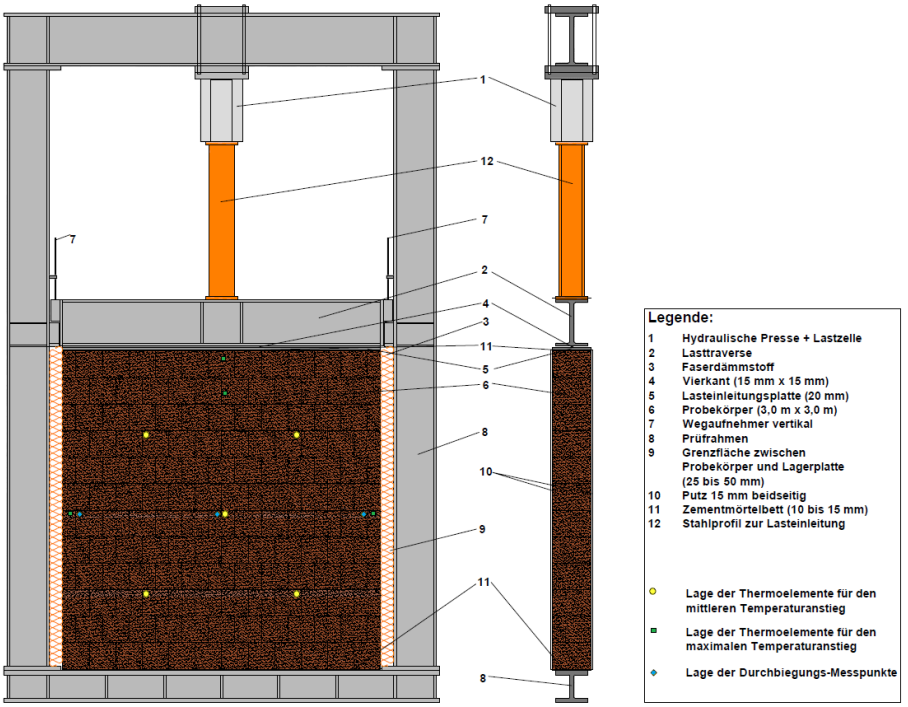


Abb. 4.15: Prüfstand der RPTU für Feuerwiderstandsprüfungen an Mauerwerkswänden H x L = 3,0 m x 3,0 m

Bei den Prüfungen an der RPTU wird als Energieträger Gas verwendet, während bei der MPA BS die Brenner mit Öl betrieben werden. Weiter unterscheiden sich die Prüfungen in der Belastungsvorrichtung, da an der RPTU die Prüflast mittels eines Hydraulikzylinders und einer Handpumpe aufgebracht wird und bei der MPA BS eine Servohydraulik zwei Hydraulikzylinder steuert. Die Lasteinleitungsplatte der MPA BS ist mit 50 mm dicker als die der RPTU, welche 20 mm dick ist. Die Größe der Brennkammer ist an beiden Prüfinstituten nahezu identisch. Aus den zuvor genannten Unterschieden sollten keine Einflüsse resultieren. Demnach ist davon auszugehen, dass die Differenz in der Feuerwiderstandsdauer der Versuche im Streubereich dieser Feuerwiderstandsprüfungen liegt. Es folgt die Übersicht der Versuchsergebnisse in Tab. 4.16 sowie Informationen zu der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k, dem Abminderungsfaktor Φ_m, dem Bemessungswert für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rd} und der gewählten Prüflast $P_{gewählt}$ sowie dem daraus resultierenden Ausnutzungsfaktor α_{fi}.

Tab. 4.16: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D zur Validierung

Ziegel	Wanddicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	Φ_m [-]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuerwiderstandsdauer [min]	Versuchsbezeichnung [-]
MZ70	364	2,7	0,99	650	200	0,31	181	D1-MZ70-365mm-200kN/m
MZ70	364	2,7	0,99	650	200	0,31	144	D2-MZ70-365mm-200kN/m

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)

Informationen wie aufgezeichnete Messdaten zu der Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m sind der Anlage H zu entnehmen. Weitere Angaben zu dem Versuch D2-MZ70-365mm-200kN/m sind in dem Prüfbericht (2103/927/22) -FL [93] aufgeführt. Eine Auswertung der Versuchsergebnisse folgt in Kapitel 5.3.3.

5 Versuchsauswertung

Die Probekörper der Versuchsserie A (Kapitel 4.4.1) und C (Kapitel 4.4.3) unterschieden sich nur in der Höhe. Bei einem Vergleich der Prüflasten und Feuerwiderstandsdauern der Tab. 4.13 mit Tab. 4.15 ist festzustellen, dass die halb so hohen Prüfkörper der Versuchsserie C (h = 1,5 m) bei gleichen Prüflasten längere Feuerwiderstandsdauern aufweisen. In Hinblick auf die Bildung von Faktoren zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in Bezug die Feuerwiderstandsdauer müssen demnach die kleineren Prüfkörper höher belastet werden. Daher gilt es Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m für unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen zu definieren. Mithilfe dieser soll eine Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse resultierend aus Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) erfolgen, sodass mit diesen eine Klassifizierung des Feuerwiderstandes ermöglicht wird. Eine Alternative wäre auch, die Schlankheit der verschieden hohen Mauerwerkswände durch unterschiedliche Ziegelbreiten gleich zu setzen, wobei nicht jede Schlankheit aufgrund definierter Ziegelbreiten realisiert werden kann. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen der Dissertationsschrift nicht weiter untersucht. In Kapitel 5.1 werden die Messdaten und Versuchsbeobachtungen der Feuerwiderstandsprüfungen aus Kapitel 4.4 bzgl. unterschiedlicher Aspekte ausgewertet. Das Kapitel 5.2 befasst sich inhaltlich damit, wie die Auswertung der Versuchsdaten (Kapitel 5.3) in Bezug auf die Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen und der Definition von Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m erfolgt.

5.1 Gegenüberstellung der Messdaten und Versuchsbeobachtungen

Es folgt eine Analyse der in Kapitel 4.4.1 bis 4.4.4 durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen. Diese werden in Hinblick auf die Messdaten für die vertikale und horizontale Verformung sowie der Prüflast und Temperaturaufzeichnungen auf der Wandoberfläche und im Wandinneren ausgewertet. Des Weiteren werden die Versuchsbeobachtungen, welche während der Feuerwiderstandsprüfungen notiert wurden, analysiert. Gewonnene Erkenntnisse aus dem Kapitel 3 und 4 werden bei der Auswertung mit einbezogen.

Zunächst werden die Abhängigkeiten der vertikalen und horizontalen Verformungen für den Kalt- und Brandfall für Bauteile erläutert, die eine gleiche Lagerung aufweisen und zentrisch auf Druck beansprucht sind. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 eine Übertragung der Erkenntnisse auf Mauerwerkswände bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einer Feuerwiderstandsprüfung.

Verformungen – Kaltfall

Wird ein Bauteil auf Druck beansprucht, wird dieses in Abhängigkeit der Normalkraft gestaucht. Die Stauchung ist abhängig von der mechanischen Spannung und dem Elastizitätsmodul des Bauteils. Es resultiert ein Moment aus der Schlankheit und Imperfektionen des Bauteils bzw. einer geringen Lastausmitte. In Abhängigkeit von der Wandschlankheit λ erfolgt für “gedrungene“ Bauteile meist ein Querschnittsversagen,

weil die zulässigen Materialspannungen überschritten werden. Bei schlanken Bauteilen sorgen die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit EI des Bauteils und der einwirkenden Kraft für einen großen Momentenzuwachs. Daraus resultiert eine horizontale Verformung des Bauteils. In Abhängigkeit von der Wandschlankheit λ und der Größe der einwirkenden Kräfte kann ein Stabilitätsversagen (Knicken) resultieren, bevor die Materialfestigkeit vom Bauteil erreicht wird.

Verformungen – Brandfall

Aufgrund einer Temperatureinwirkung dehnen sich Baustoffe aus. Die Dehnung ε ist der Quotient aus Verlängerung und Ursprungslänge und ist abhängig von der einwirkenden Normalkraft, der Dehnsteifigkeit EA, dem Temperaturausdehnungskoeffizienten sowie der Temperaturänderung über die Zeit. Die vertikale Ausdehnung infolge hoher Temperatur wirkt der aus Druck resultierenden Stauchung entgegen. Durch eine hohe Temperaturbeanspruchung nehmen die aus dem Kaltfall sich einstellenden horizontalen Verformungen zu, was ein Stabilitätsversagen (Knicken) wahrscheinlicher macht.

5.1.1 Verformungen während der Vorbelastung

Bei einer Feuerwiderstandsprüfung wird der Prüfkörper gemäß Kapitel 2.2.4 vor Beginn der Temperaturerhöhung 15 Minuten lang mit der zentrischen Prüflast bei Raumtemperatur vorbelastet. Einen Einfluss auf die Verformung von einer Mauerwerkswand hat unter anderem die Dehnsteifigkeit, die Biegesteifigkeit, die Lagerung sowie die mechanische Spannung. Aufgrund der Berücksichtigung der Wandschlankheit λ steht ein höherer Ausnutzungsfaktor α_{fi} nicht immer mit einer höheren Spannung im Zusammenhang. Für dünnere Wände ergeben sich bei gleicher Spannung σ höhere Ausnutzungsfaktoren α_{fi}. Auch die Ziegelgeometrie und Steganordnung kann einen Einfluss auf die Verformung haben. Die Lagerung der Wand im Prüfrahmen ist bei allen Feuerwiderstandsprüfungen die gleiche. Der Elastizitätsmodul kann für Mauerwerk in Abhängigkeit von der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k ermittelt werden. Der Ausnutzungsfaktor α_{fi} wird gemäß Gleichung (2.12) berechnet und beinhaltet alle zuvor genannten Parameter. Ausschlaggebend von der Größe des Ausnutzungsfaktors α_{fi} verformt sich der Prüfkörper während der Vorbelastung vertikal (Stauchung) sowie in der Regel in Richtung brandzugewandter Wandseite. Als Grund hierfür kann aufgeführt werden, dass die Wände auf der brandzugewandten Wandseite bündig gemauert wurden, woraus auf der brandabgewandten Seite Versätze resultierten. Tab. 5.1 zeigt die Messdaten der Verformungen am Ende der 15-minütigen Vorbelastung der durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen mit den Wandabmessungen von 3,0 m in der Höhe sowie 1,0 m und 3,0 m in der Länge. Die Messdaten sind mit aufsteigendem Ausnutzungsfaktor α_{fi} getrennt nach Lochungsart der Ziegel sortiert. Grau eingefärbte Zellen weisen auf Unregelmäßigkeiten hin. Es konnten während des Belastungsvorganges Knackgeräusche im Wandinneren wahrgenommen werden.

Tab. 5.1: Vertikale und horizontale Verformungen der Prüfkörper mit einer Höhe von 3,0 m sortiert nach Höhe des Ausnutzungsfaktors α_{fi}

Ziegel	Wand-dicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	α_{fi} [-]	Vertikale Verfor-mung* [mm]	Horizon-tale Ver-formung* [mm]	Versuchsbezeichnung [-]
MZ70	0,365	2,7	0,31	1,71	1,02	D1-MZ70-365mm-200kN/m**
MZ70	0,365	2,7	0,31	2,49	2,03	A3-MZ70-365mm-200kN
MZ70	0,365	2,7	0,31	8,55***	-	D2-MZ70-365mm-200kN/m**
MZ70	0,365	2,7	0,37	2,69	2,60	A2-MZ70-365mm-240kN
MZ70	0,490	2,1	0,54	3,70	3,43	B4-MZ70-490mm-375kN
MZ70	0,365	2,7	0,58	4,29	4,36	A1-MZ70-365mm-375kN
MZ70	0,240	2,2	0,62	2,25	1,85	B3-MZ70-240mm-200kN
MZ70	0,190	2,7	0,68	2,19	0,89****	B1-MZ70-190mm-200kN
MZ70	0,190	2,7	0,68	2,20	2,38	B2-MZ70-190mm-200kN
W07 UV NG	0,365	2,4	0,24	1,78	0,57	A12-W07 UV NG-365mm-135kN
W07 UV	0,365	2,4	0,35	2,44	2,29	A9-W07 UV-365mm-200kN
W07 UV NG	0,365	2,4	0,35	2,75	2,13	A11-W07 UV NG-365mm-200kN
W07 UV	0,175	2,4	0,35	1,18	1,14	B8-W07 UV-175mm-82kN
W07 UV	0,365	2,4	0,49	3,11	2,72	A8-W07 UV-365mm-280kN
W07 V	0,365	2,4	0,49	3,46	2,96	A6-W07 V-365mm-280kN
W07 UV	0,365	2,4	0,65	4,19	2,20	A7-W07 UV-365mm-375kN
W07 UV NG	0,365	2,4	0,65	4,66	3,99	A10-W07 UV NG-365mm-375kN
W07 V	0,365	2,4	0,65	4,69	3,37	A5-W07 V-365mm-375kN
W07 V	0,175	2,4	0,66	1,88	2,31	B6-W07 V-175mm-154kN
W07 V	0,175	2,4	0,86	2,55	2,38	B5-W07 V-175mm-200kN
W07 UV	0,175	2,4	0,86	2,68	4,00	B7-W07 UV-175mm-200kN
W07 V	0,365	2,4	0,89	5,67	4,36	A4-W07 V-365mm-509kN

* Absolutwerte

** Wandlänge 3,0 m statt 1,0 m

*** Prüfung an MPA BS; Messwert stammt vom Zylinderweg zur Lasteinleitung, nicht von Wegaufnehmern

**** Wegaufnehmer wurde während der Belastung nachjustiert

Die Messergebnisse bestätigen ohne Berücksichtigung der grau eingefärbten Zellen, dass ein höherer Ausnutzungsfaktor α_{fi} für eine größere vertikale Stauchung und horizontale Verformung einer Wand sorgt. Bei den grau eingefärbten Zellen, die auf eine Unregelmäßigkeit hinweisen, lassen sich deutlich geringere Verformungen (ausgenommen der Versuch D2-MZ70-365mm-200kN/m) feststellen. Die grau eingefärbten

Zellen sind bis auf zwei Fälle Wänden mit einer Wanddicke ≤ 240 mm zugeordnet. Werden die Wände in Tab. 5.1 bezüglich der Höhe der Prüflast unabhängig von der Lochungsart der Ziegel sortiert, kann anhand von Tab. 5.2 festgestellt werden, dass teilweise nur geringe Unterschiede in Bezug auf die Verformungen bei gleicher Prüflast und unterschiedlich dicken Wänden und Ziegeln resultieren.

Tab. 5.2: Vertikale und horizontale Verformungen der Prüfkörper mit einer Höhe von 3,0 m sortiert nach Höhe der Prüflast

Ziegel	Wand-dicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	α_{fli} [-]	Vertikale Verfor-mung* [mm]	Horizon-tale Ver-formung* [mm]	Versuchsbezeichnung [-]
W07 UV	0,175	2,4	0,35	1,18	1,14	B8-W07 UV-175mm-**82kN**
W07 UV NG	0,365	2,4	0,24	1,78	0,57	A12-W07 UV NG-365mm-**135kN**
W07 V	0,175	2,4	0,66	1,88	2,31	B6-W07 V-175mm-**154kN**
MZ70	0,365	2,7	0,31	1,71	1,02	D1-MZ70-365mm-**200kN/m****
MZ70	0,365	2,7	0,31	2,49	2,03	A3-MZ70-365mm-**200kN**
MZ70	0,365	2,7	0,31	8,55***	-	D2-MZ70-365mm-**200kN/m****
MZ70	0,240	2,2	0,62	2,25	1,85	B3-MZ70-240mm-**200kN**
MZ70	0,190	2,7	0,68	2,19	0,89*****	B1-MZ70-190mm-**200kN**
MZ70	0,190	2,7	0,68	2,20	2,38	B2-MZ70-190mm-**200kN**
W07 UV	0,365	2,4	0,35	2,44	2,29	A9-W07 UV-365mm-**200kN**
W07 UV NG	0,365	2,4	0,35	2,75	2,13	A11-W07 UV NG-365mm-**200kN**
W07 V	0,175	2,4	0,86	2,55	2,38	B5-W07 V-175mm-**200kN**
W07 UV	0,175	2,4	0,86	2,68	4,00	B7-W07 UV-175mm-**200kN**
MZ70	0,365	2,7	0,37	2,69	2,60	A2-MZ70-365mm-**240kN**
W07 UV	0,365	2,4	0,49	3,11	2,72	A8-W07 UV-365mm-**280kN**
W07 V	0,365	2,4	0,49	3,46	2,96	A6-W07 V-365mm-**280kN**
MZ70	0,490	2,1	0,54	3,70	3,43	B4-MZ70-490mm-**375kN**
MZ70	0,365	2,7	0,58	4,29	4,36	A1-MZ70-365mm-**375kN**
W07 UV	0,365	2,4	0,65	4,19	2,20	A7-W07 UV-365mm-**375kN**
W07 UV NG	0,365	2,4	0,65	4,66	3,99	A10-W07 UV NG-365mm-**375kN**
W07 V	0,365	2,4	0,65	4,69	3,37	A5-W07 V-365mm-**375kN**
W07 V	0,365	2,4	0,89	5,67	4,36	A4-W07 V-365mm-**509kN**

* Absolutwerte

** Wandlänge 3,0 m statt 1,0 m

*** Prüfung an MPA BS; Messwert stammt vom Zylinderweg zur Lasteinleitung, nicht von Wegaufnehmern

**** Wegaufnehmer wurde während der Belastung nachjustiert

Grau eingefärbte Zellen der Tab. 5.2 weisen auf eine Unregelmäßigkeit der Verformung bei gleicher Prüflast hin. Eine mögliche Erklärung für die nahezu gleichen Verformungen bei gleicher Prüflast aber unterschiedlich dicken Wänden ist das nicht lineare Verhältnis Wanddicke bzw. Wandschlankheit λ bei gleicher Wandhöhe zum Ausnutzungsfaktor α_{fi}. Dünnere Wände sollten bei gleicher Prüflast größere horizontale Verformungen aufweisen, da dort die Biegesteifigkeit geringer ist.

Bei ungefähr gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} können für die unterschiedlichen Ziegel nur geringe Abweichungen für die Verformungen ermittelt werden. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Deckelung der Lagerfuge keinen Einfluss auf die vertikale Stauchung besitzt. Bei einem Vergleich der vertikalen und horizontalen Verformungen fällt auf, dass die horizontalen Verformungen üblicherweise etwas geringer ausfallen. Die Größenordnung liegt im Mittel bei 0,58 mm. Für die 0,365 m dicken Wände der Tab. 5.1 kann in Abhängigkeit vom Ausnutzungsfaktor α_{fi} festgestellt werden, dass aus einer Erhöhung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} um 0,1 eine Verformungszunahme in vertikaler und horizontaler Richtung von 0,68 mm resultiert.

5.1.2 Verformungen während des Brandverlaufes

Nach Ablauf der 15-minütigen Vorbelastung erfolgt die einseitige Temperaturbeanspruchung der Mauerwerkswände gemäß ETK. In Kapitel 3.2 wurde das horizontale Verformungsverhalten für 3,0 m lange Wände anhand von Prüfberichten erläutert. In Kapitel 5.1.2.1 bis 5.1.2.3 werden die Unterschiede der geprüften Probekörperabmessungen in Bezug auf das horizontale Bauteilverhalten sowie die daraus resultierenden vertikalen Verformungen untersucht. Es folgt eine Zusammenfassung aufgrund der Versuchsbeobachtungen bzgl. des horizontalen Verformungsverhaltens von Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln bei einer zentrischen Lasteinleitung und einseitiger Brandbeanspruchung.

Bei einer Brandbeanspruchung nehmen die Temperaturen innerhalb des Ziegels vom Brandraum nach außen hin ab, was innerhalb der Ziegelstruktur zu lokal unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen führt. Für die untersuchten Ziegel kann die Ausdehnung des Ziegelmaterials für die unterschiedlichen Temperaturen dem Kapitel 4.3.1 entnommen werden. Diese lokal variierenden Temperaturgradienten konnten bereits mithilfe numerischer Berechnungen sowie anhand von Versuchen, insbesondere bei wärmedämmenden Hochlochziegeln unter Brandbelastungen gezeigt werden [94]. Abb. 5.1 zeigt überhöht dargestellt das horizontale Verformungsverhalten einer Mauerwerkswand aufgrund mechanischer und thermischer Einwirkungen zum Beginn einer Feuerwiderstandsprüfung und verbildlicht das zuvor angesprochene Bauteilverhalten [92, 95]. Bei den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen im Rahmen der Dissertation (siehe Kapitel 5.3) kam es bei 32 von 34 Feuerwiderstandsprüfungen am Anfang zu einer Verformung der Wand in Richtung des Brandraumes. In der Praxis und bei einer Feuerwiderstandsprüfung verformen sich die Auflager am Wandfuß und -kopf nicht bzw. nur in sehr geringen Maßen. Es resultieren aus den lokal auftretenden thermischen Ausdehnungen Spannungen in der Wand, da sich diese aufgrund der Einspannung nicht frei ausdehnen können.

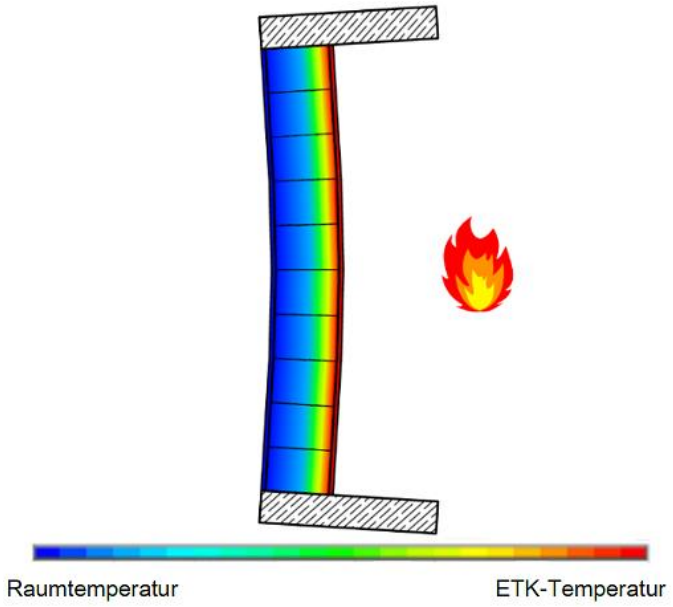


Abb. 5.1: Überproportionale Darstellung der horizontalen Verformungen einer Mauerwerkswand zum Beginn einer Brandbeanspruchung

Die in Abb. 5.1 dargestellte Verformungsfigur resultiert hauptsächlich aus der thermischen Ausdehnung der Ziegel. Durch eine auf die Wand einwirkende Normalkraftbeanspruchung wird das Verformungsverhalten zusätzlich beeinflusst. Wie die Abb. 5.1 zeigt, entstehen keine klaffenden Lagerfugen auf der brandzugewandten Wandseite. Dies liegt höchstwahrscheinlich daran, dass die Mauerwerkswand durch die zentrisch auf den Wandkopf eingeleitete Prüflast vollflächig überdrückt ist. Anhand der ausgewerteten Prüfberichte in Kapitel 3.2 sowie eigenen Versuchsbeobachtungen ist bekannt, dass es im Laufe der Feuerwiderstandsprüfung bei wärmedämmenden Hochlochziegeln zu Schädigungen des Ziegelmaterials oder zu Abplatzungen auf der brandzugewandten Wandseite kommen kann. Diese Abplatzungen werden nicht nur von der Höhe der Prüflast beeinflusst, sondern sind auch von der Steingeometrie sowie ggf. aufgetragenem Putz abhängig. Bei anfänglich auftretenden kleineren Schädigungen oder Abplatzungen kann ein sprungartiger Rückgang der horizontalen Verformungen verzeichnet werden. Dieser steht höchstwahrscheinlich mit einer Lastumlagerung im Zusammenhang. Im weiteren Brandverlauf verformt sich die Wand anschließend wieder weiter in Richtung brandzugewandter Seite. Aus weiteren einseitigen Abplatzungen bzw. dem Festigkeitsverlust aufgrund von beispielsweise entstehenden Rissen bei den brandzugewandten Ziegelstegen resultiert aus der ursprünglich zentrischen Lasteinleitung eine exzentrische bei gleichbleibendem Lasteinleitungspunkt. Ist eine gewisse Dicke von abgeplatzten oder geschädigten Ziegelmaterial überschritten, welches die einwirkende Normalkraft nicht mehr abtragen kann, bzw. sich ein gewisser Grad der Exzentrizität der Prüflast eingestellt hat, kommt es zu einem Richtungswechsel der horizontalen Verformungen. Dieses Phänomen wurde bereits in Kapitel 3.2 erläutert. Wie der Abb. 5.2 zu entnehmen ist, kann daraus ein minimales Aufklaffen der

Lagerfugen auf der Kaltseite und eine Teilflächenbelastung auf der brandzugewandten Wandseite resultieren. Gemäß den Prüfbeobachtungen die in Kapitel 3.3 analysiert wurden, kann es zu Rissbildungen im Putz auf der brandabgewandten Wandseite kommen. Dies deutet auf Zugkräfte aus der sich einstellenden Verformungsfigur hin. Bei Abb. 5.2 handelt es sich ebenfalls zur Verdeutlichung um eine überhöhte Darstellung.

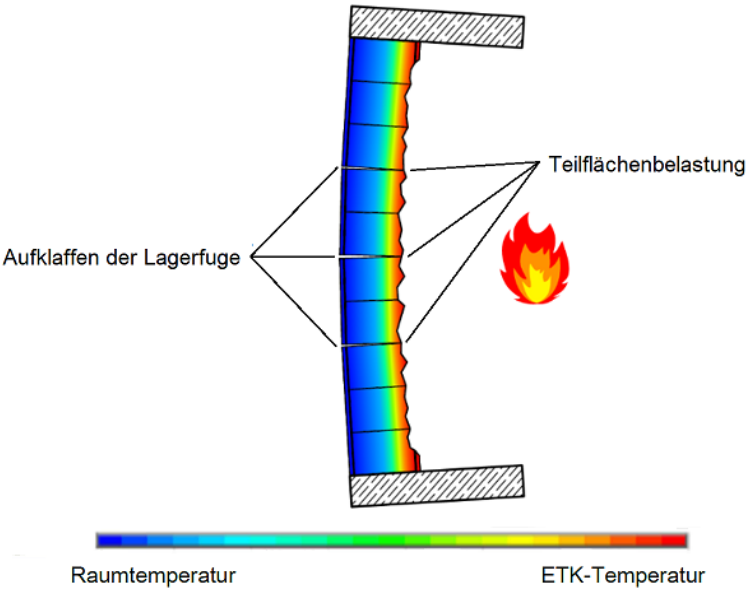


Abb. 5.2: Überproportionale Darstellung der horizontalen Verformungen einer Mauerwerkswand vor einem Stabilitätsversagen (Knicken) bei einer Brandbeanspruchung

Aufgrund der sich einstellenden Verformungsfigur muss es sehr wahrscheinlich zu einem Aufklaffen der Lagerfugen bzw. zu Zugkräften in diesen kommen, da die Wand auf der brandabgewandten Wandseite bei Raumtemperatur gestreckt wird. Darauf deuten auch horizontale Risse im Putz auf der brandabgewandten Wandseite hin, die bei einigen Feuerwiderstandsprüfungen bei fortgeschrittener Prüfdauer beobachtet werden konnten [93].

Bei den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfen im Rahmen der Dissertation (H x L = 3,0 m x 1,0 m), bei welchen es offensichtlich war, dass Ziegelmaterial abgeplatzt ist, kam es immer zu einer Richtungsänderung des ursprünglichen Verformungsverhaltens. Demnach hat sich die Wand infolge der Abplatzungen auf der Brandseite zur unbeflammten Seite hin verformt.

In der Regel kommt es durch die temperatur- und lastbedingte Beeinträchtigung vom Ziegelquerschnitt und/oder Schädigungsgraden zu einem verstärkten Abplatzen der brandzugewandten Ziegelstege des Restquerschnitts. Es folgt ein Stabilitätsversagen (Knicken), bei welchem es zu einer großen klaffenden Lagerfuge meist in der obersten oder der darunter liegenden Ziegelreihe kommt. Dass die Lagerfuge nahe dem Wandkopf aufklafft liegt daran, dass dort von dem höchsten Schädigungsgrad gemäß

Abb. 5.5 ausgegangen werden kann. Im nachfolgenden Verlauf wird zwischen den verschieden geprüften Probekörperabmessungen unterschieden und es folgt eine detaillierte Aufschlüsselung des zuvor beschriebenen horizontalen Bauteilverhaltens.

5.1.2.1 Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und B (H x L = 3,0 m x 1,0 m)

Aufgrund der Temperatureinwirkung dehnt sich das Ziegelmaterial aus und die Wand vergrößert sich. Die horizontale Verformung in Richtung brandzugewandter Wandseite nimmt aufgrund der einseitigen Temperaturbeanspruchung zu. Es konnten folgende Beobachtungen über den gesamten Brandverlauf gemacht werden:

Prüfphase 1) Aufgrund der vertikalen Ausdehnung der Wand resultiert ein Ansteigen der Prüflast. Diese wird während der Feuerwiderstandsprüfung manuell auf die ursprünglich gewählte Prüflast reguliert. Für dünnere Wände erfolgt dies tendenziell in den ersten Prüfminuten schneller als für dickere. Dies liegt an der Trägheit der massigeren Bauteile.

Prüfphase 2) Es erfolgt eine weitere Zunahme der horizontalen und vertikalen Verformungen und es sind vereinzelte Knackgeräusche wahrzunehmen.

Prüfphase 3) In 17 von 20 Fällen kann zwischen der 11. und 24. Prüfminute ein lautes Knackgeräusch wahrgenommen werden. Zeitgleich erfolgt ein schlagartiger Abfall der Prüflast sowie eine sprungartige Veränderung der Verformungen (Stauchung und Verformung zur Kaltseite).

Prüfphase 4) Anschließend dehnt sich die Mauerwerkswand weiter aus und es erfolgt eine erneute horizontale Verformung in Richtung brandzugewandter Seite.

Im nachfolgenden Verlauf wird zwischen Wänden mit einer Dicke ≤ 240 mm und > 240 mm unterschieden.

Wanddicken ≤ 240 mm

In Bezug auf die Feuerwiderstandsprüfungen mit den Wänden mit einer Dicke von ≤ 240 mm konnte festgestellt werden, dass es drei Ausnahmen hinsichtlich der Prüfphase 3) gab. Bei diesen erfolgte der Abfall der Prüflast erst in den folgenden Prüfminuten:

B1-MZ70-190mm-200kN: 36. Prüfminute

B2-MZ70-190mm-200kN: 28. Prüfminute

B8-W07 UV-175mm-82kN: 69. Prüfminute

Die Höhe der schlagartigen Lastreduktion lag zwischen 24 kN und 105 kN mit Ausnahme einer Feuerwiderstandsprüfung (B8-W07 UV-175mm-82kN), bei welcher der Wert nur 8 kN betrug. Dies hängt höchstwahrscheinlich mit der geringen Prüflast von 82 kN zusammen. Bei Berücksichtigung der zuvor genannten Feuerwiderstandsprüfung beträgt der Mittelwert der schlagartigen Lastreduktion 23,8 % von der ursprünglich aufgebrachten Prüflast.

Nur bei der Feuerwiderstandsprüfung B2-MZ70-190mm-200kN kam es zu Abplatzungen von Putz oder Ziegelscherben. Die Abplatzungen vom Putz waren in der Größe

von ca. zwei Ziegeln. Bei allen anderen Feuerwiderstandsprüfungen kam es weder zum Zeitpunkt des Lastabfalls noch bei fortlaufender Versuchsdauer zu Abplatzungen. Es konnten lediglich vereinzelt Risse im Putz festgestellt werden. Dies könnte mit der Wandschlankheit λ zusammenhängen, welche in Kapitel 5.1.3 thematisiert wird. Sind während eines Brandversuches keine Abplatzungen erkennbar, ist es möglich, dass Ziegelmaterial zerbricht, aber der Putz das zerbrochene Ziegelmaterial daran hindert abzufallen. Ein Stabilitätsversagen (Knicken) trat meist schlagartig ohne Vorankündigung während der Prüfphase 4) auf.

Wanddicken > 240 mm

Für Wände mit einer Dicke von > 240 mm gilt, dass es zum Zeitpunkt der Prüfphase 3) zu großflächigeren Putzabplatzungen, meist über mehrere Ziegelreihen über die komplette Wandlänge kam. Nach der Prüfphase 4) konnten nachfolgende Prüfphasen beobachtet werden:

Prüfphase 5) Es folgten weitere Putz- und Ziegelabplatzungen. Je höher der Ausnutzungsfaktor α_{fi} der Wand, desto häufiger treten die Abplatzungen auf.

Prüfphase 6) Sofern kein Stabilitätsversagen (Knicken) auftrat, wiederholten sich die Beobachtungen der Prüfphasen 1) bis 5). Diese waren jedoch weniger stark ausgeprägt.

Prüfphase 7) Ab einem gewissen Zeitpunkt, welcher abhängig von der abgeplatzten Materialstärke ist, verformt sich die Wand zur Kaltseite und wird vertikal gestaucht.

Prüfphase 8) In der Regel ist eine Verformung zur Kaltseite und eine Stauchung der Wand kurz vor dem Stabilitätsversagen (Knicken) festzustellen.

In Bezug auf die erste schlagartige Lastreduktion aus der Prüfphase 3) konnte festgestellt werden, dass diese zwischen 11 und 24 Minuten auftrat und die einwirkende Normalkraft zwischen 6 kN und 25 kN abfiel, also deutlich geringer als bei den Wänden mit einer Dicke von ≤ 240 mm. Daraus ergibt sich ein Mittelwert für die schlagartige Lastreduktion von 6,7 % der ursprünglich aufgebrachten Prüflast. Die nachfolgenden Grafiken für die vertikalen (Abb. 5.3) und horizontalen Verformungen (Abb. 5.4) zeigen ebenso den Verlauf der Prüflast und gelten exemplarisch für die Versuchsreihe mit den Wänden > 240 mm. Die Abbildungen dienen zur Verbildlichung der beschriebenen Prüfphasen 1) bis 8). Bei der Feuerwiderstandsprüfung A8-W07 UV-365mm-280kN erfolgte ein signifikantes Abfallen der Prüflast in Höhe von ~15 kN in der 19. Prüfminute. Die Prüflast in der 40. Prüfminute fiel um ~2 kN. Die vertikalen Verformungen des Probekörpers wurden mit potentiometrischen Wegaufnehmern (TR) jeweils in den Ecken gemäß Abb. 4.13 bestimmt. Die Messung der horizontalen Verformungen mit induktiven Wegaufnehmern (WA) erfolgte in Wandmitte und an den Rändern in halber Wandhöhe.

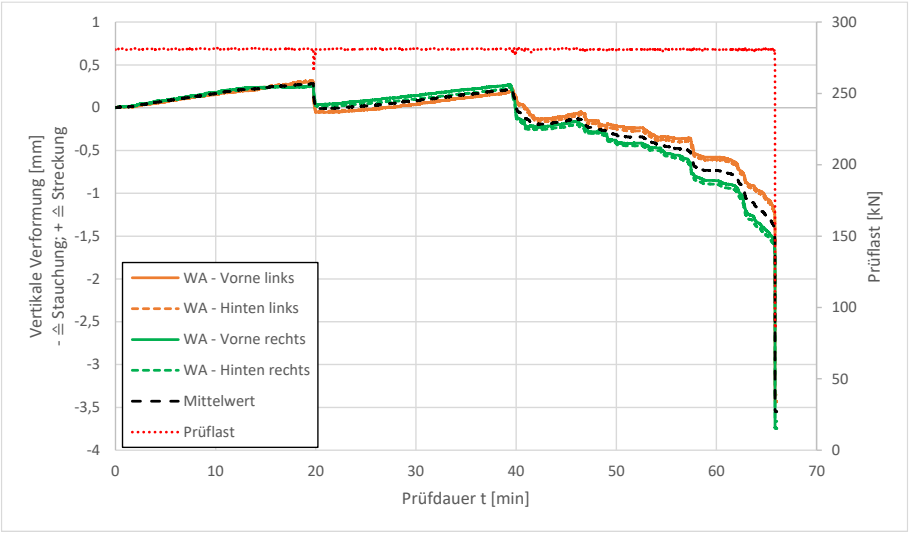


Abb. 5.3: Darstellung der vertikalen Verformungen und Prüflast (A8-W07 UV-365mm-280kN)

Anhand Abb. 5.3 ist erkennbar, dass sich die Wand aufgrund lokaler Ziegelabplatzungen ab der 39. Prüfminute zunehmend mehr schief stellt, da die gemessenen vertikalen Verformungen auseinanderdriften. Wie zuvor bei den vertikalen Verformungen ist auch in Abb. 5.4 für die horizontalen Verformungen wieder die Veränderung der zugehörigen Prüflast aufgeführt. Aufgrund geringer Abweichungen der horizontalen Verformungen über die Wandlänge decken sich die Linien für die einzelnen Messpunkte.

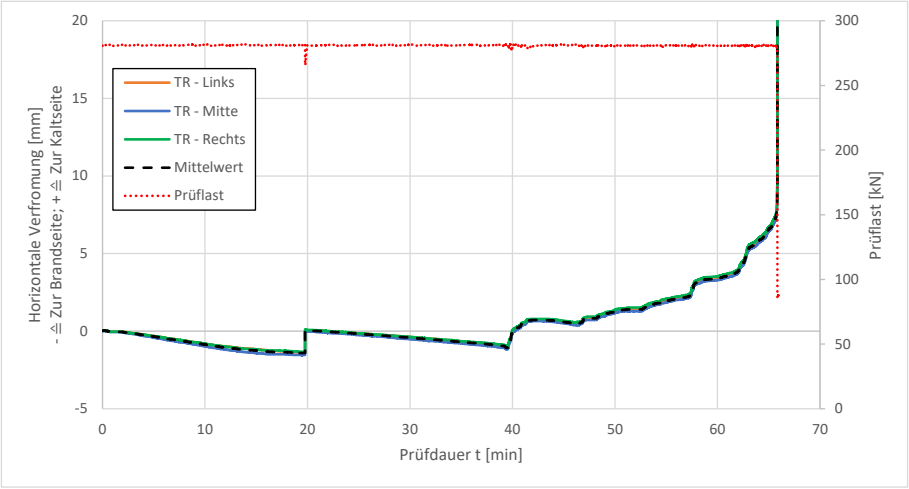


Abb. 5.4: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (A8-W07 UV-365mm-280kN)

Allgemeine Beobachtungen

Anhand der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserien A und B kann festgestellt werden, dass die schlagartige Lastreduktion bei den Wänden mit einer Dicke > 240 mm geringer ausfällt, aber häufiger auftritt als bei dünneren Wanddicken. Die Kombination aus dem Abfallen der Prüflast und dem Knackgeräusch deuten darauf hin, dass tragendes Ziegelmaterial zerbricht und Spannungen umgelagert werden. Mit zunehmender Wanddicke kommt es tendenziell früher zu einem Abfallen der Prüflast. Gleiches gilt für die einhergehende Richtungsänderung der Verformungen. Aufgrund der Geometrie der dünneren Wände haben diese ein geringeres Widerstandsmoment und können sich infolge des Temperaturgradienten freier verformen und geringere Zwangsspannungen resultieren. Bei dickeren Wänden stellen sich vermutlich größere lokale Spannungen ein, woraus häufigere und schlagartigere Lastreduktionen resultieren. Allgemein kam es bei den Wänden mit einer Dicke von ≤ 240 mm bis auf bei der Feuerwiderstandsprüfung B2-MZ70-190mm-200kN, wo es zu einer kleinen lokalen Abplatzung kam, nicht zu Abplatzungen von Putz und Ziegelmaterial. Bei den dickeren Wänden > 240 mm konnte beim ersten Lastabfall immer ein Abplatzen von Putz und ggf. anhaftenden Außenstegen verzeichnet werden. Es konnte wahrgenommen werden, dass mit zunehmender Wanddicke die Lautstärke und die Häufigkeit der Knackgeräusche abnimmt. Durch den größeren Wandquerschnitt können sich vermutlich Spannungen besser umlagern.

Durch die einseitige thermische Ausdehnung der Wand resultieren am oberen Auflager am Wandkopf Spannungen, welche Abb. 5.5 entnommen werden können. Die Abbildung zeigt die Auflagersituation für Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN EN 1365-1 [5]. Trotz der auf das Ziegelmauerwerk aufgemörtelten Lasteinleitungsplatte liegt es nahe, dass vereinzelte Ziegelstege, die dem Brand zugewandt sind, höher belastet werden als andere. Dies haben auch Untersuchungen der University of Ulster mit einer anders ausgebildeten Lasteinleitung gezeigt, welche ebenfalls eine freie Verformung am Wandkopf zugelassen haben [92]. Aufgrund der zunehmenden Erwärmung in Kombination mit der einwirkenden Normalkraft verlieren vereinzelte Ziegelstege an Tragfähigkeit. Infolge von beispielsweise kleineren Rissbildungen resultiert, dass diese der Prüflast nicht mehr standhalten können. Abb. 5.5 dient zur Veranschaulichung des beschriebenen Verhaltens. Aufgrund der Versagensarten, welche in Kapitel 5.1.7 untersucht werden, ist davon auszugehen, dass es zu einem Spalten bzw. zu Abplatzungen oder größeren Rissen in den Ziegeln der obersten oder den beiden obersten Ziegelreihen kommt. Daraus resultiert eine Lastumlagerung, welche zu einer schlagartigen Richtungs- und Verformungsänderung führt. Erfolgt eine horizontale Richtungsänderung der Wand wieder durch ihre Ausgangslage, ohne dass Ziegelmaterial zerbricht, müsste eine vertikale Ausdehnung verzeichnet werden. Die Messdaten zeigen jedoch zu diesem Zeitpunkt eine Stauchung, woraus resultiert, dass Ziegelmaterial zerbricht. Der zeitgleich auftretende Lastabfall und ein Knackgeräusch deuten an, dass Ziegelmaterial geschädigt wird. Das meistens zum Zeitpunkt der Lastumlagerung ein Teil der Putzschicht im oberen Wandbereich zusammen mit losen Ziegelmaterial abfällt, spricht ebenso dafür.

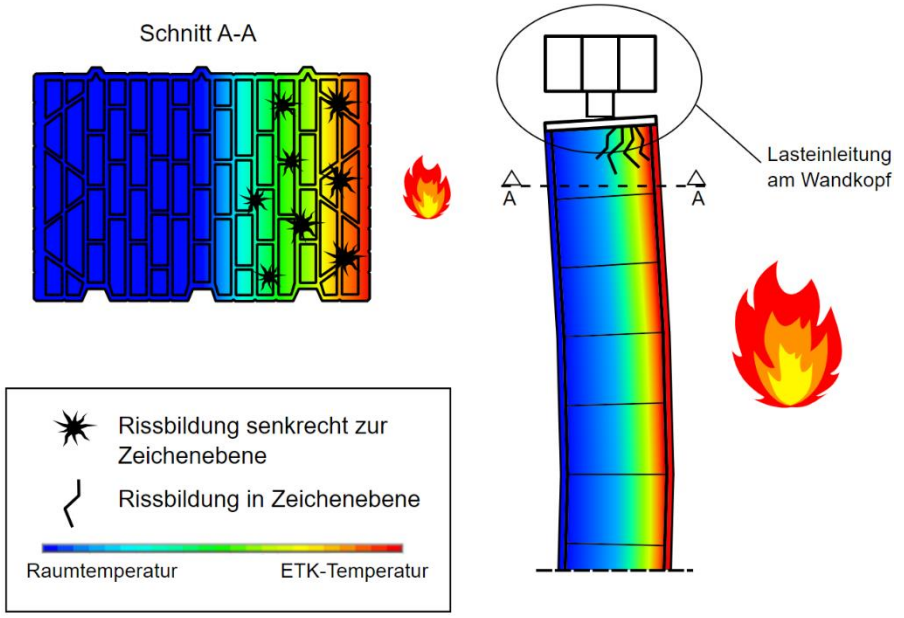


Abb. 5.5: Darstellung der erhöhten Spannungen und resultierender Rissbildung aufgrund auftretender Verformungen

Quarz ist ein wesentlicher Bestandteil von Ziegeln. Das Zerbrechen bzw. Abfallen der Ziegelstege oder dem aufgebrachten Putz steht vermutlich in Zusammenhang mit den in Kapitel 4.3.1 erläuterten temperaturbedingen Ausdehnungen des Materials. In dem Temperaturbereich 450 °C bis 650 °C sorgt die Volumenvergrößerung neben der einwirkenden Prüflast bei einer Feuerwiderstandsprüfung für zusätzliche Spannungen in dem Ziegelmaterial, wodurch bei wärmedämmenden Hochlochziegeln Risse in den dünnen Stegen entstehen können [91]. Gemäß der ETK befinden sich bereits nach knapp über zwei Minuten im Brandraum Temperaturen von > 450 °C. Je nach Putzart und -stärke dringt die Wärme unterschiedlich schnell durch die Putzschicht und trifft auf die dahinterliegenden Ziegelstege, wodurch diese erwärmt werden. Kommt es bei diesen dann zu Rissen aus Spannungen resultierend aus Temperatur in Kombination mit der einwirkenden Normalkraft, sinkt die aufnehmbare Kraft und es kann zu einem Zerbrechen der Ziegelstege und einem Abfallen der Prüflast kommen.

Temperaturmessungen auf der Wandoberfläche unter dem Putz seitlich an den Rändern der Wand in halber Wandhöhe wurden nur bei einer Feuerwiderstandsprüfung (B4-MZ70-490mm-375kN) durchgeführt. Zum Zeitpunkt des Putzabfalls nach 32 Minuten konnten Temperaturen auf halber Wandhöhe auf der linken Wandseite von 647,9 °C und auf der rechten von 458,1 °C gemessen werden. Kurz darauf kam es zu sichtbaren Abplatzungen von Ziegelscherben. Die Temperaturen stehen im Zusammenhang mit dem Quarzsprung, welcher bei ~573 °C eintritt. Bei diesem dehnt sich das Ziegelmaterial in kurzer Zeit sehr schnell aus, wodurch dieses sowie der Haftverbund vom Putz geschädigt werden können. Bei der Feuerwiderstandsprüfung kam es in der 15. Prüfminute zu einem Lastabfall von ~6 kN, wodurch auch ein Riss im Putz

entstanden ist und sich der Putz im weiteren Brandverlauf lokal vorgewölbt hat, bis dieser letztendlich in der 32. Prüfminute abgefallen ist. Der gemessene Mittelwert der Temperaturen an den seitlichen Rändern auf halber Wandhöhe in der 15. Prüfminute beträgt 228 °C und liegt deutlich unterhalb der Temperatur des Quarzsprunges. Die Temperaturen wurden in halber Wandhöhe seitlich unter dem Putz gemessen. An anderen Positionen wie beispielsweise am Wandkopf oder mehr in Wandmitte können höhere Temperaturen vorherrschen. Diesbezüglich wurden bei Feuerwiderstandsprüfungen im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes [96] (siehe Kapitel 6.3) zusätzliche Temperaturmessungen am Wandkopf durchgeführt. Es konnten unterschiedlich hohe Temperaturen an verschiedenen Stellen auf der Wandoberfläche unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite gemessen werden (siehe Anlage J, Abb. J. 10, Abb. J. 20 und Abb. J. 30). Im oberen Wandbereich ist es gemäß den Messdaten tendenziell wärmer als am seitlichen Wandbereich. Ein Einfluss aus kühleren Rändern kann gemäß dem Versuchsaufbau der Abb. 4.13 ausgeschlossen werden. Dass warme Luft nach oben steigt, ist eine mögliche Erklärung. Anhand der gemessenen Temperaturen und Prüfprotokolle ist erkennbar, dass ein Abfall von Putz und Ziegelstegen meist in Verbindung mit dem Quarzsprung steht. Zeitgleich mit dem Zerbrechen einzelner Ziegelstege verformt sich die Wand in horizontaler Richtung wieder in Richtung Ausgangslage bzw. zur Kaltseite, wodurch im Anschluss der gesamte vorhandene Restquerschnitt der Wand belastet wird. Aus diesem Grund fällt bei dickeren Wänden mit dickerem Restquerschnitt die einwirkende Normalkraft nicht so stark ab wie bei dünneren Wänden.

Ob Ziegelmaterial abplatzt oder ob bei Wänden mit einer Dicke ≤ 240 mm die intakte Putzschicht das zerbrochene Ziegelmaterial daran hindert abzuplatzen, ist nicht weiter relevant, da fehlendes oder zerbrochenes Ziegelmaterial keine Kräfte übertragen kann. Es folgt eine Lastumlagerung der einwirkenden Normalkraft auf den intakten Restquerschnitt, woraus eine exzentrische Belastung der Wand bei gleichem Lasteinleitungspunkt resultiert. Daraus ergibt sich eine Änderung in der Verformungsrichtung, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Zu einem späteren Zeitpunkt trat dann gemäß der Prüfphase 8) ein Stabilitätsversagen (Knicken) auf.

5.1.2.2 Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m)

Das beschriebene Bauteilverhalten der 3,0 m hohen Mauerwerkswände während einer Feuerwiderstandsprüfung kann ebenso bei den Feuerwiderstandsprüfungen an den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) beobachtet werden. Allerdings kommt es hier aufgrund einer Servohydraulik im Vergleich zu einer Handpumpe bei der Belastungsvorrichtung nicht zu einem sichtbaren Lastabfall während der Feuerwiderstandsprüfungen, da die Prüflast kontinuierlich nachgeregelt wird. In Bezug auf die vertikalen und horizontalen Verformungen können ähnliche Verhaltensmuster gemäß Abb. 5.3 und Abb. 5.4 wiedergefunden werden. Allerdings in geringeren Maßen aufgrund der “gedrungeneren“ Wände in Analogie zum Kaltfall. In Bezug auf die horizontale Durchbiegung ist ebenfalls, wie bei den Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge, festzustellen, dass die Wand sich im Laufe der Feuerwiderstandsprüfung teils auch schlagartig zur Kaltseite hin verformt. In Bezug auf die vertikalen Verformungen kann festgestellt werden, dass sich die Wand

über die Prüfdauer immer weiter ausdehnt. Es kommt im weiteren Brandverlauf meist sprungartig zu einer messbaren Stauchung, wenn die Wand sich schlagartig horizontal in die andere Richtung verformt. Dies hängt mit auftretenden Schädigungen des Materials zusammen. Gemäß den Prüfprotokollen treten ebenfalls Knackgeräusche auf, häufig in Kombination mit Rissen im Putz oder teilweise sogar Abplatzungen, welche jedoch kleiner sind als bei den Feuerwiderstandsprüfungen an Mauerwerkswänden mit einer Höhe von 3,0 m und einer Wanddicke von 0,365 m. Es ist eine Tendenz erkennbar, dass anfangs beim Brandverlauf ein Knackgeräusch wahrzunehmen ist und sich zeitgleich ein Riss im Putz einstellt. Mit zunehmender Prüfdauer kommt es vermehrt zu weiteren Rissen bzw. werden diese größer. Zu Abplatzungen von Putz- oder gar Ziegelmaterial kommt es meistens erst kurz vor dem Stabilitätsversagen (Knicken) der Mauerwerkswand.

5.1.2.3 Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D (H x L = 3,0 m x 3,0 m)

Bei den Feuerwiderstandsprüfungen der Serie A mit den Prüfkörpern (H x L = 3,0 m x 1,0 m) bei einer Wanddicke von 0,365 m werden nach 11 bis 24 Minuten im Brandverlauf Spannungen durch ein lauteres Knackgeräusch, einen Lastabfall und einer schlagartigen Verformungsänderung abgebaut. Dieses Bauteilverhalten ist nicht bei den beiden 3,0 m langen Prüfkörpern mit einer Dicke von 0,365 m bei den Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D erkennbar. Dies kann an der dreimal größeren Umlagerungsmöglichkeit bei lokalen Fehlstellen in Wandlängsrichtung liegen. Im direkten Vergleich zu den 1,0 m langen Wänden kann bei der geprüften Wand mit einer Länge von 3,0 m (D1-MZ70-365mm-200kN/m) festgestellt werden, dass anfängliche Spannungen, resultierend aus Temperatur und Verformungen, sich nicht schlagartig, sondern langsamer abbauen. Ein Anzeichen hierfür ist unter anderem, dass in den ersten Prüfminuten viele leisere Knackgeräusche anstelle eines lauten erfolgten. Nach 15 Minuten traten diese weniger gehäuft auf. Bei einem Vergleich der horizontalen Verformungen von 3,0 m langen und 1,0 m langen Wänden ist das beschriebene Bauteilverhalten der sich langsam abbauenden Spannungen auch wiederzufinden.

Abb. 5.6 zeigt die horizontalen Verformungen der 3,0 m langen Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m. Im Vergleich zur Abb. 5.4 ist zu erkennen, dass sich während den ersten 15 Minuten keine schlagartigen Verformungsänderungen ergeben. Bei der 3,0 m langen Wand werden keine Veränderungen hinsichtlich der Prüflast und der vertikalen Verformung in der anfänglichen Brandphase verzeichnet. Wie in Abb. 5.6 ersichtlich, tritt dieses Bauteilverhalten, welches weiter oben als Prüfphase 3) definiert wurde, erst in der 119. Prüfminute in Kombination mit Abplatzungen vom Putz auf. Es kommt allgemein zu längeren Feuerwiderstandsdauern, wenn eine Wand länger ohne Schädigungen oder Abplatzungen vom Putz dem Brand ausgesetzt ist.

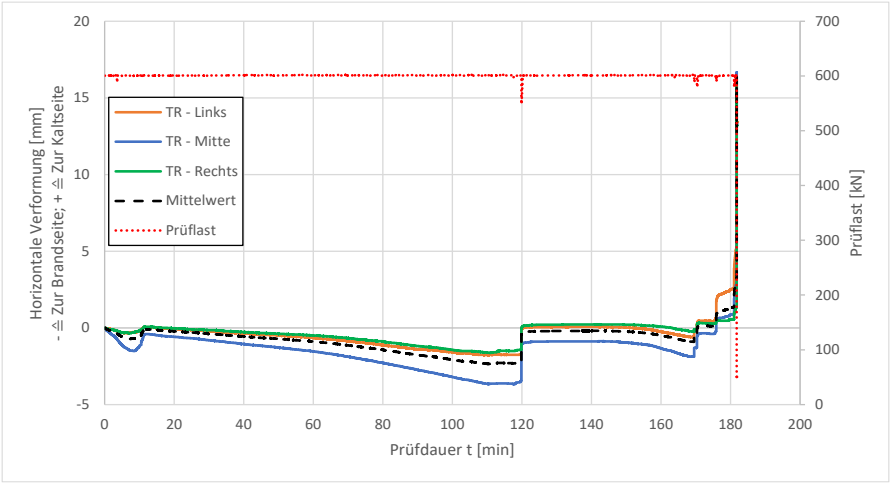


Abb. 5.6: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (D1-MZ70-365mm-200kN/m)

Die gemessenen horizontalen Verformungen in Wandmitte weichen von denen am Rand in halber Wandhöhe gemessenen ab. Dies konnte bei den 1,0 m langen Wänden (siehe exemplarisch Abb. 5.4) nicht festgestellt werden. Aufgrund kühlerer Bauteilränder krümmt sich die 3,0 m lange Wand im Brand horizontal. Bei den 1,0 m langen Wänden lagen keine kühleren Bauteilränder vor. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m wurden die horizontalen Verformungen alle 20 Sekunden mittels eines optischen Messsystems (OM) gemessen [93]. Die Verformungen der Wand fallen gemäß Abb. 5.7 bis zur 133. Prüfminute geringer aus als bei dem Versuch D1-MZ70-365mm-200kN/m gemäß Abb. 5.6. In der 133. Prüfminute war ein horizontaler Riss auf der brandabgewandten Wandseite erkennbar.

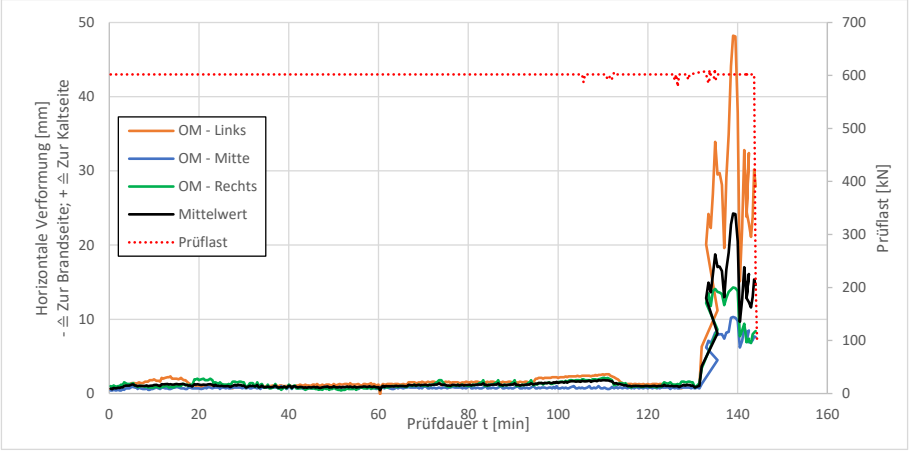


Abb. 5.7: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (D2-MZ70-365mm-200kN/m)

In Abb. 5.7 ist erkennbar, dass sich der Prüfkörper horizontal nur zur Kaltseite verformte. Ob dies aus der Wandpositionierung vor dem Brandofen bzw. aus dem Prüfaufbau resultiert, ist unklar. Die vertikalen Verformungen während der beiden Feuerwiderstandsprüfungen mit einer Bauteillänge von 3,0 m zeigen ein gleiches Verhalten. Die Wand wird um ca. 1,0 mm höher aufgrund der thermischen Beanspruchung, bis es aufgrund von Schädigungen und dem daraus resultierenden Bauteilverhalten zu einem Rückgang der gemessenen Ausdehnung kommt. Kurz vor dem Stabilitätsversagen (Knicken) der Wand kann eine geringe Stauchung (< 1,0 mm) gemessen werden. Abb. 5.8 zeigt exemplarisch für beide Versuche das Verformungsverhalten.

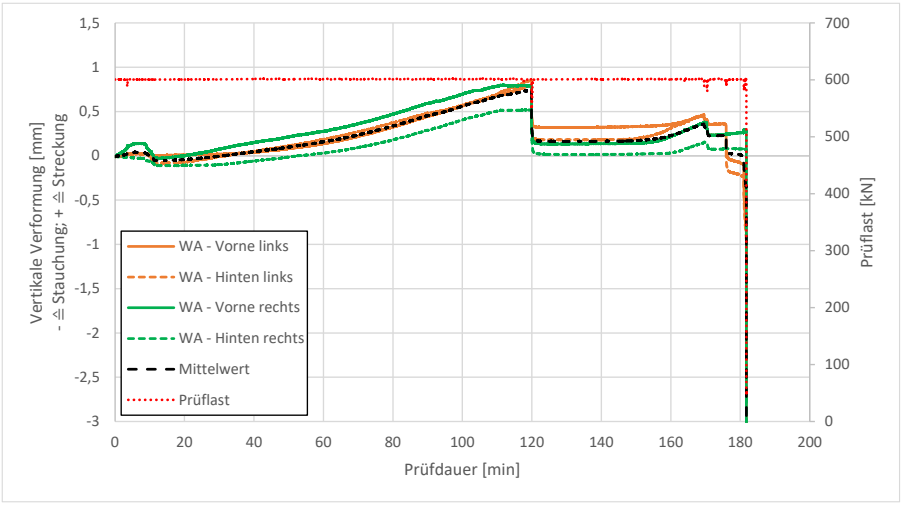


Abb. 5.8: Darstellung der vertikalen Verformungen und Prüflast (D1-MZ70-365mm-200kN/m)

Während in diesem Kapitel nur die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen mit 3,0 m langen Mauerwerkswänden gegenübergestellt wurden, erfolgt in Kapitel 5.1.5 auch eine Auswertung des Bauteilverhaltens der 3,0 m langen Mauerwerkswände aus Kapitel 3, die in Tab. 3.1aufgeführt sind.

5.1.3 Einfluss der Wandschlankheit

Die Wandschlankheit λ einer Mauerwerkswand bestimmt sich aus der effektiven Wandhöhe geteilt durch die effektive Wanddicke. Je höher bzw. dünner eine Wand, desto größer ist die Schlankheit. Allgemein hat die Schlankheit in Abhängigkeit von der Lagerung bei einem auf Normalkraft belasteten Bauteil einen maßgebenden Einfluss auf dessen Stabilität und Tragfähigkeit. Bei einem Bauteil das zunehmend auf Druck beansprucht wird, resultiert in Abhängigkeit der Schlankheit ein Stabilitäts- (Knicken) oder Querschnittsversagen (Überschreitung der zulässigen Materialspannungen). Bei Überschreitung eines gewissen Grades der Schlankheit sorgen die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit EI des Bauteils und der einwirkenden Kraft für ein großes Zusatzmoment und das Bauteil knickt vor dem Erreichen der Bruchschnittgrößen. Wird eine normalkraftbelastete Wand einer einseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt, entsteht durch die Temperatureinwirkung eine

zusätzliche Verformung nach Theorie I. Ordnung. Begründet wird dies mit der Ausdehnung des Ziegelmaterials bei einer Erwärmung gemäß Abb. 4.8 und Abb. 4.9. Des Weiteren kommt es in Abhängigkeit von der Dauer und einwirkenden Normalkraft bei einer Brandbeanspruchung zu einer Reduzierung der effektiven Wanddicke aufgrund von Abplatzungen oder einem Festigkeitsverlust des Ziegelmaterials.

In Bezug auf die Wanddicke wurden insgesamt fünf verschiedene Wanddicken mit den Nennmaßen von 0,175 m; 0,190 m; 0,240 m; 0,365 m und 0,490 m an jeweils 1,0 m langen und 3,0 m hohen Wänden untersucht. Rechnerisch ergeben sich aus diesen Angaben gemäß Gleichung (2.9) folgende Wandschlankheiten λ:

Wanddicke 0,175 m $\rightarrow \lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}175 = 12{,}86$ (5.1)

Wanddicke 0,190 m $\rightarrow \lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}190 = 11{,}84$ (5.2)

Wanddicke 0,240 m $\rightarrow \lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}240 = 9{,}38$ (5.3)

Wanddicke 0,365 m $\rightarrow \lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}365 = 6{,}16$ (5.4)

Wanddicke 0,490 m $\rightarrow \lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}490 = 4{,}59$ (5.5)

Um die Schlankheit gezielt zu untersuchen, wurden Wände aus gleichen Ziegeln in unterschiedlicher Höhe oder Dicke hergestellt. Einige Mauerwerkswände wurden mit derselben einwirkenden zentrischen Normalkraft bzw. dem gleichen rechnerischen Ausnutzungsfaktor α_{fi} einer Feuerwiderstandsprüfungen unterzogen. Abb. 5.9 zeigt den Mittelwert der vertikalen Verformung für die Feuerwiderstandsprüfungen A9-W07 UV-365mm-200kN (σ = 0,57 N/mm²) und B8-W07 UV-175mm-82kN (σ = 0,48 N/mm²), welcher sich aus Messungen in den Eckpunkten auf der Wandoberseite berechnet. Die 175 mm dicke Wand wurde aus zerteilten 365 mm dicken Ziegeln hergestellt. Bis auf die geringere Dicke eines Außensteges weisen die Wände gleiche Eigenschaften auf. Aus den unterschiedlichen Wanddicken und der gewählten Prüflast resultiert ein gleicher Ausnutzungsfaktor $\alpha_{fi} = 0{,}35$.

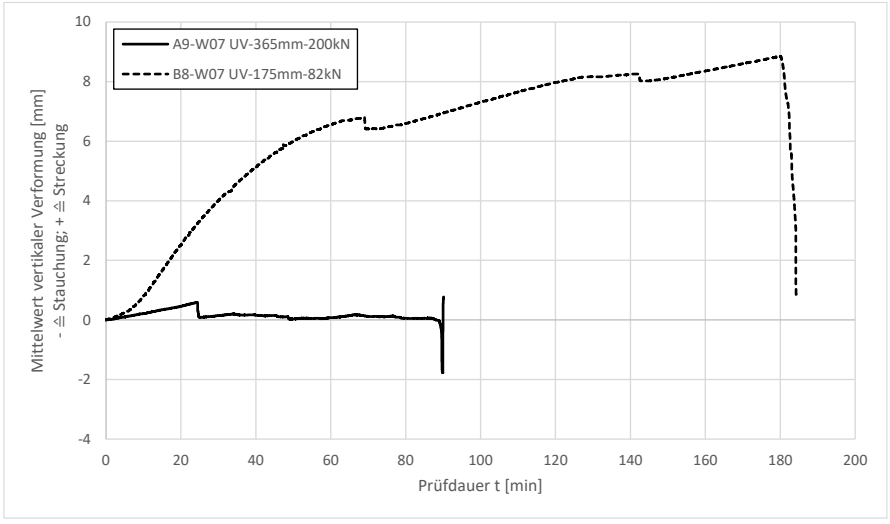


Abb. 5.9: Darstellung des Mittelwerts der vertikalen Verformung unterschiedlich dicker Wände bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi}

Die Mittelwerte der horizontalen Verformung für die Feuerwiderstandsprüfungen wurden aus drei Messungen berechnet. Diese erfolgten gemäß Abb. 4.13 in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe. Abb. 5.10 zeigt die Mittelwerte der horizontalen Verformung für die Feuerwiderstandsprüfungen A9-W07 UV-365mm-200kN und B8-W07 UV-175mm-82kN.

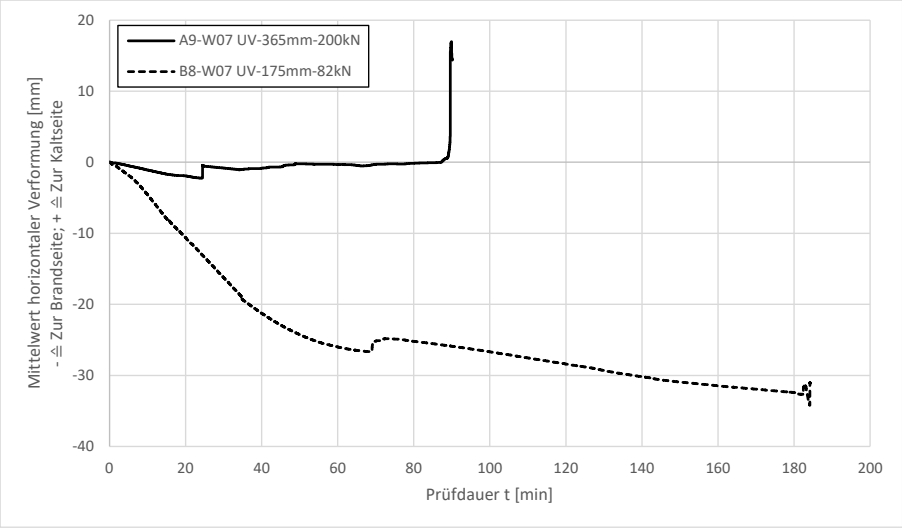


Abb. 5.10: Darstellung des Mittelwerts der horizontalen Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe unterschiedlich dicker Wände bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi}

Es folgt eine gemeinsame Auswertung in Bezug auf die vertikalen und horizontalen Verformungen. Wie die Diagramme der Abb. 5.9 und Abb. 5.10 zeigen, weist die 2,1-fach dünnere Wand mit 0,175 m in der Dicke wesentlich höhere vertikale und horizontale Verformungen bei einer geringeren mechanischen Spannung σ auf. Ebenfalls ist in den Diagrammen zu erkennen, dass die dünnere Wand der Feuerwiderstandsprüfung B8-W07 UV-175mm-82kN, welche mit einer 2,4-fach geringeren Normalkraft (82 kN) belastet ist, erst wesentlich später einen vertikalen Sprung in den Verformungen aufzeigt. In Bezug auf die Versagenszeitpunkte ist zu erkennen, dass diese recht unterschiedlich ausfallen, obwohl der Ausnutzungsfaktor α_{fi} identisch ist. Des Weiteren wurden die Feuerwiderstandsprüfungen A5-W07 V-365mm-375kN (σ = 1,06 N/mm^2) und B6-W07 V-175mm-154kN (σ = 0,90 N/mm^2) mit einem nahezu gleichen Ausnutzungsfaktor α_{fi} durchgeführt. Bei einem Vergleich dieser Versuche ist bei der dickeren Wand, wenn auch geringfügig, ein früheres Stabilitätsversagen (Knicken) erkennbar. Die Messwerte der Versuche bestätigen, dass bei dünneren Wänden größere vertikale und horizontale Verformungen bei einer Feuerwiderstandsprüfung entstehen.

Es wurden 1,0 m lange Wände aus den gleichen Ziegeln mit unterschiedlichen Dicken mit einer identischen Normalkraftbeanspruchung von 200 kN geprüft. Tab. 5.3 enthält diesbezüglich weitere Versuchsinformationen.

Tab. 5.3: Mauerwerkswände gleicher Normalkraftbeanspruchung

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wand-dicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	σ [N/mm²]	α_{fi} [-]	Feuerwider-standsdauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]
MZ70 (2,7)	364	650	200	0,55	0,31	105	A3-MZ70-365mm-200kN
MZ70 (2,7)	190	293	200	1,04	0,68	129	B1-MZ70-190mm-200kN
MZ70 (2,7)	190	293	200	1,04	0,68	86	B2-MZ70-190mm-200kN

Abb. 5.11 sind die Mittelwerte der vertikalen Verformungen der drei Versuche mit dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 zu entnehmen. Die 190 mm dicken Wände bestehen aus zerteilten 365 mm dicken Ziegel und weisen somit identische Eigenschaften auf.

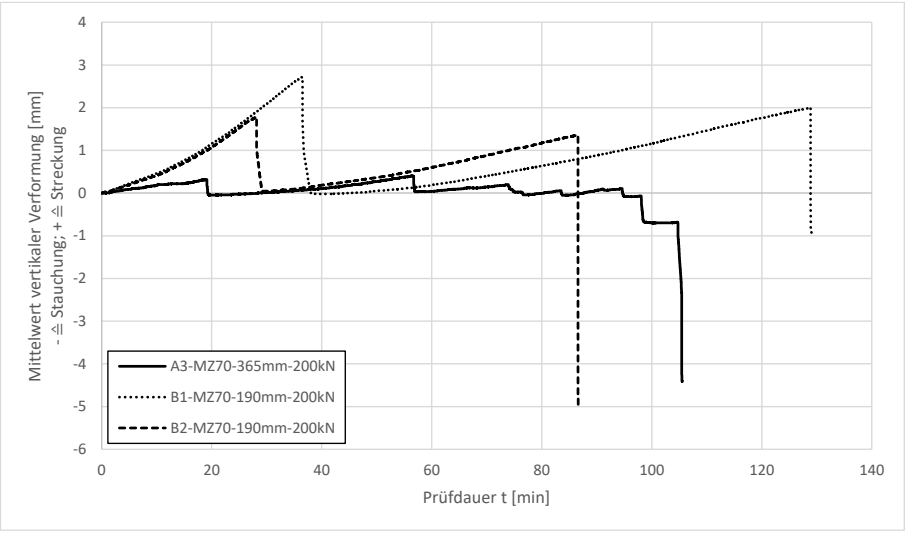


Abb. 5.11: Darstellung des Mittelwerts der vertikalen Verformung unterschiedlich dicker Wände bei gleicher Normalkraftbeanspruchung

Es folgen in Abb. 5.12 die Mittelwerte der horizontalen Verformungen in Wandmitte der drei Feuerwiderstandsprüfungen mit dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 (B1-MZ70-190mm-200kN, B2-MZ70-190mm-200kN und A3-MZ70-365mm-200kN).

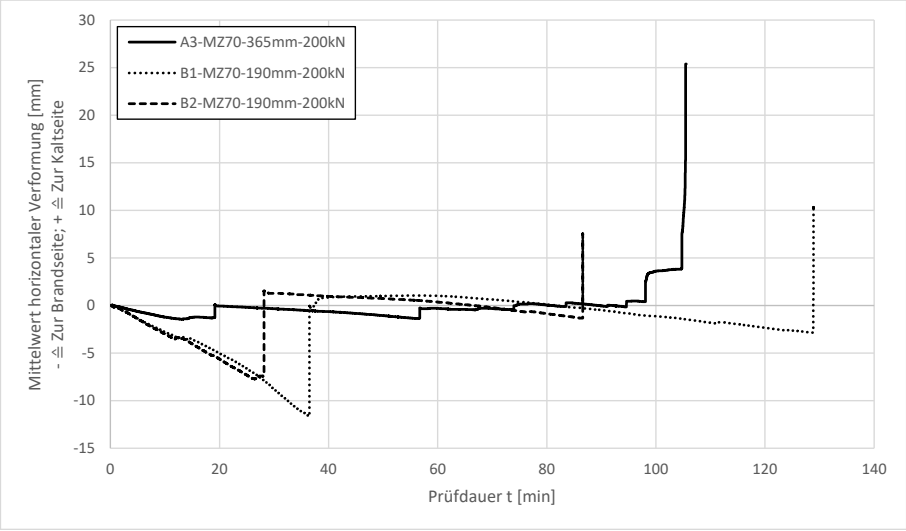


Abb. 5.12: Darstellung des Mittelwerts der horizontalen Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe unterschiedlich dicker Wände bei gleicher Normalkraftbeanspruchung

Aus Abb. 5.11 und Abb. 5.12 wird ersichtlich, dass die Messwerte für die Verformungen bei den beiden Feuerwiderstandsprüfungen mit einer Wanddicke von 0,190 m nahezu identisch verlaufen, bis es zu einem Sprung bei den gemessenen Verformungen kommt. Diese stehen im Zusammenhang mit einem Knackgeräusch und einem Abfallen der Prüflast. Die Gründe hierfür sind dem Kapitel 5.1.2 zu entnehmen. Wie aus dem Kaltfall übertragen werden kann, ist in der Abb. 5.11 und Abb. 5.12 wie auch zuvor bei Abb. 5.9 und Abb. 5.10 erkennbar, dass schlankere Wände größere Verformungen aufweisen. In Bezug auf die vertikalen Verformungen ist der Einfluss der Wandschlankheit λ nicht so ausgeprägt wie bei den horizontalen Verformungen. Dies kann mit dem Kaltfall begründet werden. In Bezug auf die vertikalen Verformungen wird die Dicke bei der Dehnsteifigkeit (Elastizitätsmodul multipliziert mit der Fläche) berücksichtigt. Bei horizontalen Verformungen wird bei der Berechnung der Biegesteifigkeit (Elastizitätsmodul multipliziert mit dem Flächenträgheitsmoment) die Dicke mit dem Exponenten drei verrechnet und durch zwölf geteilt. Verstärkt werden die Verformungen dadurch, dass sich dünnere Wände bezogen auf ihren Gesamtquerschnitt schneller und stärker bei einer einseitigen Brandbeanspruchung erwärmen und ausdehnen.

Neben den größeren vertikalen und horizontalen Verformungen weisen die dünneren (≤ 240 mm) und somit bei gleicher Wandhöhe schlankeren Wände im Brandfall keine Putzabplatzungen auf, während dickere Wände frühzeitig ein solches Verhalten aufzeigen. Begründet werden kann dies mit kleineren Zwangs- bzw. Eigenspannungen aufgrund der geringeren Wanddicke, da sich die dünneren Wände eher ohne Zwang

über ihre Dicke aufgrund ihrer geringeren Trägheit verformen können. Dies kann auch durch geringere Knackgeräusche in der anfänglichen Brandphase bestätigt werden.

Durch eine einseitige Brandbeanspruchung wird nur eine Seite vom Ziegelquerschnitt erwärmt, woraus eine Ausdehnung von dieser resultiert. Der hintere kalte Teil der Mauerwerkswand wirkt stabilisierend und wirkt somit den Verformungen entgegen. Je dicker dieser ist, desto weniger Gesamtverformungen der Mauerwerkswand und desto mehr Spannungen resultieren. Aufgrund der geringeren anwachsenden Spannungen stellen sich vereinzelt spätere Zeitpunkte für den Lastabfall sowie die schlagartige Richtungs- und Verformungsänderung ein. Dies hat zur Folge, dass diese dann zu dem späteren Zeitpunkt größer ausfallen. Da es jedoch aufgrund der geringeren Steifigkeit der dünnen Mauerwerkswände (≤ 240 mm) bei der Richtungs- und Verformungsänderung nicht zu sichtbaren Abplatzungen von Putz oder Ziegelmaterial kommt, weisen diese Wände bei einem Vergleich der Ausnutzungsfaktoren teilweise vereinzelt längere Feuerwiderstandsdauern auf, wie Abb. 5.13 zu entnehmen ist. Ebenso konnte festgestellt werden, dass sich die auf die Stahlplatte aufgemörtelten Mauerwerkswände mit einer Dicke ≤ 240 mm teilweise aufgrund der horizontalen Verformungen am Fußpunkt der brandabgewandten Wandseite leicht von der Stahlplatte ablösten. Daraus resultieren geringere Spannungen in der Wand. Wände einer Dicke ≤ 240 mm können sich demnach freier bei den Einspannungen am Wandkopf und -fuß verformen, während sich die dickeren Wände ≥ 365 mm mehr bei den Einspannungen verkeilen.

In Abb. 5.13 sind alle Ergebnisse der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und B dargestellt. Die Mauerwerkswände (H x L = 3,0 m x 1,0 m) wiesen unterschiedliche Wanddicken auf. Alle Wände mit einer Dicke ≤ 240 mm sind in Abb. 5.13 als grüne Datenpunkte dargestellt, während die roten Datenpunkte Wanddicken ≥ 365 mm symbolisieren. Ebenfalls in dem Diagramm abgebildet sind die Regressionsgeraden, wodurch die Veränderung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} über die Feuerwiderstandsdauer visualisiert wird.

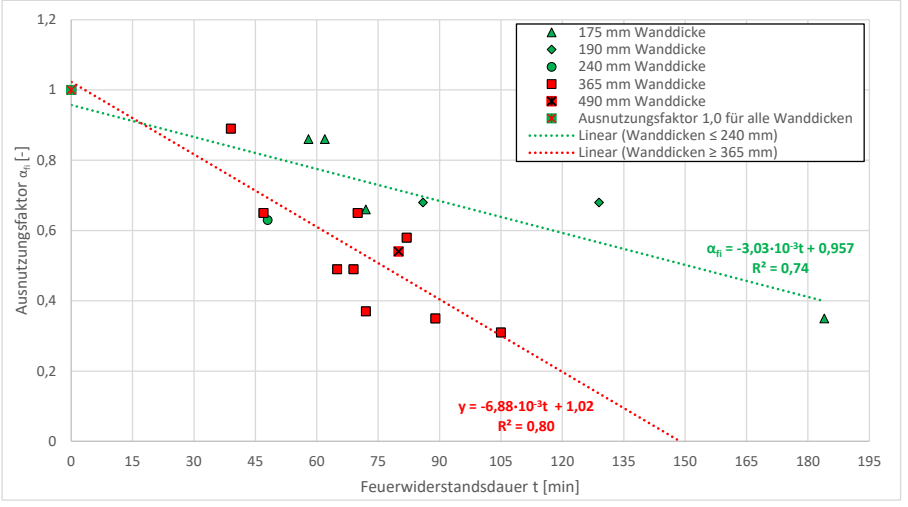


Abb. 5.13: Gegenüberstellung der Ausnutzungsfaktoren α_{fi} und Feuerwiderstandsdauern unterschiedlich dicker Mauerwerkswände

Wie Abb. 5.13 zu entnehmen ist, liegen mit dem Datenpunkt bei α_{fi} = 1,0 auf der vertikalen Diagrammachse in Summe elf Datenpunkte für Mauerwerkswände mit einer Dicke von ≥ 365 mm vor. In Bezug auf die dünneren Wände liegen für die einzelnen Wanddicken deutlich weniger Prüfergebnisse vor. Anhand der Regressionsgeraden in Abb. 5.13 ist erkennbar, dass die Wände mit einer Dicke ≤ 240 mm im Vergleich zu den Wänden mit einer Dicke von ≥ 365 mm bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} ab der 18. Prüfminute mit zunehmender Prüfdauer immer längere Feuerwiderstandsdauern aufweisen. Dies wird durch den Abstand der Regressionsgeraden zueinander bei zunehmender Feuerwiderstandsdauer verbildlicht. In Bezug auf den Ausnutzungsfaktor α_{fi} = 0,63 bis α_{fi} = 0,68 liegen für die Wanddicken 190 mm und 240 mm Feuerwiderstandsdauern von 48 bis 129 Minuten für den gleichen Ziegeltypen (Großkammerziegel ThermoPlan MZ70) vor. Bei ähnlichen Differenzen zwischen den Ausnutzungsfaktoren α_{fi} können für die Wände mit einer Dicke ≥ 365 mm wesentlich geringere Abweichungen in Bezug auf die Feuerwiderstandsdauer festgestellt werden. Daraus lässt sich in Abhängigkeit von der Wandschlankheit λ eine größere Streuung der resultierenden Feuerwiderstandsdauern für die Wände mit einer Dicke ≤ 240 mm im Vergleich zu Wanddicken ≥ 365 mm ableiten. Dies kann mit dem größeren Einfluss von lokalen Fehlstellen begründet werden.

Aufgrund der analysierten Daten kann nicht pauschalisiert werden, dass dünnere Wände bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} zu längeren Feuerwiderstandsdauern tendieren. Anhand des Prüfberichts (2100/457/15)-Wein [97], kann in Tab. 3.1 erkannt werden, dass bei Feuerwiderstandsprüfungen dünnere Wände nicht zwangsläufig einen besseren Feuerwiderstand aufweisen. Aufgrund der geringen Versuchsanzahl erfolgt keine differenzierte Betrachtung der unterschiedlich dicken Wände der Versuchsserie A und B in Bezug auf die Auswertung im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift. Dadurch entsteht eine größere Datenmenge und bzgl. der längeren Feuerwiderstandsdauern bei gleichem Ausnutzungsfaktors α_{fi} für die dünneren Wänden, welches mit den größeren Streuungen zusammenhängen kann, erfolgt eine Berücksichtigung auf der sicheren Seite.

Untersuchungen der Schlankheit in Bezug auf die Wandhöhe können mithilfe der Kleinprüfkörper mit den Abmessungen H x L = 1,5 m x 1,0 m (1,25 m beflammte Höhe) und einer Dicke von 0,365 m erfolgen. Die Wände weisen genau die halbe Wandhöhe wie die 3,0 m hohen Wände auf. Die Schlankheit der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit einer Wanddicke von 0,365 m kann wie folgt gemäß Gleichung (2.9) berechnet werden:

$$\text{Wanddicke } 0{,}365 \text{ m} \rightarrow \lambda = h_{ef} \,/\, t_{ef} = 1{,}13 \,/\, 0{,}365 = 3{,}08 \qquad (5.6)$$

Bei einem Vergleich der Verformungen und der Feuerwiderstandsdauern ist erkennbar, dass die Mauerwerkswände (H x L = 3,0 m x 1,0 m; $\lambda = 6{,}16$) mit einer Dicke von 0,365 m der Versuchsserie A, im Vergleich zu den halb so hohen identischen Wänden ($\lambda = 3{,}08$) der Versuchsserie C tendenziell höhere Verformungen und kürzere Feuerwiderstandsdauern bei identischer Normalkraftbeanspruchung aufweisen. Dies hängt mit der geringen Schlankheit und der "gedrungenen" Bauteilform der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) zusammen. Die gemessenen vertikalen Verformungen sind geringer als die horizontalen Verformungen. Aufgrund streuender Messwerte über die Feuerwiderstandsdauer kann kein genauer Faktor definiert werden.

In Abb. 5.13 verläuft die grüne Regressionsgrade nach 15 Minuten oberhalb von der roten Regressionsgraden. Demnach wird bei der Berechnung der Ausnutzungsfaktoren α_{fi} die Wanddicke bei 3,0 m hohen Wänden und somit die daraus resultierende Schlankheit überdurchschnittlich berücksichtigt. Begründet wird die Berücksichtigung damit, dass die schlankeren Wände (≤ 240 mm) im Vergleich zu den Wänden mit einer Dicke von ≥ 365 mm nicht zu kürzeren Feuerwiderstandsdauern bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} neigen. Eine optimale Berücksichtigung der Schlankheit würde erfolgen, sofern die Regressionsgeraden der gleichen mathematischen Funktion zu Grunde liegen.

In Bezug auf den Ausnutzungsfaktor α_{fi} weisen die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) bei einer Halbierung der Schlankheit bei gleicher Wanddicke längere Feuerwiderstandsdauern bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} im Vergleich zu den Versuchen der Serie A auf.

5.1.4 Temperaturmessungen

Bei allen durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen wurden Thermoelemente vom Typ K im Bauteilinneren (ausgenommen die Feuerwiderstandsprüfung B4-MZ70-490mm-375kN) und auf der Oberfläche der Kaltseite befestigt. Die Anordnung der Thermoelemente kann Anlage A entnommen werden. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel können bei einer Wanddicke von 365 mm weniger als 5 °C Erwärmung auf der brandabgewandten Wandseite im Mittel für die Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und D festgestellt werden. Gleiches kann für die Versuche der Serie C mit den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) festgestellt werden. In Bezug auf die Versuchsserie B konnte bei einer Wanddicke von 175 mm nach 180 Minuten ohne Schädigungen am Bauteil eine Erhöhung der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite im Mittel von maximal 49 °C gemessen werden (B8-W07 UV-175mm-82kN).

Bei den 175 mm dicken Prüfkörpern kam es zu keinen sichtbaren Querschnittsschwächungen während der Feuerwiderstandsprüfungen, sodass hier bei einem Vergleich vom Ziegeltyp 2 und 3 festgestellt werden konnte, dass die mit Dämmstoff verfüllten kleingelochten Ziegel eine bessere Wärmedämmung aufweisen. Je länger die Brandbeanspruchung andauert, desto höher fällt die Temperaturdifferenz zwischen den verfüllten und unverfüllten Ziegeln aus. Begründet wird dies mit in den Ziegelkammern vorhandener Dämmwolle, deren Wärmeleitfähigkeit geringer ist als eingeschlossene Luft. Die Temperaturmessungen der auf den verschiedenen Längsstegen befindlichen Thermoelemente bestätigen dies ebenfalls.

In Bezug auf die im Bauteil gemessenen Temperaturen gemäß Anlage A ist festzustellen, dass es zu einem sprunghaften Anstieg kommt, sobald Abplatzungen bei einem Thermoelement auftreten. Eine Korrelation zwischen der gemessenen Temperatur in der Mitte der Längsstege und den Abplatzungen ist nicht feststellbar, da nur punktuell Temperaturen mittig in halber Wandhöhe über die Wanddicke gemessen wurden und es teilweise an anderen Stellen zu Abplatzungen kam.

Abb. 5.14 zeigt gemessene Temperaturen in der Stegmitte des Außenlängssteges in der Wandmitte der brandzugewandten Wandseite während der Feuerwiderstandsprüfungen bis zu dem Zeitpunkt, an welchem ein Lastabfall verzeichnet werden konnte.

Für eine übersichtlichere Darstellung aller Versuchsergebnisse erfolgt eine Darstellung bis zur 37. Prüfminute, bis zu welcher nur für die Wände mit den Abmessungen von 3,0 m in Länge kein Lastabfall erfolgte.

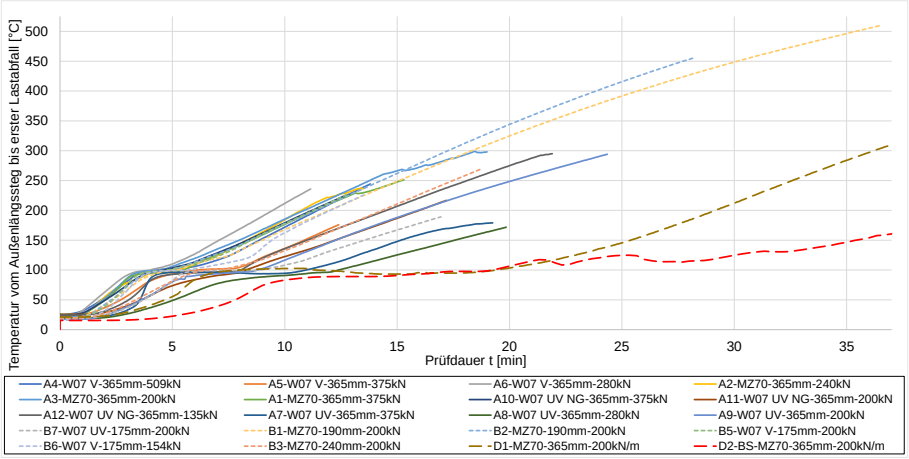


Abb. 5.14: Temperaturmessungen in der Mitte des Außensteges der brandzugewandten Wandseite bis zum ersten Lastabfall

Gemäß Abb. 5.14 wurden bei einem Lastabfall Temperaturen zwischen ~175 °C und ~500 °C gemessen. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m mit den Wandabmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge konnte erst in der 119. Prüfminute bei einer gemessenen Temperatur von 673,6 °C für den Außenlängssteg ein schlagartiges Abfallen der Prüflast festgestellt werden. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m wurde aufgrund einer Servohydraulik direkt nachgesteuert, sofern es zu Veränderungen bei der Prüflast kam. Aus diesem Grund sind für diese Feuerwiderstandsprüfung keine Schwankungen bei der aufgebrachten Normalkraft zu erkennen.

Im Brandfall wird das im Ziegel sowie im Putz gebundene Wasser bei ca. 100 °C ausgetrieben. Aus der Verdunstungskälte resultiert eine Kühlung der Mauerwerkswand. Das gebundene Wasser setzt sich aus der Restfeuchte des Materials und des kristallin gebundenen Wassers im Putz und im Ziegel zusammen. Der beschriebene Kühlungsprozess ist durch ein gleichbleibendes Plateau bei 100 °C gekennzeichnet. Wie in Abb. 5.14 erkennbar, weisen die geprüften Wände mit einer Länge von 1,0 m deutlich kürzere Temperaturplateaus bei 100 °C im Vergleich zu den beiden 3,0 m langen Wänden (Feuerwiderstandsprüfungen D1-MZ70-365mm-200kN/m und D2-MZ70-365mm-200kN/m) bestehend aus dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 auf. Für den kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO kann den Prüfberichten (3376/813/11) -TM [47] und (3752/833/14)-TM [46] entnommen werden, dass die dort geprüften 3,0 m langen Wände ein vergleichbar ausgeprägtes Temperaturplateau bei 100 °C aufweisen. Somit kann ein Einfluss aus den unterschiedlichen Ziegeltypen auf die Ausbildung des Temperaturplateaus ausgeschlossen werden. Ein Vergleich

mit den in Kapitel 3 analysierten Prüfberichten mit unterschiedlichsten wärmedämmenden Hochlochziegeln zeigt, dass es bei den dort aufgeführten Temperaturmessungen der 3,0 m langen Wänden zu ähnlich langen Temperaturplateaus bei 100 °C kommt.

5.1.5 Einfluss der Prüfkörperlänge

Wieso eine 3,0 m lange Wand tendenziell zu längeren Feuerwiderstandsdauern neigt als 1,0 m lange Wände, wurden in Kapitel 5.1.2.3 erläutert. In Bezug auf die schlagartigen Änderungen bei den Verformungsrichtungen zeigt eine Auswertung der Prüfberichte aus Kapitel 3 für die 3,0 m langen Wände, dass diese dort frühstens ab der 20. Prüfminute auftreten. Für die 1,0 m langen Wände erfolgte die schlagartige Richtungsänderung der Verformung zwischen der 11. und 24. Prüfminute. Nur bei einem Drittel der untersuchten Prüfberichte konnte eine schlagartige Richtungsänderung der horizontalen Verformung identifiziert werden. In Bezug auf den Lastabfall und die vertikalen Verformungen lagen teilweise keine Informationen vor bzw. konnte beides nicht immer identifiziert werden. Bei den anderen Feuerwiderstandsprüfungen erfolgte die Richtungsänderung schleichend bzw. war nur eine Zunahme der Verformungen über die Prüfdauer erkennbar. Ein Zusammenhang mit dem Grad der Ausnutzung, der Wanddicke oder dem Ziegeltyp besteht nicht.

Eine weitere Erklärung für den späteren Lastabfall bzw. der schlagartigen Änderungen der Verformungen könnte das Temperaturplateau bei 100 °C gemäß Kapitel 5.1.4 neben der dreimal größeren Umlagerungsmöglichkeiten in Wandlängsrichtung sein. Dieses ist bei den 3,0 m langen Prüfkörpern deutlich ausgeprägter. Durch den ausdringenden Wasserdampf resultiert, dass die Probekörper mehr gekühlt werden. Ob die Feuchtigkeit zu den Rändern der Mauerwerkswand diffundiert und somit längere Probekörper stärker gekühlt werden, konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht herausgefunden werden. In der Regel diffundiert die Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf immer zu einem wärmeren Ort, demnach also Richtung Brandraum.

Es liegt ein Einfluss von kühleren Bauteilrändern bei 3,0 m langen Wänden aus dem Prüfaufbau vor, woraus längere Feuerwiderstandsdauern resultieren können. Während die Seitenflächen der 1,0 m langen Wände an benachbarte Wände angrenzen, welche ebenfalls frontal mit der ETK beaufschlagt werden, sind die Seitenflächen der 3,0 m langen Wände der Raumtemperatur ausgesetzt. Dies ist dem Prüfaufbau geschuldet, welcher in Abb. 4.13 dargestellt ist.

In Bezug auf die Verformungen während der 15-minütigen Vorbelastung zeigt die 3,0 m lange Mauerwerkswand des Versuchs D1-MZ70-365mm-200kN/m im Mittel ungefähr halb so große Verformungen in vertikaler und horizontaler Richtung wie die gleiche 1,0 m lange Wand (A3-MZ70-365mm-200kN). Anhand der Feuerwiderstandsprüfungen D1-MZ70-365mm-200kN/m und D2-MZ70-365mm-200kN/m sowie der ausgewerteten Prüfberichte (Tab. 3.1) kann kein eindeutiges Muster erkannt werden, dass sich die aus Temperatur und Prüflast einstellenden Spannungen zu Beginn der Feuerwiderstandsprüfung bei 3,0 m langen Mauerwerkswänden umlagern, ohne dass dabei der Prüfkörper beschädigt wird. Es kann Aufgrund der unterschiedlichen Verläufe der Verformungen nicht festgestellt werden, ob 3,0 m lange Wände zu geringeren Verformungen bei einer Brandbeanspruchung tendieren als 1,0 m lange.

Des Weiteren kann in Bezug auf die Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfungen feststellt werden, dass in 25 von 32 Fällen bei 1,0 m langen Probekörpern die Differenz der horizontalen Verformungen in Wandmitte und in den Randbereichen < 0,5 mm ist. Bei den sieben Ausnahmen liegen Differenzen < 2,0 mm vor. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m mit dem Probekörper, welcher einer Länge von 3,0 m hat, konnten Differenzen von 2,1 mm festgestellt werden. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m mit dem ebenfalls 3,0 m langen Probekörper konnte eine maximale Differenz von 39,7 mm gemessen werden. Die Bauteilränder bei den Feuerwiderstandsprüfungen werden nicht durch dämmende Wolle gehalten. Dies spricht für ein “Schüsseln“ der Wand, welches sich durch die einseitig einwirkende Temperaturbeanspruchung vergrößert, wie in Abb. 5.6 zu erkennen ist. Das horizontale Verformen in Wandlängsrichtung kann durch die kühleren Ränder erklärt werden. Eine Durchsicht der in Kapitel 3 aufgeführten Prüfberichte zeigt, dass die gemessenen horizontalen Verformungen in der Wandmitte nicht immer am größten sind. Vier von 33 Prüfberichten ist beispielsweise eine horizontale Schiefstellung des Probekörpers am Anfang der Feuerwiderstandsprüfung zu entnehmen.

Es kann auf Grundlage der Mechanik davon ausgegangen werden, dass eine 3,0 m lange Wand im Vergleich zu einer 1,0 m langen Wand längere Feuerwiderstandsdauern bei einer Feuerwiderstandsprüfung aufweist. In Bezug auf die Versagenszeitpunkte von unterschiedlich langen Mauerwerkswänden bei gleicher Prüflast pro laufenden Meter, hergestellt aus denselben Ziegeln und demnach identischer Ausnutzung konnten folgende Feuerwiderstandsdauern ermittelt werden:

- (A3-MZ70-365mm-200kN): Die 1,0 m lange Wand wurde zentrisch mit 200 kN/m belastet → 105 Minuten Feuerwiderstandsdauer
- (D1-MZ70-365mm-200kN/m): Die 3,0 m lange Wand wurde zentrisch mit 200 kN/m belastet → 181 Minuten Feuerwiderstandsdauer
- (D2-MZ70-365mm-200kN/m): Die 3,0 m lange Wand wurde zentrisch mit 200 kN/m belastet → 144 Minuten Feuerwiderstandsdauer

Hieraus ergibt sich rechnerisch eine 1,37 bis 1,72-fach längere Feuerwiderstandsdauer für 3,0 m lange Wände im Vergleich zu 1,0 m langen Wänden. Weitere Untersuchungen anhand einer größeren Datenmenge müssten durchgeführt werden, um den Einfluss der Streuung zu minimieren und den Faktor zu validieren.

In Bezug auf den kleingelochten verfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO liegen Prüfberichte für 3,0 m lange und 0,365 m dicke Wände vor ((3376/813/11)-TM [47] und (3752/833/14)-TM [46]). Ein Vergleich mit der Feuerwiderstandsprüfung A9-W07 UV-365mm-200kN bei welcher ein 1,0 m langer Probekörper verwendet wurde, kann anhand des unverfüllten Ziegels gezeigt werden, dass bei einem geringeren Ausnutzungsfaktor α_{fi} eine kürzere Feuerwiderstandsdauer resultiert. Diese kann nicht genau definiert werden, da die in den Prüfberichten aufgeführten Wände nach 90 Minuten auf die Eignung einer Brandwand getestet wurden. Alle anderen durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen mit dem gleichen Ziegel weisen gemäß Tab. 4.13 höhere Ausnutzungsfaktoren α_{fi} auf als die Feuerwiderstandsprüfungen der Prüfberichte. Eine Vergleichbarkeit ist demnach nicht gegeben.

5.1.6 Einfluss von Putz

Durch eine auf das Ziegelmauerwerk aufgebrachte Putzschicht wird verhindert, dass die dahinterliegenden Ziegel direkt beflammt werden. Je nach Putz kann im Brandfall durch das Erhitzen gebundenes Kristallwasser austreten und so zu einem kühlenden Effekt beitragen. Der Putz sorgt demnach auch dafür, dass das darunter befindliche Mauerwerk langsamer und gleichmäßiger erwärmt wird. Daraus resultieren geringere Spannungen im Ziegelmaterial. Je höher die Spannungen sind, desto eher kommt es tendenziell zu Abplatzungen. Es ist von späteren Versagenszeitpunkten auszugehen, je länger eine geschlossene Putzschicht auf der brandzugewandten Wandseite vorhanden ist. Dies spiegeln auch die Versuchsergebnisse wider. Tendenziell müsste der Putz zuerst in Wandmitte Risse aufweisen oder abplatzen, da dies der Ort der größten Verformung während einer Feuerwiderstandsprüfung ist. Dies kann aber nicht anhand von allen Versuchsergebnissen bestätigt werden. Des Öfteren finden die ersten Abplatzungen im oberen Wanddrittel statt was vermutlich mit den in Abb. 5.5 verbildlichten Prozessen im Zusammenhang steht.

Die Versuche aus Kapitel 4.3.2 an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit verschiedenen Ziegeln mit einer Nennwanddicke von 0,365 m zeigen, dass bei einer Brandbeanspruchung über 120 Minuten mit einer Normalkraftbeanspruchung von 100 kN (< 10 % des vertikalen Tragwiderstands; σ = 0,27 N/mm^2 bzw. 0,28 N/mm^2 in Abhängigkeit vom Ziegel) bei acht von zwölf Versuchen keine sichtbaren Schädigungen auftraten. Der vertikale Tragwiderstand der Wände in Abhängigkeit der geprüften Ziegel ist Tab. 4.5 zu entnehmen. Bei drei Versuchen konnten gemäß den Prüfprotokollen in Anlage I Risse im Putz lokalisiert werden und bei einer Feuerwiderstandsprüfung kam es zu einer lokalen Putzabplatzung. Eine Abhängigkeit aus der Dauer der ETK und dem Schädigungsgrad konnte nicht festgestellt werden. Eine Schädigung des dahinter befindlichen Ziegelmaterials ist aufgrund der häufig unbeschadeten Putzschicht nicht erkennbar. Zur Bestimmung der kritischsten Dämmstofffüllung wurden in Kapitel 4.1.1 unverputzte und unbelastete Ziegel 90 Minuten lang einer einseitigen Brandbeanspruchung gemäß EKT ausgesetzt. Die Schadensbilder der Abb. 4.3 zeigen Risse hinter der ersten Lochkammer. Diese sind vermutlich infolge des starken Temperaturgefälles über den Ziegelquerschnitt entstanden. Ob die Risse mit einer fehlenden Putzschicht im Zusammenhang stehen, ist unklar.

Die Ergebnisse der Versuchsserie A zeigen, dass es bei den 365 mm dicken Wänden immer zu Putzabplatzungen bei den Feuerwiderstandsprüfungen kam. Teilweise aber auch zu Abplatzungen von Außenlängsstegen, an welchem der Putz noch gehaftet hat. Sobald es zu den ersten Abplatzungen kam, folgten in der Regel weitere Abplatzungen der daraufhin direkt beflammten Ziegelstege in Abhängigkeit von der Höhe des Ausnutzungsfaktors α_{fi}. Dies liegt unter anderem daran, dass das Ziegelmaterial in Abhängigkeit von der Höhe der Temperatur und Normalkraftbeanspruchung Risse bekommt und an Festigkeit verliert.

Bei den Wänden mit einer Dicke von ≤ 240 mm konnten während der Feuerwiderstandsprüfungen keine sichtbaren Abplatzungen vom Putz festgestellt werden, mit Ausnahme von dem Versuch B2-MZ70-190mm-200kN. Bei diesem kam es zu einer lokalen Abplatzung über ca. zwei Ziegel. Wie Abb. 5.13 entnommen werden kann, fällt

die Feuerwiderstandsdauer in der Regel geringer aus, wenn es zu sichtbaren Abplatzungen vom Putz bzw. Ziegelmaterial kommt, wie es bei den Wänden mit einer Dicke von 365 mm der Fall war. Kommt es bei den dünneren Wänden mit einer Dicke ≤ 240 mm zu Abplatzungen, müssten deutlich frühere Versagenszeitpunkte resultieren, da aufgrund der geringen Wanddicke dort die Abplatzungen eine größere relative Schwächung erzeugen als bei dickeren Wänden.

Die im Rahmen der Untersuchungen hergestellten Ziegelwände wurden nicht alle an einem Termin verputzt. Unabhängig von der Prüfkörperhöhe kam es bei den Wänden mit einer Dicke von 365 mm zu Abplatzungen vom Putz. Dadurch kann ein Einfluss aus unterschiedlichen Chargen des Putzes ausgeschlossen werden. Die Versuche an den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) haben gezeigt, dass es bei diesen vermehrt erst zu einer Rissbildung im Putz kam und erst zu einem späteren Zeitpunkt im Brandverlauf Abplatzungen folgten. Anders als bei den Wänden mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m, bei welchen es in der Regel nach 11 bis 24 Minuten direkt zu Abplatzungen vom Putz kam. In Bezug auf großformatigere Wände (H x L = 3,0 m x 3,0 m) kam es gemäß den ausgewerteten Prüfberichten aus Kapitel 3 mit einer Wanddicke von 365 mm auch häufig erst zu einer Rissbildung in der 17. bis 40. Prüfminute, bevor es gelegentlich zu einem Putzabfall in Prüfminute 26 bis 45 kam.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Je besser der Verbund zwischen Putz und wärmedämmenden Hochlochziegel, desto besser die Eigenschaften der Wand im Brandfall. In der Regel sind wärmedämmende Hochlochziegel stark saugend und entziehen dem Putz die Feuchtigkeit, welche für einen guten Haftverbund benötigt wird. Aus diesem Grund sollte die zu verputzende Wand vorgenässt werden. Für einen besseren Verbund zwischen wärmedämmenden Hochlochziegel und Putz könnten die Ziegelhersteller ihre Ziegel bei der Herstellung imprägnieren. Dies könnte beispielsweise mittels einer hydrophobierenden Lösung geschehen, sodass das Ziegelmaterial weniger stark saugend ist. Ebenfalls für einen besseren Verbund zwischen Putz und Ziegel könnte eine rauere Oberfläche sorgen. Aktuell werden eine Vielzahl wärmedämmender Hochlochziegel mit Rippen versehen. Sofern es bei der Herstellung der Ziegel möglich ist, könnte bei dem Strangpressen eine gröbere Struktur für einen besseren Haftverbund in das Rohmaterial eingearbeitet werden.

5.1.7 Schädigungen und Versagensart

In Bezug auf die Versagensarten lässt sich feststellen, dass es bei den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen in Kapitel 4.4 bei 26 von 34 Versuchen zu einem Stabilitätsversagen (Knicken) unterhalb der obersten oder zweit obersten Ziegelreihe kam. Dies hängt vermutlich mit den in Abb. 5.5 verbildlichten Prozessen zusammen. Aufgrund von Abplatzungen bzw. geschädigtem Ziegelmaterial verändert sich die Schlankheit von Mauerwerkswänden über die Prüfdauer. Aus diesem Grund konnte bei den “gedrungenen“ Probekörpern der Versuchsserie C mit einer Wandschlankheit $\lambda = 3{,}08$ ebenfalls in Verbindung mit der großen Normalkraftbeanspruchung ein Stabilitätsversagen (Knicken) unterhalb der obersten oder zweit obersten Ziegelreihe als Versagensart identifiziert werden. Bei den restlichen acht Feuerwiderstandsprüfungen erfolgte ein Stabilitätsversagen (Knicken) im Bereich der Wandmitte. Hier ist von der

größten horizontalen Verformung auszugehen. Eine Abhängigkeit von dem Ausnutzungsfaktor α_{fi} oder dem Abminderungsfaktor Φ_m und somit der Wandschlankheit λ in Bezug auf die Versagensstelle besteht nicht.

Bei der Feuerwiderstandsprüfung (B8-W07 UV-175mm-82kN) konnte nach 180 Minuten kein Versagen festgestellt werden. Die Feuerwiderstandsprüfung wird durch eine Wanddicke von 175 mm und einem geringen Ausnutzungsfaktor α_{fi} = 0,35 charakterisiert. Aufgrund der geringen Wandschlankheit λ und dem Abminderungsfaktor Φ_m betrug die Prüflast nur 82 kN. Bei dieser Feuerwiderstandsprüfung wurde die Prüflast nach einer Prüfdauer von 180 Minuten gesteigert, bis die Wand dieser nicht mehr standhalten konnte. Die Wand knickte im oberen Wandbereich aus und im unteren waren Schädigungen erkennbar. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung mit einem identischen Ausnutzungsfaktor α_{fi} = 0,35, welche an einer Wand mit gleichen Ziegeln, aber mit einer Wanddicke von 365 mm durchgeführt wurde (A9-W07 UV-365mm-200kN), konnte ein Stabilitätsversagen (Knicken) im oberen Drittelpunkt nach der 89. Prüfminute festgestellt werden. Bei einem Vergleich Kraft pro Fläche lässt sich feststellen, dass die 175 mm dicke Wand (B8-W07 UV-175mm-82kN) eine um ca. 17,9 % geringere Kraft pro Fläche aufweist als die 365 mm dicke Wand (A9-W07 UV-365mm-200kN). Der geringe Wert für die Kraft pro Fläche (0,48 N/mm^2) könnte der Grund sein, wieso es bei der 175 mm dicken Wand nicht zu einem Versagen im Zeitraum von 180 Minuten kam, da diese Spannung vermutlich nicht ausgereicht hat, um die Ziegel bei Brandbeanspruchung ausreichend zu schädigen. Versuchsbeobachtungen haben gezeigt, dass sich tendenziell mehr und größere Abplatzungen bei höheren Prüflasten bzw. Ausnutzungen einstellen. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von Versuchen mit einer Normalkraftbeanspruchung von 100 kN aus Kapitel 4.3.2, bei welchen es keine großflächigen Abplatzungen vom Putz während der einseitigen Temperaturbeanspruchung mittels der ETK nach 60, 90 bzw. 120 Minuten, bei einer Kraft pro Fläche von 0,27 N/mm^2 bzw. 0,28 N/mm^2 abhängig vom Ziegel, gab.

Bei höherbelasteten Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) im Rahmen der Versuchsserie C (Kapitel 4.4.3) konnten teilweise bereits nach wenigen Minuten Brandbeanspruchung Risse im Putz festgestellt werden. Bei diesen Feuerwiderstandsprüfungen kam es nachfolgend zu einem Abfall von Putz und teilweise von Ziegelscherben. Bei höheren Ausnutzungen nehmen demnach die Schädigungen am Putz und am Ziegelmaterial zu. Da bei einer Feuerwiderstandsprüfung der Putz nicht belastet wird, aber mit zunehmender Ausnutzung der Wand in der Regel größere horizontale Verformungen und Spannungen resultieren, liegt ein Zusammenhang nahe. Die Abplatzungen von Putz und Ziegelmaterial hängen von diversen Faktoren ab und erfolgen größtenteils zufällig. Es kann keine direkte Abhängigkeit in Bezug auf den Grad der Ausnutzung und die Häufigkeit und Größe der Schädigung festgestellt werden.

Bei der Versuchsserie A und B (Kapitel 4.4.1 und 4.4.2) sowie bei der Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m (Kapitel 4.4.4) betrug die Dicke der Lasteinleitungsplatte 20 mm. Bei den Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C (Kapitel 4.4.3) wurde eine 40 mm dicke Lasteinleitungsplatte verwendet. Bei der Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m (Kapitel 4.4.4) lag eine Dicke von 50 mm für die Lasteinleitungsplatte vor [93]. Normativ ist keine Dicke definiert. Die un-

terschiedlichen Dicken für die Lasteinleitungsplatten resultieren aus den unterschiedlichen Prüfaufbauten. Ein Einfluss aus der Dicke der Lasteinleitungsplatte kann aufgrund nahezu identischer Versagensmuster aller Feuerwiderstandsprüfungen ausgeschlossen werden.

5.1.8 Variation der Versuchsergebnisse im Brandfall

Die Feuerwiderstandsdauer bei Feuerwiderstandsprüfungen mit gleichen Ziegelwänden und gleicher Prüflast unterliegt einer unbekannt großen Streuung. Eine Abschätzung kann anhand von zwei Versuchen erfolgen, welche im Rahmen der Untersuchungen durchgeführt wurden. Die Feuerwiderstandsprüfungen der Mauerwerkswände (B1-MZ70-190mm-200kN und B2-MZ70-190mm-200kN) bestehend aus dem 0,190 m breiten Großkammerziegeln ThermoPlan MZ70 wurden mit einer zentrisch eingeleiteten Normalkraft von 200 kN belastet. Dies entspricht gemäß Tab. 4.14 einem Ausnutzungsfaktor von α_{fi} = 0,68. Die Feuerwiderstandsprüfungen weisen große Differenzen in Bezug auf die Versagenszeitpunkte von 129 Minuten und 86 Minuten auf. Somit beträgt der Faktor zwischen den Feuerwiderstandsdauern 1,50 und die prozentuale Differenz ist 40,0 %. Den Prüfprotokollen ist zu entnehmen, dass der Putz bei der Wand mit der kürzeren Feuerwiderstandsdauer lokal abgeplatzt ist, welches die zuvor in Kapitel 5.1.6 getätigte Aussage noch einmal unterstreicht, dass sich eine länger unbeschadete Putzschicht positiv auf die Feuerwiderstandsdauer auswirkt.

Im Rahmen der Dissertation wurden ebenfalls zwei identische Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge durchgeführt. Beide Wände (D1-MZ70-365mm-200kN/m, D2-MZ70-365mm-200kN/m) wurden aus dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 mit einer Breite von 0,365 m hergestellt. Es konnten Feuerwiderstandsdauern von 181 Minuten und 144 Minuten erzielt werden. Bei der Wand mit der kürzeren Feuerwiderstandsdauer traten früher Beschädigungen der Putzschicht auf [93]. Für die unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern bei einem Ausnutzungsfaktor von α_{fi} = 0,31 liegt ein Faktor von 1,26 vor, was einer prozentualen Differenz von 22,8 % entspricht.

Des Weiteren kann den Versuchsdaten gemäß Abb. 5.13 entnommen werden, dass die Streuung der dünneren Wände (≤ 240 mm) bei einer Wandhöhe von 3,0 m größer ausfällt als bei Wänden mit einer Dicke von ≥ 365 mm. Übertragen auf die Wandschlankheit λ müssten demnach die Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m) die geringsten Abweichungen der Feuerwiderstandsdauern bei ungefähr gleicher Ausnutzung aufweisen. Anhand von Tab. 4.15 kann nicht bestätigt werden, dass die Feuerwiderstandsdauern bei ungefähr gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} nur geringfügiger voneinander abweichen als bei den 3,0 m hohen Wänden.

Wie stark die Streuungen oder der Einfluss kleinerer Fehler bei den Vorbereitungen einer Feuerwiderstandsprüfung sein können, haben Gespräche im Rahmen des Projektes gezeigt [1]. Gemäß diesen resultierten bei drei Feuerwiderstandsprüfungen mit dem gleichen Ziegel und identischer Prüflast jeweils unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen (REI 30, 60 und 90+M) als Ergebnis. Bei derart großen Unterschieden ist nicht eindeutig erkennbar, ob dies an den Streuungen der wärmedämmende Hochlochziegel oder an anderen Einflüssen liegt. Diese wären unter anderem verschiedene

Wasserzementwerte des Mörtels oder unterschiedliche Festigkeiten der einzelnen Ziegel bzw. Streuungen aus der Handarbeit bei dem Errichten der Mauerwerkswände. Einflüsse auf die Feuerwiderstandsdauer können zudem aus einem Transport der Wand sowie dessen Ausrichtung vor dem Brandofen resultieren.

Um die Streuung der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden im Brandfall bis zu einem Versagen gezielt zu untersuchen, müssten beispielsweise jeweils fünf Feuerwiderstandsprüfungen bei verschiedenen Ausnutzungsfaktoren α_{fi} durchgeführt werden. Ob die Höhe des Ausnutzungsfaktors α_{fi} einen Einfluss auf die Streuung hat, könnte dadurch auch untersucht werden. Nachfolgend werden mögliche Gründe aufgeführt, welche für eine große Streuung von normalkraftbelasteten Mauerwerkswänden bei einer einseitigen Brandbeanspruchung sprechen:

- Aufgrund der Brandeinwirkung in Kombination mit einer Normalkraftbeanspruchung kann es zu einer Rissbildung oder sogar zu Abplatzungen von Putz- und Ziegelmaterial kommen. Durch Abplatzungen von Ziegelmaterial über die Branddauer, welche zufällig erfolgen, wird der Wandquerschnitt reduziert und die Tragfähigkeit der Wand herabgesetzt. Ebenso resultieren zusätzliche Spannungen aus der sich einstellenden exzentrischen Belastung. Es folgt ab einer gewissen Restquerschnittsdicke ein Stabilitätsversagen (Knicken).
- Wie aus den Normuntersuchungen in Anlage B berechnet werden kann, weisen die Festigkeiten der Einzelsteine bei Raumtemperatur einen Variationskoeffizienten von 3,83 % bis 11,97 % auf. Aufgrund der einseitigen Erwärmung bei einer Feuerwiderstandsprüfung resultieren aus dem hohen Temperaturgefälle im Ziegelmaterial Spannungen, welche zu größeren Streuungen in Bezug auf die Druckfestigkeit führen können.
- Aufgrund der großen Maßtoleranzen für wärmedämmenden Hochlochziegel in Kombination mit der geringen Schichtdicke des Dünnbettmörtels, welche keinen Höhenausgleich ermöglicht, kann es zu vereinzelten Belastungsspitzen bei den Ziegeln kommen. Dehnen sich die Ziegel dann noch verschiedenartig bei einer Brandbeanspruchung aus, könnten diese verstärkt werden. Hieraus kann ebenfalls ein größerer Variationskoeffizient abgeleitet werden.
- In Bezug auf die Qualität der Ziegel ist festzustellen, dass diese teils produktionsbedingt mit Haarrissen durch den Brennprozess und der anschließenden Abkühlung versehen sind. Je nach Rissgröße, Häufigkeit und Position dieser vorgeschädigten Ziegel in der Mauerwerkswand kann es dadurch zu unterschiedlich langen Feuerwiderstandsdauern kommen. Zum einen aufgrund der geringen Tragfähigkeit und zum anderen, da Wärme durch die Risse schneller in das Ziegelmaterial eindringt bzw. kühlendes Kristallwasser schneller entweichen kann.
- Ziegel werden bei Temperaturen bis zu 1000 °C gebrannt, damit diese ihre Festigkeit erhalten. Je nach Position im Ofen und Umwälzung der Wärme kommt es zu unterschiedlichen Brenntemperaturen einzelner Lagen im Ofen. Daraus resultieren unterschiedliche Festigkeiten der Ziegel. Sollte ein bei einer geringen Temperatur gebrannter Ziegel bei einer Feuerwiderstandsprüfung höheren Temperaturen ausgesetzt werden, könnte es zu einer nachträglichen Verfestigung des mit der Temperatur beaufschlagten Teiles vom Ziegel

kommen. Durch diesen Prozess bzw. daraus resultierenden Spannungen im Ziegel könnten ebenfalls höhere Streuungen in Bezug auf das Bauteilverhalten erklärt werden.
- Es können Qualitätsunterschiede und damit verbundene Streuungen der Versuchsergebnisse aus natürlichen Schwankungen des Rohmaterials, dem tonhaltigem Lehm, bzw. der anschließenden Formgebung resultieren.
- Messungen an den Seiten der Mauerwerkswände haben gezeigt, dass es bei einer Brandbeanspruchung zu unterschiedlichen Temperaturen über den Wandquerschnitt kommen kann. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen und der daraus resultierenden Materialeigenschaften des Mauerwerks können auch größere Streuungen in Bezug auf die Feuerwiderstandsdauern abgeleitet werden.

Nicht nur bei Feuerwiderstandsprüfungen mit Ziegelmauerwerk kommt es zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen. Das stark streuende Verhalten konnte auch bei anderen Materialien im Brandfall festgestellt werden. So zeigen beispielsweise die Ergebnisse von Stahlbetonstützen unter Naturbrandbeanspruchung, dass bei zwei identisch durchgeführten Versuchen Versagenszeiten von 84 Minuten und 138 Minuten ermittelt wurden [98]. Dies entspricht einem Faktor von 1,64 und einer prozentualen Differenz von 48,7 %.

5.1.9 Vergleich der unterschiedlichen Ziegeltypen

Gemäß Kapitel 4.2 lässt sich anhand der mechanischen Untersuchungen zur Biegehaftzugfestigkeit und den Teilflächenbelastungen kein Ziegeltyp identifizieren, welcher überall höhere Widerstände aufweist. Gleiches gilt für die ermittelte Resttragfähigkeit nach definierten Brandbeanspruchungen gemäß Abb. 4.12. Bei den in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen an 3,0 m hohen Mauerwerkswänden lässt sich ebenfalls kein eindeutiger Ziegeltyp erkennen, welcher sich für den Brandfall am besten eignet. Bei den Versuchen mit den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit einer geringen Schlankheit aufgrund der reduzierten Wandhöhe ist festzustellen, dass tendenziell der Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 die besten Eigenschaften in Bezug auf die Feuerwiderstandsfähigkeit aufweist (siehe Abb. 4.14).

Ein dicker Außensteg könnte sich gemäß den Erläuterungen in Kapitel 3.4.1, wie ihn ein Großkammerziegel besitzt, positiv auf die Feuerwiderstandsdauer auswirken, sofern es nicht zu nennenswerten Abplatzungen dieser während der Feuerwiderstandsprüfung kommt. Bei den Versuchen an den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit dem Großkammerziegel Thermoplan MZ70 kam es gemäß den Prüfprotokollen in Anlage G nur zu vereinzelten Abplatzungen von Ziegelscherben, was die guten Eigenschaften in Bezug auf die Feuerwiderstandsfähigkeit erklärt. Gemäß Kapitel 5.1.2 ist davon auszugehen, dass der Außensteg zur brandzugewandten Wandseite aufgrund der Wandverformungen, resultierend aus der Temperatureinwirkung, höher belastet wird als die restlichen Ziegelstege. Entstehen durch die Prüflast und Temperatureinwirkung oberflächliche Risse bei dem Außensteg, ist noch genügend Restquerschnitt von dem Außensteg zur Abtragung der Prüflast vorhanden. Kann der Außensteg aufgrund eines vollständigen Zerbrechens oder Abfallens keine Kräfte mehr abtragen,

wird der im größeren Abstand dahinterliegende Längssteg anschließend höher belastet. Hier liegt der Vorteil bei den kleingelochten Ziegeln, da diese über die Ziegeldicke in Summe viel mehr Längsstege aufweisen. Durch die geringeren Abstände der Längsstege kann hier eine bessere Lastumlagerung auf die Vielzahl der kurz hintereinander angeordneten Längsstege erfolgen.

Verfüllte Ziegel weisen aufgrund ihrer Dämmstofffüllung eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf, da das in die Kammern eingefüllte Material bessere Wärmedämmeigenschaften als Luft besitzt. Ein Einfluss auf das Abplatzverhalten oder die Feuerwiderstandsdauer kann aus den Versuchen mit den verfüllen und unverfüllten kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO nicht abgeleitet werden.

Aufgrund der in Kapitel 5.1.8 erwähnten Streuungen bei den Versuchsergebnissen, kann keine Aussage getätigt werden, welcher Ziegel bzw. Ziegeltyp pauschal besser in Bezug auf den Feuerwiderstand ist. Aus diesem Grund erfolgt in Kapitel 5.3 eine gemeinsame Auswertung der unterschiedlichen Ziegeltypen in Abhängigkeit von der Wandhöhe und Wandlänge.

5.2 Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung

Der Ausnutzungsfaktor α_{fi} einer Mauerwerkswand im Brandfall wird nach DIN EN 1996-1-2/NA [7] gemäß Gleichung (5.7) berechnet. Weitere Informationen können dem Kapitel 2.2.5.2 entnommen werden.

$$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}} \triangleq \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} \tag{5.7}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

$N_{Ed,fi}$ Bemessungswert der Normalkraft im Brandfall

N_{Rd} Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes im Kaltfall

Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} wird gemäß Gleichung (2.2) in Abhängigkeit von dem Abminderungsfaktor Φ_m berechnet. Der Abminderungsfaktor Φ_m ist abhängig von der Wandschlankheit λ gemäß Gleichung (2.6). Im Rahmen der Feuerwiderstandsprüfungen (Kapitels 4.4) wurden Probekörper mit einer Dicke von 0,365 m mit unterschiedlichen Wandhöhen geprüft. Die Mauerwerkwerkswände der Versuchsserie C waren mit 1,5 m halb so hoch wie die der Versuchsserie A mit 3,0 m. Es konnten in Abhängigkeit von der Wandhöhe bei gleicher Wanddicke von 0,365 m folgende Wandschlankheiten λ gemäß Gleichung (2.9) und Abminderungsfaktoren Φ_m berechnet werden:

Versuchsserie A: $\lambda = h_{ef} / t_{ef} = 2{,}25 / 0{,}365 = 6{,}16 \rightarrow \Phi_m = 0{,}99$ (5.8)

Versuchsserie C: $\lambda = h_{ef} / t_{ef} = 1{,}13 / 0{,}365 = 3{,}08 \rightarrow \Phi_m = 1{,}00$ (5.9)

Der Abminderungsfaktor kann keinen Wert > 1,0 annehmen. Anhand der Wandschlankheiten λ und den resultierenden Abminderungsfaktoren Φ_m ist erkennbar, dass eine Reduzierung der Wandhöhe ab einer gewissen Wanddicke keinen signifikanten Einfluss aufweist. Aus der Differenz der Abminderungsfaktoren Φ_m resultiert eine Erhöhung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} von ~1 %, was

im vorliegenden Fall 5 kN entspricht. In Hinblick auf eine Feuerwiderstandsprüfung weist die Wandschlankheit λ einen großen Einfluss auf die horizontale Verformung auf (siehe Kapitel 3.2), welche einen Einfluss auf den Tragwiderstand hat. Üblicherweise werden Wände mit einer Höhe > 1,5 m hergestellt. Die berechneten Ausnutzungsfaktoren α_{fi} der Tab. 4.15 für die 1,5 m hohen Wände sind teilweise > 1,0. Demnach ist der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} zu konservativ in Bezug auf die Prüfkörperabmessungen der Versuchsserie C. Für Wandhöhen von 1,5 m ist demnach davon auszugehen, dass der Ausnutzungsfaktor im Brandfall α_{fi} kein repräsentativer Wert ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Auswertung der Versuchsdaten auf Grundlage eines Ausnutzungsgrades (γ_{Rm} bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$). Die Berechnung der Ausnutzungsgrade erfolgt, indem die gewählte Prüflast durch den berechneten oder aus Bauteilprüfungen bestimmten vertikalen Tragwiderstand einer Mauerwerkswand auf Mittelwertniveau (N_{Rm} bzw. $N_{Rm,Versuch}$) dividiert wird.

$$\gamma_{Rm} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}} \quad bzw. \quad \gamma_{Rm,Versuch} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm,Versuch}} \tag{5.10}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$	Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung
N_{Rm}	Berechneter Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes
$N_{Rm,Versuch}$	Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes aus Bauteilprüfungen

Für die Berechnung des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand auf Mittelwertniveau (N_{Rm}) wird ein charakteristischer Wert des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rk} benötigt, welcher im Anschluss auf Mittelwertniveau umgerechnet wird. Die nachfolgende Gleichung zeigt die Berechnung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd}.

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot l \cdot \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M} \tag{5.11}$$

Dabei ist:

Φ	Abminderungsfaktor Φ_i am Kopf oder Fuß der Wand, bzw. Φ_m in Wandmitte
t	Wanddicke
l	Wandlänge
ζ	Dauerstandsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen und weiterer Einflüsse $\zeta = 0{,}85$; für kurzzeitige Beanspruchungsarten wie beispielsweise ein Brandfall kann $\zeta = 1{,}0$ eingesetzt werden. [28]
f_k	Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit des Mauerwerks
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1996-1-1/NA [28] = 1,5

Es gilt vereinfachend zur Berechnung des charakteristischen Werts des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rk}:

$$N_{Rk} = N_{Rd} \cdot \gamma_M \tag{5.12}$$

Dabei ist:

N_{Rd} Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes im Kaltfall

γ_M Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1996-1-1/NA [28] = 1,5

Um den charakteristischen Tragwiderstand N_{Rk} auf einen Mittelwert N_{Rm} umzurechnen, muss dieser durch einen Faktor für die Berücksichtigung der Streuung der Versuchsergebnisse dividiert werden. Aus den Normuntersuchungen in Anlage B kann in Bezug auf die zehn ermittelten Druckfestigkeiten der Einzelsteine bei neun Versuchsserien ein Variationskoeffizient von 3,83 % bis 11,97 % berechnet werden. Aus den Versuchsergebnissen der Tab. 4.5 kann aus den sechs Druckfestigkeitsprüfungen der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) für den kleingelochten unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO ein Variationskoeffizient von 3,88 % bestimmt werden. Dass die Mauerwerkswand geringere Streuungen besitzt, weist auf eine fachgerechte Herstellung hin und ist dahingehend plausibel, weil in dieser die wärmedämmenden Hochlochziegel mit den streuenden Materialeigenschaften zufällig verteilt sind. Diese Annahme trifft nicht immer zu. Das zeigt die Auswertung eines Prüfberichts, bei welchem fünf Wände aus identischen Planhochlochziegeln hergestellt und auf die Druckfestigkeit geprüft wurden. Im Rahmen dieser Versuche konnte im Voraus für zehn auf Druck getestete Einzelsteine ein Variationskoeffizient von 4,83 % ermittelt werden [99]. Für die ca. 2,5 m hohen und 1,2 m bis 1,3 m langen Mauerwerkswände konnte aus fünf Versuchen ein Variationskoeffizient von 9,20 % in Bezug auf die Druckfestigkeit bestimmt werden [99].

Für die weitere Berechnung wird ausgehend von der ermittelten maximalen Streuung (11,97 %) auf der sicheren Seite liegend eine Streuung von 15 % für eine unendliche Versuchsanzahl in Bezug auf die untersuchten wärmedämmende Hochlochziegel angesetzt. Somit wird auch die in DIN EN 1996-1-1 [13] definierte Anwendungsgrenze als Voraussetzung für die Bestimmung der charakteristischen Druckfestigkeit von Mauerwerk eingehalten. Gemäß dieser darf der Variationskoeffizient der Mauersteinfestigkeit nicht größer als 25 % sein. Die normativen 25 % Streuung stammen noch aus Zeiten älterer Brennöfen, in denen die Ziegel aufgrund ihrer Positionierung im Ofen bei unterschiedlichen Temperaturen gebrannt wurden und somit große Abweichungen in Bezug auf die Ergebnisse der Festigkeiten hatten.

Des Weiteren wird für die Berechnung der Fraktilenfaktor k_n benötigt. Dieser ist abhängig von dem gewählten Vertrauensniveau sowie dem kleinsten Wert des Anteils der Grundgesamtheit, welcher im statistischen Anteilsbereich liegt. Bei einer Annahme, dass zu 90 % der 95 % Quantilwert stimmt, kann gemäß der zurückgezogenen Norm DIN ISO 16269-6 [100] für einen einseitig begrenzten statistischen Anteilsbereich bei unbekannter Standardabweichung für eine unendliche Versuchsanzahl, auf Grundlage der zuvor gewählten Streuung von 15 %, ein Fraktilenfaktor von $k_n = 1{,}645$ bestimmt werden.

Mittels der angesetzten Streuung von 15 % ($Vx = 0{,}15$) und einem k_n-Wert von 1,645 lässt sich gemäß nachfolgender Gleichung ein Umrechnungsfaktor zur Berechnung eines charakteristischen Werts auf einen Mittelwert x_m bestimmen:

$$x_m = 1 - k_n \cdot Vx = 1 - 1{,}645 \cdot 0{,}15 = 0{,}75 \tag{5.13}$$

Der zuvor ermittelte charakteristische Wert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rk}, geteilt durch den ermittelten Faktor zur Umrechnung in einen Mittelwert $x_m = 0{,}75$, ergibt einen rechnerischen Mittelwert für den Tragwiderstand N_{Rm}.

$$N_{Rm} = \frac{N_{Rk}}{x_m} \tag{5.14}$$

Dabei ist:

N_{Rk} Charakteristischer Wert des vertikalen Tragwiderstandes

x_m Umrechnungsfaktor für Mittelwert $x_m = 0{,}75$

Es folgt die Berechnung des Verhältnisses vom Ausnutzungsfaktor α_{fi} zum Ausnutzungsgrad γ_{Rm}, sofern keine Tragwiderstände aus Bauteilprüfungen für den Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes $N_{Rm,Versuch}$ existieren. Die Gleichung 5.7 kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{\left(\frac{N_{Rk}}{\gamma_M}\right)} \tag{5.15}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

N_{Rk} Charakteristischer Wert des vertikalen Tragwiderstandes

γ_M Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1996-1-1/NA [28] = 1,5

Zur Umrechnung auf Mittelwertniveau wird der zuvor ermittelte Umrechnungsfaktor $x_m = 0{,}75$ verwendet. Ebenso wird $\gamma_M = 1{,}5$ für den Teilsicherheitsbeiwert eingesetzt:

$$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{\left(\frac{(N_{Rm} \cdot 0{,}75)}{1{,}5}\right)} \tag{5.16}$$

Dabei ist:

$P_{gewählt}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

N_{Rm} Berechneter Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes

Es folgt eine umgeschriebene Schreibweise:

$$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}} \cdot \frac{1{,}5}{0{,}75} \tag{5.17}$$

Bei identisch einwirkender Prüflast und Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes ergibt sich:

$$\alpha_{fi} = 1 \cdot 2 = 2 \tag{5.18}$$

Es resultiert folgendes Verhältnis für die Ergebnisse einer Feuerwiderstandsprüfung:

$$\gamma_{Rm} = 2 \cdot \alpha_{fi} \tag{5.19}$$

Dabei ist:

γ_{Rm} Ausnutzungsgrad

α_{fi} Ausnutzungsfaktor

Gemäß Kapitel 5.1.3 erfolgt in Kapitel 5.3.1 eine gemeinsame Auswertung der Versuchsserien A und B bezüglich des Ausnutzungsfaktors α_{fi} sowie dem Ausnutzungsgrad γ_{Rm}. Auf Grundlage des Ausnutzungsfaktors α_{fi} erfolgt in Kapitel 6.1 die Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen. Die Auswertung in Bezug auf den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} wird für die Bildung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m gemäß Kapitel 6.2 benötigt. Diese ergeben sich aus einer Gegenüberstellung der berechneten Ausnutzungsgrade γ_{Rm} sowie der für die Versuchsserie C bestimmten Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$. In Hinblick auf die Bestimmung der Ausnutzung der Versuchsserien für verschiedene Feuerwiderstandsklassen folgen grundlegende Überlegungen sowie eine Gegenüberstellung verschiedener Auswertemethoden.

5.2.1 Grundlegendes zur Versuchsauswertung

Die aus einer Feuerwiderstandsprüfung resultierende Feuerwiderstandsdauer in Minuten wird für die Einteilung in eine Feuerwiderstandsklasse immer auf den nächsten durch 30 teilbaren Wert abgerundet. Eine Variante der Auswertung für die unterschiedlichen Versuchsserien wäre, die Versuchsergebnisse in den Intervallen 30 bis 59 Minuten sowie 60 bis 89 Minuten etc. zu betrachten und im Anschluss die in dem Zeitraum vorliegende geringste Ausnutzung als maßgebend anzusetzen. Diese Art der Festlegung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 120 ist sehr stark von Einzelnen Versuchen geprägt. Mit zunehmender Versuchsanzahl könnten geringere Ausnutzungen für die jeweiligen Feuerwiderstandsklassen resultieren. Es wird keine Tendenz der gesamten Datenmenge berücksichtigt und einzelne Ergebnisse werden sehr stark gewichtet. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5.2.2 Varianten der Auswertung untersucht, bei welchen über mathematische Funktionen ein Einfluss aus der Gesamten Datenmenge berücksichtigt wird. Es folgen Überlegungen bzgl. mathematischer Funktionen, die sich für die Auswertung von Ergebnissen im Rahmen von Feuerwiderstandsprüfungen eignen.

Bisher existieren keine Forschungsergebnisse, welche einen Anhaltspunkt bieten, wie groß die Streuung der Feuerwiderstandsdauern von Mauerwerkswänden im Brandfall bei gleicher Ausnutzung ist. Ob die Streuung konstant ist oder ob diese von dem Grad der Ausnutzung beeinflusst wird, ist ebenso derzeit unklar. Wie groß ein Einfluss der Streuung auf die resultierenden Feuerwiderstandsdauern eines Brandversuches sind, ist demnach nicht abschätzbar. In Hinblick auf das Ziel der Definition von Mindestfeuerwiderstandsklassen und Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m ist die beschränkte Datenmenge demnach konservativ, also auf der sicheren Seite liegend, auszuwerten. Auf dieser Grundlage wurden nachfolgende Bedingungen für die Auswertung der Versuchsdaten definiert. Es gilt eine mathematische Funktion zu definieren, welche die Messdaten analytisch approximiert.

1. Es muss eine mathematische Funktion zur Abbildung des Bauteilverhaltens von zentrisch normalkraftbelasteten Wänden bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegel im Brandfall gefunden werden, welche aus den Versuchsdaten eine allgemeingültige Aussage ermöglicht.

2. Die mathematische Funktion muss eine abfallende Ausnutzung bei fortlaufender Feuerwiderstandsdauer aufzeigen.
3. Die mathematische Funktion darf für keine Feuerwiderstandsdauer eine negative Ausnutzung definieren.
4. Die mathematische Funktion darf zu keinem Zeitpunkt den maximalen vertikalen Tragwiderstand ohne Brandbeanspruchung überschreiten.
5. In der Regel sind Feuerwiderstandsdauern von 30 bis 120 Minuten maßgebend. Gemäß DIN EN 13501-2 [26] sind Feuerwiderstandsklassen bis 360 Minuten definiert. Demnach soll die mathematische Funktion möglichst repräsentativ das Bauteilverhalten auch für eine Klassifizierung von Feuerwiderstandsdauern > 120 Minuten abbilden.

Zur Beurteilung wie gut eine mathematische Funktion eine Datenmenge abbildet, kann das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet werden. Die Berechnung für lineare Regressionsanalysen erfolgt über ein Quadrieren des Korrelationskoeffizienten nach Bravais und Pearson. Das Bestimmtheitsmaß R^2 hat einen Wert zwischen Null und Eins. Liegen alle Datenpunkte auf der Regressionsgeraden, ist das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 1{,}0$. Der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson gilt nur für den linearen Zusammenhang von metrisch skalierten Merkmalen [101]. Auf Grundlage von einem transformierten Regressionsmodell kann eine Ermittlung für logarithmische, potenzielle und exponentielle Funktionen für das Bestimmtheitsmaß R^2 erfolgen [102]. Hierbei werden in einem ersten Schritt die Zahlenwerte der vertikalen Achse logarithmiert. Durch die logarithmische Skalierung der Diagrammachse ergibt sich eine Gerade [103]. Es folgt die Bestimmung der Ausgleichsgeraden und die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes, bevor anschließend wieder eine Rücktransformation erfolgt [102]. Das Bestimmtheitsmaß gibt demnach nur an, wie viel Prozent der Varianz der vertikalen Messwerte durch die Regression erfasst werden und ist folglich für nicht lineare Funktionen kein verlässliches Maß, mit dem eindeutige Schlüsse gezogen werden können [101]. Die Güte muss daher zusätzlich grafisch überprüft werden [101].

Anhand der Feuerwiderstandsdauern der Versuchsserie A (Kapitel 4.4.1) in Bezug auf den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} folgt in Abb. 5.15 eine Darstellung einiger untersuchter mathematischer Funktionen für die Festlegung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 120. Bei der Versuchsserie A handelt es sich um Probekörper mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m, welche eine Dicke von 365 mm aufweisen. Abgesehen von der reduzierten Wandlänge entspricht dies bei Feuerwiderstandsprüfungen für wärmedämmende Hochlochziegel den üblichen Maßen in Hinblick auf Tab. 3.1 sowie DIN EN 1365-1 [5]. Aus diesem Grund ist die Datenmenge als repräsentativ einzustufen. Auf der vertikalen Diagrammachse in Abb. 5.15, die den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} repräsentiert, definiert der Datenpunkt bei $\gamma_{Rm} = 1{,}0$ den rechnerisch bestimmten Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rm} für den Kaltfall für jeden Ziegeltypen. Der Funktion zugehörige Wert für das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt eine Beurteilung der Anpassungsgüte für die Datenpunkte im Zeitraum von 0 bis 105 Minuten.

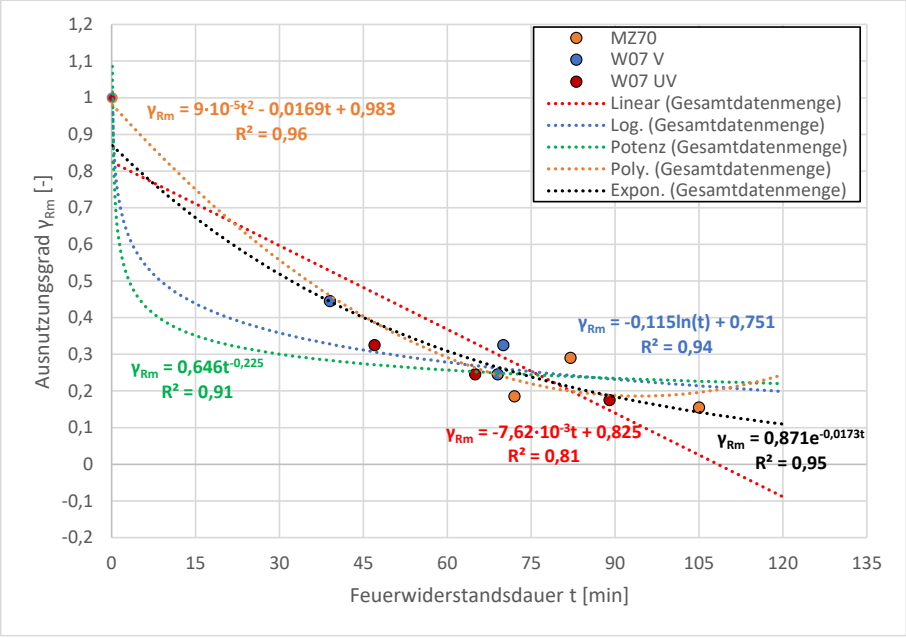


Abb. 5.15: Mathematische Funktionen zur Auswertung von Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln

Lineare Funktion

Bei Feuerwiderstandsprüfungen steigt die Feuerwiderstandsdauer mit geringerer Bauteilausnutzung an. Anhand der Datenpunkte in Abb. 5.15 scheint dieses Verhältnis nicht linear zu sein, da in Abhängigkeit der Verteilung der Datenpunkte ab einem gewissen Zeitpunkt negative Ausnutzungsgrade resultieren. Dies entspricht nicht den Eigenschaften einer Feuerwiderstandsprüfung für eine Mauerwerkswand bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln.

Logarithmus- und Potenzfunktion

Eine logarithmische Funktion sowie eine Potenzfunktion beschreiben Prozesse, bei denen eine mehr oder weniger starke, immer weiter fortlaufende Vergrößerung oder Verkleinerung (gleichmäßig oder ansteigend) stattfindet. Wie in Abb. 5.15 erkennbar, resultieren für Feuerwiderstandsdauern < 10 Minuten sehr hohe Ausnutzungsgrade γ_{Rm} und wenige Minuten später im Vergleich zu den anderen mathematischen Funktionen deutlich geringere. Anhand ermittelter Feuerwiderstandsdauern in Abhängigkeit von der Ausnutzung kann gemäß Kapitel 4.4 keine Validierung diesbezüglich erfolgen.

Polynomfunktion

Wird die Streuung von Versuchsergebnissen ausgeklammert, weisen Feuerwiderstandsprüfungen längere Feuerwiderstandsdauern auf, je geringer der Ausnutzungsgrad γ_{Rm} ist. Polynomfunktionen können mehrere Wendepunkte aufweisen. Aus diesem Grund sind Polynomfunktionen unabhängig von ihrem Grad für die Abbildung der Versuchsergebnisse ungeeignet. Dies gilt auch für mathematischen Funktionen mit gleitendem Durchschnitt. Obwohl das Bestimmtheitsmaß R^2 für diese Funktion am größten ist, lässt sich anhand einer grafischen Überprüfung für Feuerwiderstandsdauern > 90 Minuten gemäß Abb. 5.15 ein Ausschluss der Polynomfunktionen für die Auswertung der Daten begründen.

Exponentialfunktion

Eine Exponentialfunktion beschreibt Prozesse, bei welchen die Daten mit einer zunehmenden Tendenz steigen oder fallen. Die Geschwindigkeit kann dabei variieren. Der Wertebereich ist hierbei auf positive Zahlen begrenzt. Aufgrund der Beschreibung der mathematischen Funktion und einer grafischen Überprüfung mit den unterschiedlichen Ergebnissen der Feuerwiderstandsprüfungen eignet sich eine Exponentialfunktion am besten zur Auswertung von Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln. Ein weiteres Argument für eine Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen auf Grundlage der Exponentialfunktion ist, dass diese gegen Null für unendlich konvergiert. Demnach erfolgt kein Bauteilversagen bei einer Feuerwiderstandsprüfung an einer unbelasteten Mauerwerkswand. Der Versuch B8-W07 UV-175mm-82kN hat bei einer geringen Prüflast von 82 kN (α_{fi} = 0,35) nach 180 Minuten nicht versagt. Aufgrund der nicht Brennbarkeit der Ziegel ist davon auszugehen, dass nach 360 Minuten bei einer unbelasteten Wand kein Versagen eintritt. Dies entspricht der maximalen Klassifizierungszeit gemäß DIN EN 13501-2 [26]. Eine Exponentialfunktion mit der Eulerschen Zahl als Basis wird wie folgt gebildet:

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \tag{5.20}$$

Dabei ist:

- a Parameter für den Anfangswert bei exponentiellen Prozessen
- e Basis in Form einer Konstante zur Beschreibung exponentieller Prozesse (hier Eulersche Zahl e = 2,718)
- b Parameter für den Anstieg der exponentiellen Prozesse
- x Variable

Bei einer Exponentialfunktion steigt der Funktionswert innerhalb von gleichbleibenden Zeitintervallen um den gleichen Prozentwert an. Der Funktionsverlauf wird sowohl von der Basis der mathematischen Funktion als auch von dem Exponenten definiert. Eine Exponentialfunktion muss nicht zwingend die Eulersche Zahl als Basis haben. Es liegen viele Wachstums- und Zerfallsprozesse dieser Zahl zugrunde, wodurch diese mathematische Funktion auch natürliche Exponentialfunktion genannt wird. Durch den Exponenten erfolgt eine Anpassung der Basis an die Funktionsdaten und die Steigung bzw. das Gefälle der mathematischen Funktion wird verändert. Allgemein besitzt der

Exponent einen größeren Einfluss auf den Funktionsverlauf als die Basis, da eine Verdopplung des Exponenten einen größeren Einfluss besitzt als eine Verdopplung der Basis.

In Bezug auf die Auswertung der Versuchsdaten von Feuerwiderstandsprüfungen mit zentrisch normalkraftbelasteten Mauerwerkswänden bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln wird eine einheitliche Basis für die Auswertung der Versuche mit unterschiedlichen Wanddicken und Wandhöhen angestrebt, da alle Versuchsergebnisse auf gleicher Grundlage ermittelt wurden. Ein Argument für die Eulersche Zahl als Basis ist, dass bei der Auswertung vom Ausnutzungsgrad γ_{Rm} die natürliche Exponentialfunktion den Zahlenwert 1,0 auf der vertikalen Diagrammachse schneidet, was einer Ausnutzung von 100 % im Kaltfall entspricht. Die Ergebnisse von Feuerwiderstandsprüfungen unterliegen einer unbekannten großen Streuung. Es wird die Genauigkeit der Eulerschen Zahl als Basis sowie allgemein die Wahl einer Exponentialfunktion als ausreichend genau angesehen. Aus der gewählten Funktionsart und den Versuchsergebnissen ergibt sich ein Schnittpunkt der Exponentialfunktion mit der vertikalen Diagrammachse. Der Zahlenwert von diesem Schnittpunkt entspricht dem Parameter *a*.

5.2.2 Unterschiedliche Varianten der Auswertung

Die Festlegung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 120 für die Versuchsdaten soll unabhängig von der Versuchsanzahl, den Ziegeln bzw. Wandabmessungen oder den Bezug der Ausnutzung sein. Aus diesem Grund erfolgt eine Auswertung für den Ausnutzungsfaktor α_{fi} auf gleicher Grundlage wie für den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$. Es werden unterschiedliche Varianten der Festlegung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 120 für die Versuchsserie A (Kapitel 4.4.1) in Bezug auf den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} auf Grundlage der in Abb. 5.15 dargestellten Exponentialfunktion erläutert.

Variante 1

Eine Möglichkeit der Festlegung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 120 besteht darin, dass die Exponentialfunktion zwingend die vertikale Diagrammachse bei einem Ausnutzungsgrad γ_{Rm} = 1,0 schneidet. Es gilt anzumerken, dass dieser Fixpunkt auch einer gewissen Streuung unterliegt, da dieser rechnerisch mittels einer getroffenen Annahme für die Streuung bestimmt wurde. Des Weiteren fließen in die Berechnung Versuchsergebnisse der Steindruckfestigkeit ein, welche ebenfalls einer gewissen Streuung unterliegen. Zudem wird in Abb. 5.16 ein weiterer Fixpunkt bei 360 Prüfminuten mit einem Ausnutzungsgrad γ_{Rm} = 0 definiert. Dieser beruht auf der Annahme, dass eine unbelastete Wand bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln mindestens 360 Minuten einer Brandbeanspruchung standhält. Des Weiteren ist in Abb. 5.16 eine grüne Exponentialfunktion abgebildet. Diese entspricht der schwarzen Exponentialfunktion nur durch den unterhalb am weitesten entfernten Datenpunkt verschoben. Aufgrund der sich über die Feuerwiderstandsdauer ändernde Steigung der Exponentialfunktion scheint die grüne Exponentialfunktion in Abb. 5.16 nicht parallelverschoben. Hierbei handelt es sich um eine Täuschung, da der vertikale Abstand der einzelnen Datenpunkte stehts identisch ist und konstant über die Feuerwiderstandsdauer bleibt.

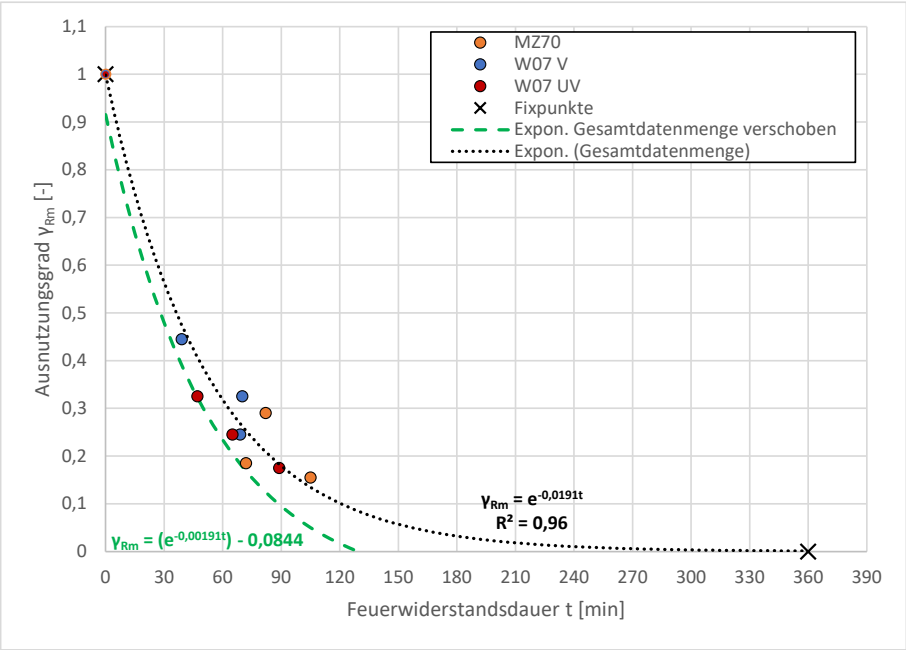


Abb. 5.16: Darstellung der Variante 1 der Auswertung

In Abb. 5.16 sowie den nachfolgenden Diagrammen der Auswertung der Dissertationsschrift wurden die Gleichungen für die Exponentialfunktionen einheitlich auf die ersten drei signifikanten Stellen nach dem Komma gerundet. Eine Rundung auf weniger signifikante Stellen hat einen Einfluss auf die resultierende Ausnutzung bei den Feuerwiderstandsdauern von 30, 60, 90 und 120 Minuten. Die Anzahl der Nachkommastellen ergibt sich aus dem Maßstab von den Diagrammachsen, da auf der vertikalen Diagrammachse nur Ausnutzungen ≤ 1,2 abgetragen sind und auf der horizontalen Diagrammachse Feuerwiderstandsdauern bis zu 360 Minuten.

Bei der charakteristischen Druckfestigkeit des Mauerwerks f_k handelt es sich um einen 5 %-Fraktilwert. Demnach dürfen bei einer unbegrenzten Grundgesamtheit nur 5 % der Druckfestigkeiten die definierte Mindestfestigkeit unterschreiten [13]. In Bezug auf die Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen liegt eine begrenzte Datenmenge für die verschiedenen Versuchsserien vor. Die Datenpunkte in Abb. 5.16 die unterhalb der schwarzen Exponentialfunktion angeordnet sind, weisen einen geringeren Ausnutzungsgrad γ_{Rm} für Feuerwiderstandsdauern auf, wie aus der Funktionsgleichung berechnet werden kann. Durch das Verschieben der schwarzen Exponentialfunktion durch den unterhalb am weitesten entfernten Datenpunkt resultiert die grüne Exponentialfunktion. In Bezug auf die abgebildeten Datenpunkte in Abb. 5.16 liegen diese demnach auf der sicheren Seite.

Nachteilig bei der Auswertung gemäß Abb. 5.16 ist, dass keine einheitliche Gewichtung der Datenpunkte bei der Auswertung erfolgt. In Bezug auf Angaben zum Feuerwiderstand für Feuerwiderstandsdauern kleiner der aus Feuerwiderstandsprüfungen

vorliegenden, sind diese in Abhängigkeit von der Exponentialfunktion tendenziell auf der unsicheren Seite. Durch die Exponentialfunktion erfolgt ein konservativer Verlauf für Feuerwiderstandsdauern größer der geprüften. Aus diesem Grund ist in Bezug zu Abb. 5.16 ein Fixpunkt bei 360 Minuten nicht erforderlich. Die in Abb. 5.16 angegebenen Funktionsgleichung für die nicht verschobene Exponentialfunktion wäre ohne den Fixpunkt bei 360 Minuten identisch.

Variante 2

Es folgt eine Auswertung in Abb. 5.17, bei welcher die gewählte Exponentialfunktion nur für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 bis 120 Minuten angesetzt wird. Für den Zeitraum von 0 bis 30 Minuten wird eine lineare Funktion verwendet, welche sich aus den rechnerisch ermittelten vertikalen Tragwiderstand und dem sich aus der Exponentialfunktion resultierenden Ausnutzungsgrad γ_{Rm} für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten ergibt. Ebenso wird eine lineare Funktion verwendet, um den aus der Exponentialfunktion resultierenden Ausnutzungsgrad γ_{Rm} für eine Feuerwiderstandsdauer von 120 mit der horizontalen Diagrammachse bei 360 Minuten zu verbinden. Anschließend erfolgt eine Verschiebung der mathematischen Funktionen nach unten um den Abstand zwischen der Exponentialfunktion und dem Datenpunkt, welcher in vertikaler Richtung am weitesten von dieser unterhalb entfernt liegt.

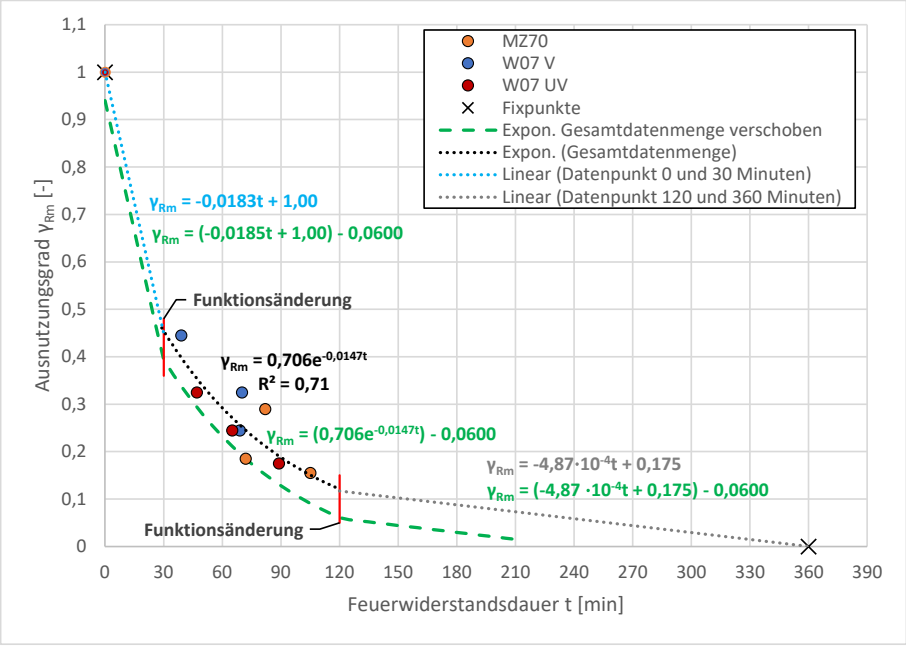


Abb. 5.17: Darstellung der Variante 2 der Auswertung

Die Variante 2 berücksichtigt keine vorliegenden Daten für Feuerwiderstandsdauern < 30 Minuten und größer 120 Minuten bei der Bildung der Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis 120. Demnach ist diese Auswertung nur sinnvoll, sofern viele Versuchsergebnisse im Zeitraum zwischen 30 Minuten und 120 Minuten existieren. Tab. 4.13, Tab. 4.14 und Tab. 4.15 ist zu entnehmen, dass ein Bauteilversagen bei den Feuerwiderstandsprüfungen meist später resultierte (> 30 Minuten) und längere Feuerwiderstandsdauern als 120 Minuten vorliegen. Alternativ könnte die Exponentialfunktion nicht pauschal auf den Zeitraum von 30 bis 120 Minuten begrenzt werden, sondern an die kürzeste und längste Feuerwiderstandsdauer der Datenmenge angepasst werden. Mittels der linearen Funktionen ist eine Klassifizierung für kürzere und längere Feuerwiderstandsdauern als 30 und 120 Minuten, bzw. jenseits der kürzesten und längsten Feuerwiderstandsdauer möglich. Die Steigung der linearen Funktionen ist abhängig von der exponentiellen Funktion. Demnach können aus den linearen Funktionen Feuerwiderstandsdauern auf der unsicheren Seite resultieren.

5.2.3 Gewählte Auswertevariante

In Bezug auf die Variante 1 der Auswertung in Abb. 5.16 kann aufgrund fehlender Versuchsergebnisse für die Feuerwiderstandsdauern zwischen 0 und 39 Minuten nicht abgeschätzt werden, ob aus der nach unten verschobene Exponentialfunktion Ausnutzungsgrade γ_{Rm} auf der sicheren Seite liegend resultieren. Bei der Versuchsserie B liegen für den Zeitraum gemäß Tab. 4.14 zwischen 0 und 48 Minuten keine Versuchsdaten vor und bei der Versuchsserie C sogar bis zur 58. Minute (Tab. 4.15). Zur Absicherung auch in Bezug auf die Streuung der Versuchsergebnisse wird aus diesem Grund eine lineare Funktion durch die rechnerisch ermittelten Datenpunkte aus der nach unten verschobenen Exponentialfunktion bei 60 und 90 Minuten gelegt. Anhand dieser linearen Funktion wird der Ausnutzungsgrad γ_{Rm} für eine Branddauer von 30 Minuten in Anlehnung an die Auswertung für Befestigungsmittel in Beton im Brandfall gemäß EAD 330232-01-0601 [104] bestimmt. Es folgt schrittweise das gewählte Vorgehen für die Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen. Im Anschluss werden die Schritte 2), 6) und 9) kommentiert. In der darauffolgenden Abb. 5.18 werden die Schritte 1) bis 9) verbildlicht.

Schritt 1) In Abhängigkeit von der Ausnutzung (α_{fi} oder γ_{Rm} bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$) bzgl. welcher die Datenmenge ausgewertet werden soll, erfolgt die Berechnung der Tragwiderstände N_{Rd} oder N_{Rm} bzw. die Bestimmung von $N_{Rm,Versuch}$.

Schritt 2) Die aus Schritt 1) resultierenden Tragwiderstände repräsentieren den Kaltfall (≙ 0 Minuten Feuerwiderstandsdauer) bei einer Ausnutzung von 1,0, unabhängig von α_{fi}, γ_{Rm} bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$.

Schritt 3) Die Prüflasten der Versuche werden durch die Tragwiderstände aus Schritt 1) dividiert, um den jeweiligen Grad der Ausnutzung zu bestimmen.

Schritt 4) Darstellung der Versuchsergebnisse aus Schritt 2) und 3) in einem Koordinatensystem. Auf der vertikalen Diagrammachse ist die Feuerwiderstandsdauer abgetragen und auf der horizontalen Diagrammachse die jeweilige Ausnutzung bzgl. welcher die Datenmenge ausgewertet werden soll.

Schritt 5) Eine Exponentialfunktion wird auf Grundlage aller in dem Koordinatensystem dargestellten Datenpunkte aufgestellt.

Schritt 6) Die Exponentialfunktion wird durch den unterhalb am weitesten entfernten Datenpunkt verschoben.

Schritt 7) Anhand der Funktionsgleichung der verschobenen Exponentialfunktion erfolgt die Bestimmung der Ausnutzungen für die Feuerwiderstandsdauern von 60, 90 und 120 Minuten.

Schritt 8) Durch die in Schritt 7) festgelegten Feuerwiderstandsdauern für 60 und 90 Minuten wird eine Regressionsgrade gelegt.

Schritt 9) Mittels der Funktionsgleichung für die Regressionsgrade aus Schritt 8) erfolgt die Festlegung der Feuerwiderstandsdauer für 30 Minuten.

Zu Schritt 2):

Es resultiert der Datenpunkt auf der vertikalen Diagrammachse. Dieser Datenpunkt unterliegt wie die resultierenden Feuerwiderstandsdauern bei einer Feuerwiderstandsprüfung einer Streuung. Aus diesem Grund erfolgt eine gleiche Gewichtung aller Datenpunkte ohne Fixpunkte.

Zu Schritt 6):

Durch die Wahl der nach unten verschobenen Exponentialfunktion mit den Eigenschaften, dass mit zunehmender Feuerwiderstandsdauer geringere Ausnutzungen definiert werden, erfolgt für Feuerwiderstandsdauern jenseits der geprüften Dauern eine Festlegung auf der sicheren Seite. Durch die Verschiebung der Exponentialfunktion strebt diese nicht mehr den Zahlenwert 0 auf der vertikalen Diagrammachse für eine unendlich lange Feuerwiderstandsdauer an, sondern den Wert, um den die Exponentialfunktion verschoben wurde. Daraus ergeben sich je nach Versuchsdaten und Darstellung der Ausnutzung unterschiedlich lange Feuerwiderstandsdauern, bis die verschobene Exponentialfunktion die horizontale Achse schneidet.

Zu Schritt 9):

Gemäß Tab. 4.13 und Tab. 4.14 liegt für die Mehrheit der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und B ein Versagenszeitpunkt zwischen 39 Minuten und 89 Minuten vor. Des Weiteren existieren drei Prüfungen mit einer Feuerwiderstandsdauer von 105 Minuten (A3-MZ70-365mm-200kN), 129 Minuten (B1-MZ70-190mm-200kN) und 184 Minuten (B8-W07 UV-175mm-82kN). Für die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) können Tab. 4.15 hauptsächlich Feuerwiderstandsdauern zwischen 58 Minuten und 161 Minuten entnommen werden. Die Feuerwiderstandsprüfung C6-W07 V-365mm-460kN weist sogar eine Dauer von 198 Minuten auf. Demnach kann nur bedingt abgeschätzt werden, wie das Bauteilverhalten für Feuerwiderstandsdauern von 30 Minuten ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Auswertung gemäß EAD 330232-01-0601 [104] auf der sicheren Seite.

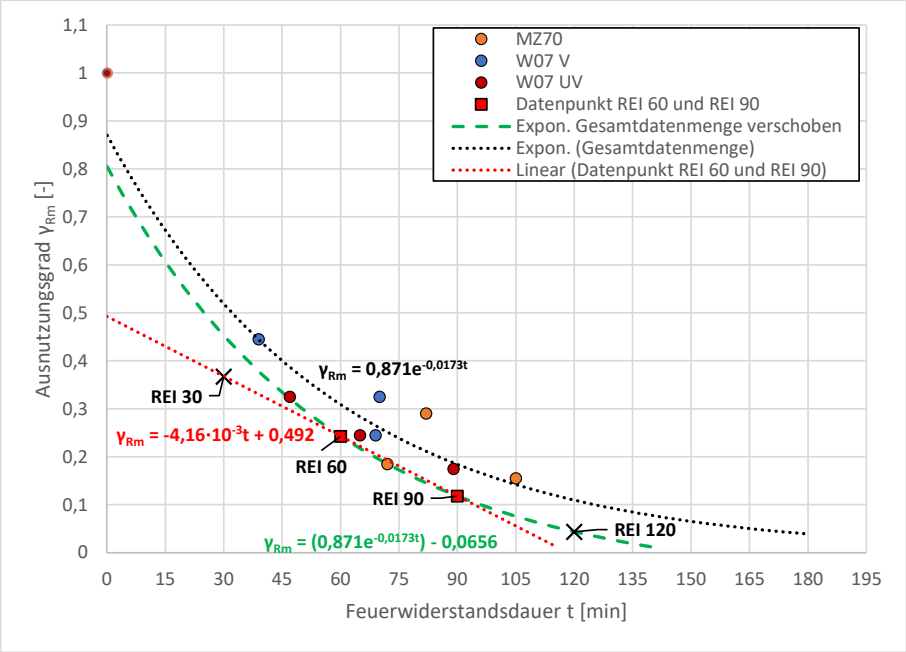


Abb. 5.18: Darstellung der gewählten Variante der Auswertung

Die in Abb. 5.18 verbildlichte Methode zur Festlegung von Feuerwiderstandsklassen für 30 bis 120 Minuten wird im nachfolgenden Verlauf für die Auswertung der Versuchsserien A bis C sowie zur Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen in Kapitel 6.3.1 verwendet. Aus dem gewählten Vorgehen werden Streuungen gemäß Kapitel 5.1.8 berücksichtigt. Eine zusätzliche Sicherheit ist gemäß Kapitel 5.1.5, dass Wände mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 3,0 m eine 1,37 bis 1,72-fach längere Feuerwiderstandsdauer aufweisen als die untersuchten Mauerwerkswände mit reduzierter Wandlänge (H x L = 3,0 m x 1,0 m). Auf Grundlage der grünen Exponentialfunktion kann in Abhängigkeit von der Datenmenge eine Klassifizierung der Ausnutzung für längere Feuerwiderstandsdauern als 120 Minuten erfolgen. Analog anhand der roten linearen Funktion für kürzere Feuerwiderstandsdauern als 30 Minuten.

5.3 Auswertung durchgeführter Feuerwiderstandsprüfungen gemäß DIN EN 1363-1 [11]

Bei den Feuerwiderstandsprüfungen der Kapitel 4.4.1 bis 4.4.4 konnten die Kriterien für die Tragfähigkeit (R), den Raumabschluss (E) sowie die Isolation (I) bis zum Bauteilversagen eingehalten werden. Das Durchbiegungskriterium besagt, dass Verformungen nach dem Aufbringen der Prüflast nur 30 mm aufweisen dürfen. Zudem ist ein Grenzwert von maximal 9 mm/min einzuhalten. Beide Kriterien wurden bei allen Feuerwiderstandsprüfungen eingehalten. Ebenso war der Raumabschluss stets sichergestellt. Ein Rauchaustritt konnte lediglich vereinzelt seitlich am freien Rand bei der Ver-

suchsserie C (Kapitel 4.4.3) mit den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) festgestellt werden. Die Temperaturdifferenz war im Mittel von der äußeren Oberfläche zur Raumtemperatur < 140 K bzw. an Einzelstellen < 180 K. Diese Grenzwerte gilt es gemäß DIN EN 1363-1 [11] einzuhalten. In Bezug auf die Raumtemperaturen wurden maximale Temperaturerhöhungen auf der äußeren Oberfläche über die verschieden langen Branddauern der unterschiedlich dicken Wände von < 50 K gemessen. [11]

5.3.1 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A und B

Die nachfolgende Auswertung bezieht sich auf die durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m aus Kapitel 4.4.1 (Versuchsserie A) und 4.4.2 (Versuchsserie B). Anlage E und F sind die aufgezeichneten Messdaten sowie weitere Informationen zu den einzelnen Feuerwiderstandsprüfungen zu entnehmen. Auf Grundlage von Kapitel 5.1.3 (Einfluss der Wandschlankheit) in Bezug auf die unterschiedlichen Wanddicken sowie der Streuung der Versuche gemäß Kapitel 5.1.8 (Variation der Versuchsergebnisse im Brandfall) und der geringen Versuchsanzahl erfolgt in Bezug auf Kapitel 5.1.9 (Vergleich der unterschiedlichen Ziegeltypen) eine gemeinsame Auswertung aller Ziegeltypen der Versuchsserien A und B. Tab. 5.4 und Tab. 5.5 sind die Bemessungswerte des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für jeden Ziegeltyp gemäß dem allgemeinen Nachweisverfahren aus Kapitel 2.2.5.1, welche aufgrund individueller Steinbreiten und unterschiedlichen charakteristischen Druckfestigkeiten des Mauerwerks f_k voneinander abweichen, zu entnehmen. Ebenso sind die berechneten Mittelwerte für den vertikalen Tragwiderstand N_{Rm} aufgeführt. Des Weiteren sind Tab. 5.4 und Tab. 5.5 die aufgebrachten Prüflasten $P_{gewählt}$, die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} und die Ausnutzungsgrade γ_{Rm} zu entnehmen. Aufgrund schwankender Prüflasten ($P_{gewählt}$) von ungefähr ± 1,0 kN während der Feuerwiderstandsprüfungen erfolgt eine Rundung dieser und der Tragwiderstände auf ganze Zahlen. Des Weiteren erfolgt in Tab. 5.4 und Tab. 5.5 die Auswertung der resultierenden Feuerwiderstandsklasse. In der nachfolgende Tab. 5.4 sind die Informationen für die Versuchsserie A der 0,365 m dicken Mauerwerkswände mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m aufgeführt.

Tab. 5.4: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wand-dicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	N_{Rm} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	γ_{Rm} [-]	Feuerwi-der-stands-dauer [min]	Versuchsbezeich-nung [-]
MZ70 (2,7)	364	650	1300	375	0,58	0,290	82 (REI 60)	A1-MZ70-365mm-375kN
MZ70 (2,7)	364	650	1300	240	0,37	0,185	72 (REI 60)	A2-MZ70-365mm-240kN
MZ70 (2,7)	364	650	1300	200	0,31	0,155	105 (REI 90)	A3-MZ70-365mm-200kN
W07 V (2,4)	362	574	1148	509	0,89	0,445	39 (REI 30)	A4-W07 V-365mm-509kN
W07 V (2,4)	362	574	1148	375	0,65	0,325	70 (REI 60)	A5-W07 V-365mm-375kN
W07 V (2,4)	362	574	1148	280	0,49	0,245	69 (REI 60)	A6-W07 V-365mm-280kN
W07 UV (2,4)	362	574	1148	375	0,65	0,325	47 (REI 30)	A7-W07 UV-365mm-375kN
W07 UV (2,4)	362	574	1148	280	0,49	0,245	65 (REI 60)	A8-W07 UV-365mm-280kN
W07 UV (2,4)	362	574	1148	200	0,35	0,175	89 (REI 60)	A9-W07 UV-365mm-200kN
W07 UV NG (2,4)	362	574	1148	375	0,65	0,325	16 (-)	A10-W07 UV NG-365mm-375kN
W07 UV NG (2,4)	362	574	1148	200	0,35	0,175	56 (REI 30)	A11-W07 UV NG-365mm-200kN
W07 UV NG (2,4)	362	574	1148	135	0,24	0,120	66 (REI 60)	A12-W07 UV NG-365mm-135kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$; Φ_m = Tab. 4.13	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)
$N_{Rm} = \frac{N_{Rd} \cdot \gamma_M}{x_m}$	mit $\gamma_M = 1{,}5$; $x_m = 0{,}75$	siehe Gleichung (5.12 & 5.14)
$\gamma_{Rm} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}}$		siehe Gleichung (5.10)

Gemäß Tab. 5.4 stehen die Versuchsergebnisse der Versuchsserie A teilweise im Widerspruch zueinander. Beispielsweise müsste die Feuerwiderstandsprüfung mit der Bezeichnung A1-MZ70-365mm-375kN eine kürzere Feuerwiderstandsdauer aufweisen als der geometrisch identische Versuchskörper mit der geringeren Prüflast (Versuch A2-MZ70-365mm-240kN). Bei zwei Feuerwiderstandsprüfungen mit dem kleingelochten verfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO konnten fast identische Versagenszeitpunkte festgestellt werden, obwohl diese mit unterschiedlicher Ausnutzung geprüft wurden (A5-W07 V-365mm-375kN und A6-W07 V-365mm-280kN). Die Ursache sind Streuungen in den Ergebnissen der Feuerwiderstandsprüfungen. Allgemein ist bei einer höheren Prüflast von einem früheren Versagenszeitpunkt auszugehen.

Bei einem direkten Vergleich der Feuerwiderstandsprüfungen mit dem kleingelochten unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO mit gedeckelter und nicht gedeckelter Lagerfuge ist festzustellen, dass die Versagenszeitpunkte der Probekörper bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi} mit nicht gedeckelten Lagerfugen deutlich geringer ausfallen. Anhand der Feuerwiderstandsdauern der Versuche mit der Bezeichnung A7-W07 UV-365mm-375kN im Vergleich zu A10-W07 UV NG-365mm-375kN und A9-W07 UV-365mm-200kN im Vergleich zu A11-W07 UV NG-365mm-200kN lässt sich eine Größenordnung von 1,6 bis 2,9-mal längeren Feuerwiderstandsdauern berechnen. Dieser Größenunterschied kann damit erklärt werden, dass sich bei den nicht gedeckelten Mauerwerkswänden ein Kamineffekt einstellen könnte, nachdem es dort zu Abplatzungen an zwei in der Höhe verschiedenen Stellen kommt. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Lagerfuge als eine Art Kühl- oder Verstärkungsrippe fungiert. In der weiteren Auswertung wurden die Feuerwiderstandsprüfungen der Mauerwerkswände ohne gedeckelte Mörtelfuge nicht weiter berücksichtigt, da diese nicht gemäß der Zulassung hergestellt wurden und im Vergleich zu den Mauerwerkswänden mit gedeckelten Mörtelfugen deutlich schlechtere Feuerwiderstände aufweisen. Es folgen in Tab. 5.5 die Informationen der Versuchsserie B. Die Probekörper mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m haben eine Dicke ungleich 0,365 m.

Tab. 5.5: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie B

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wand-dicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	N_{Rm} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	γ_{Rm} [-]	Feuerwider-standsdauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]
MZ70 (2,7)	190	293	586	200	0,68	0,340	129 (REI 120)	B1-MZ70-190mm-200kN
MZ70 (2,7)	190	293	586	200	0,68	0,340	86 (REI 60)	B2-MZ70-190mm-200kN
MZ70 (2,2)	239	320	640	200	0,63	0,315	48 (REI 30)	B3-MZ70-240mm-200kN
MZ70 (2,1)	497	696	1392	375	0,54	0,270	80 (REI 60)	B4-MZ70-490mm-375kN
W07 V (2,4)	175	233	466	200	0,86	0,430	58 (REI 30)	B5-W07 V-175mm-200kN
W07 V (2,4)	175	233	466	154	0,66	0,330	72 (REI 60)	B6-W07 V-175mm-154kN
W07 UV (2,4)	175	233	466	200	0,86	0,430	62 (REI 60)	B7-W07 UV-175mm-200kN
W07 UV (2,4)	175	233	466	82	0,35	0,175	184* (REI 180)	B8-W07 UV-175mm-82kN

*Kein Bauteilversagen nach 180 Minuten → Lasterhöhung bis zum Bauteilversagen bei 176,3 kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$; $\Phi_m =$ Tab. 4.14	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)
$N_{Rm} = \frac{N_{Rd} \cdot \gamma_M}{x_m}$	mit $\gamma_M = 1{,}5$; $x_m = 0{,}75$	siehe Gleichung (5.12 & 5.14)
$\gamma_{Rm} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}}$		siehe Gleichung (5.10)

Wie die Feuerwiderstandsdauern im Verhältnis zu den Ausnutzungsgraden γ_{Rm} und den Ausnutzungsfaktoren α_{fi} zeigen, lassen sich bei der Versuchsserie B stark voneinander abweichende Versuchsergebnisse bzw. Tendenzen zu stark streuenden Versuchsergebnissen identifizieren. Konkret kann dies an zwei Wänden festgestellt werden, die aus den Großkammerziegeln ThermoPlan MZ70 bestehen. Die beiden 0,190 m dicken Mauerwerkswände, welche beide mit 200 kN belastet wurden (B1-MZ70-190mm-200kN und B2-MZ70-190mm-200kN), müssten ohne Berücksichtigung der Streuung gleiche Versagenszeitpunkte aufweisen. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich eine Differenz der Feuerwiderstandsdauer von 43 Minuten berechnen.

Es folgt eine gemeinsame Auswertung der Versuchsserie A und B. Auf der vertikalen Diagrammachse in Abb. 5.19, die den Ausnutzungsfaktor α_{fi} repräsentiert, definiert der Datenpunkt bei $\alpha_{fi} = 1{,}0$ den Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für jeden Ziegeltyp. Bei der Bildung der schwarzen Exponentialfunktion wurde dieser Datenpunkt nur einmal berücksichtigt. Das gelb dargestellte Streuband in Abb. 5.19 definiert die Streuung um die schwarze Exponentialfunktion zu dem maximal entferntesten Datenpunkt.

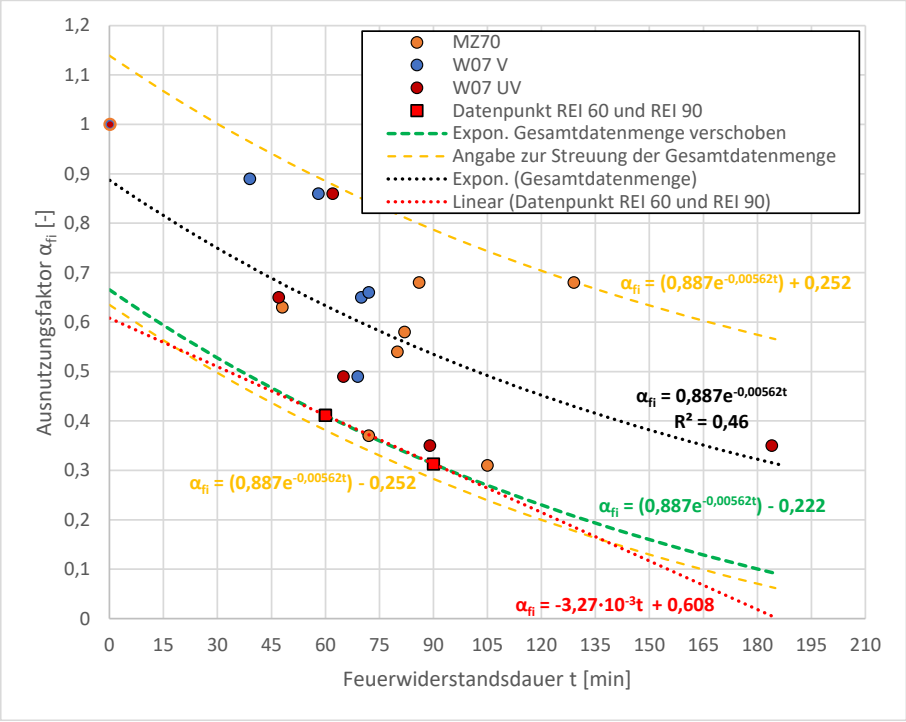


Abb. 5.19: Darstellung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserien A und B

In Abb. 5.19 sind mehrere mathematische Funktionsgleichungen dargestellt. Die Festlegung der Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für die jeweiligen Feuerwiderstandsdauern erfolgt analog zu dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 5.2.3. Die grüne Exponentialfunktion entspricht der schwarzen nur vertikal verschoben durch den unterhalb entferntesten angeordneten Datenpunkt. Anhand dieser werden nachfolgend die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für die Feuerwiderstandsdauer von 60, 90 und 120 Minuten definiert. Eine lineare Funktion, verlaufend durch die ermittelten Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für die Feuerwiderstandsdauer von 60 und 90 Minuten, dient zur Bestimmung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} für 30 Minuten. Tab. 5.6 sind die resultierenden Ausnutzungsfaktoren α_{fi} zu entnehmen.

Tab. 5.6: Resultierende Ausnutzungsfaktoren α_{fi} gemäß Abb. 5.19

Feuerwiderstands-dauer t [min]	Funktionsgleichung	Ausnutzungsfaktoren α_{fi} [-]
30	$\alpha_{fi} = -3{,}27 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 0{,}608$	0,51
60	$\alpha_{fi} = 0{,}887 \cdot e^{-0{,}00562 \cdot 60} - 0{,}222$	0,41
90	$\alpha_{fi} = 0{,}887 \cdot e^{-0{,}00562 \cdot 90} - 0{,}222$	0,31
120	$\alpha_{fi} = 0{,}887 \cdot e^{-0{,}00562 \cdot 120} - 0{,}222$	0,23

Wird anstelle des Ausnutzungsfaktors α_{fi} der Ausnutzungsgrad γ_{Rm} auf der vertikalen Diagrammachse abgetragen, resultiert die Abb. 5.20.

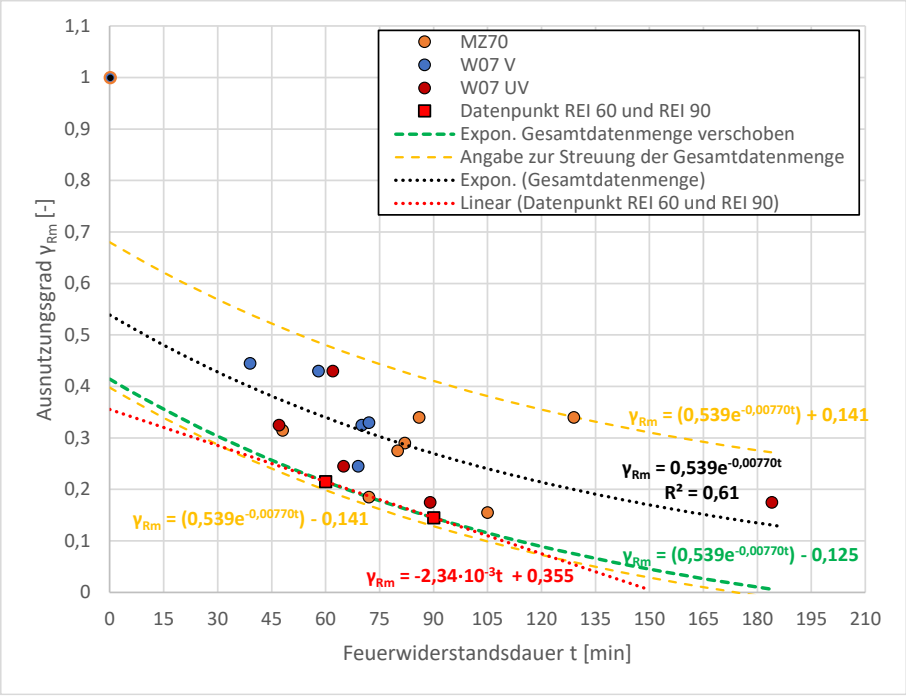


Abb. 5.20: Darstellung des Ausnutzungsgrade γ_{Rm} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserien A und B

In Tab. 5.7 sind die aus den mathematischen Funktionsgleichungen der Abb. 5.20 resultierenden Ausnutzungsgrade γ_{Rm} für die Feuerwiderstandsdauern 30, 60, 90 und 120 Minuten angegeben.

Tab. 5.7: Resultierende Ausnutzungsgrade γ_{Rm} gemäß Abb. 5.20

Feuerwiderstands-dauer t [min]	Funktionsgleichung	Ausnutzungsgrade γ_{Rm} [-]
30	$\gamma_{Rm} = -2{,}34 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 0{,}355$	0,28
60	$\gamma_{Rm} = 0{,}539 \cdot e^{-0{,}00770 \cdot 60} - 0{,}125$	0,21
90	$\gamma_{Rm} = 0{,}539 \cdot e^{-0{,}00770 \cdot 90} - 0{,}125$	0,14
120	$\gamma_{Rm} = 0{,}539 \cdot e^{-0{,}00770 \cdot 120} - 0{,}125$	0,09

5.3.2 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C

Es folgt in Tab. 5.8 die Auswertung für die durchgeführten kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen mit den Prüfkörperabmessungen von H x L = 1,5 m x 1,0 m aus dem Kapitel 4.4.3. Anlage G sind die aufgezeichneten Messdaten sowie weitere Informationen zu den einzelnen Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C zu entnehmen. Eine Auswertung auf Grundlage des Ausnutzungsfaktors α_{fi} ist im Hinblick auf die Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen sowie der Definition von Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m nicht notwendig. Des Weiteren gilt gemäß Kapitel 5.2, dass eine Auswertung auf Grundlage des Ausnutzungsfaktors α_{fi} für die Versuchsserie C nicht aussagekräftig ist, da Ausnutzungsfaktoren $\alpha_{fi} > 1{,}0$ resultieren. Es folgen für die Auswertung relevante Daten zur Berechnung des Ausnutzungsgrades γ_{Rm} sowie die Auswertung der Feuerwiderstandsklasse.

Tab. 5.8: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C gemäß γ_{Rm}

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wand-dicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	N_{Rm} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	γ_{Rm} [-]	Feuerwider-standsdauer [min]	Versuchsbezeichnung [-]
MZ70 (2,7)	364	655	1310	850	0,650	60 (REI 60)	C1-MZ70-365mm-850kN
MZ70 (2,7)	364	655	1310	700	0,535	124 (REI 120)	C2-MZ70-365mm-700kN
MZ70 (2,7)	364	655	1310	512	0,390	141 (REI 120)	C3-MZ70-365mm-512kN
MZ70 (2,7)	364	655	1310	375	0,285	161 (REI 120)	C4-MZ70-365mm-375kN
W07 V (2,4)	362	579	1158	512	0,440	58 (REI 30)	C5-W07 V-365mm-512kN
W07 V (2,4)	362	579	1158	460	0,395	198 (REI 180)	C6-W07 V-365mm-460kN
W07 V (2,4)	362	579	1158	425	0,365	145 (REI 120)	C7-W07 V-365mm-425kN
W07 V (2,4)	362	579	1158	365	0,315	128 (REI 120)	C8-W07 V-365mm-365kN
W07 UV (2,4)	362	579	1158	512	0,440	71 (REI 60)	C9-W07 UV-365mm-512kN
W07 UV (2,4)	362	579	1158	485	0,420	99 (REI 90)	C10-W07 UV-365mm-485kN
W07 UV (2,4)	362	579	1158	460	0,395	123 (REI 120)	C11-W07 UV-365mm-460kN
W07 UV (2,4)	362	579	1158	375	0,325	154 (REI 120)	C12-W07 UV-365mm-375kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$; $\Phi_m =$ Tab. 4.15	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)
$N_{Rm} = \frac{N_{Rd} \cdot \gamma_M}{x_m}$	mit $\gamma_M = 1{,}5$; $x_m = 0{,}75$	siehe Gleichung (5.12 & 5.14)
$\gamma_{Rm} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}}$		siehe Gleichung (5.10)

Die Ergebnisse mit dem kleingelochten verfüllten Ziegeln UNIPOR W07 CORISO sind teilweise widersprüchlich, da dort bei Versuchen mit höheren Ausnutzungsgraden γ_{Rm} längere Feuerwiderstandsdauern resultieren als bei geringeren. Dies deutet unter anderem auf stark streuende Versuchsergebnisse der Feuerwiderstandsprüfungen hin,

da bei ansteigender Ausnutzung frühere Versagenszeitpunkte auftreten müssten. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass identische Gegebenheiten bei den Feuerwiderstandsprüfungen vorliegen. Unterschiedliche Prüfbedingungen oder Einflussfaktoren können bei der Versuchsserie C ausgeschlossen werden. Es werden gemäß Kapitel 5.1.9 alle Versuchsdaten der unterschiedlichen Ziegeltypen in Abb. 5.21 zusammen dargestellt und ausgewertet. Auf der vertikalen Diagrammachse in Abb. 5.21, die den Ausnutzungsgrad γ_{Rm} repräsentiert, definiert der Datenpunkt bei γ_{Rm} = 1,0 den rechnerisch bestimmten Mittelwert des vertikalen Tragwiderstandes für den Kaltfall N_{Rm} für jeden Ziegeltyp. Dieser wurde nur einmal bei der Bildung der schwarzen Exponentialfunktion berücksichtigt. Das gelbe Streuband in Abb. 5.21 definiert die Streuung um die schwarze Exponentialfunktion zu dem maximal entferntesten Datenpunkt.

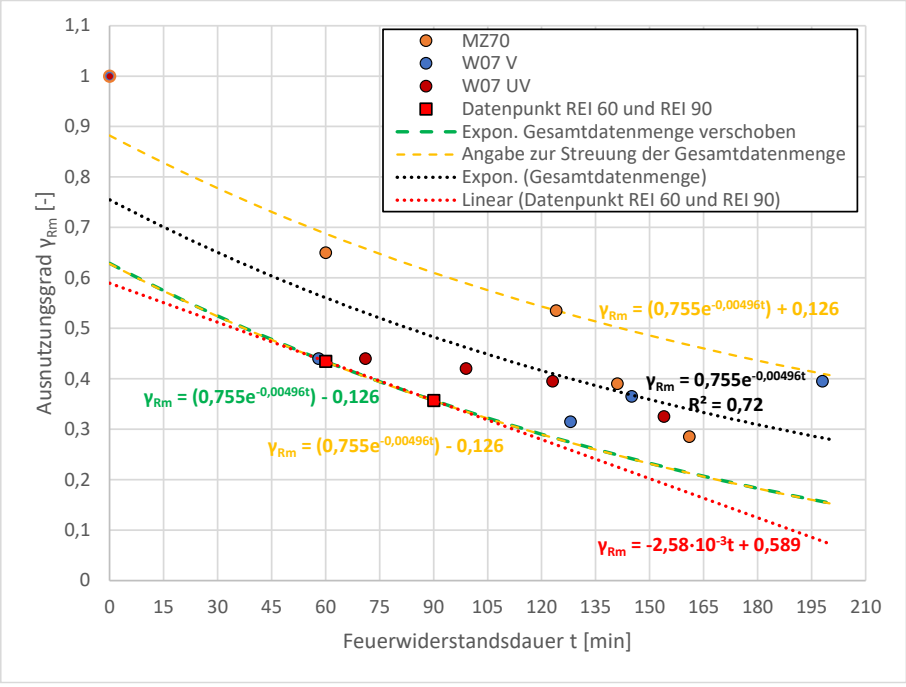


Abb. 5.21: Darstellung des Ausnutzungsgrades γ_{Rm} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserie C

Aus den in Abb. 5.21 angegebenen Funktionsgleichungen erfolgt in Tab. 5.9 die Auswertung der resultierenden Ausnutzungsgrade γ_{Rm} für die Feuerwiderstandsdauern von 30, 60, 90 und 120 Minuten gemäß dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 5.2.3.

Tab. 5.9: Resultierende Ausnutzungsgrade γ_{Rm} gemäß Abb. 5.21

Feuerwiderstands-dauer t [min]	Funktionsgleichung	Ausnutzungsgrad γ_{Rm} [-]
30	$\gamma_{Rm} = -2{,}58 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 0{,}589$	0,51
60	$\gamma_{Rm} = 0{,}755 \cdot e^{-0{,}00496 \cdot 60} - 0{,}126$	0,43
90	$\gamma_{Rm} = 0{,}755 \cdot e^{-0{,}00496 \cdot 90} - 0{,}126$	0,36
120	$\gamma_{Rm} = 0{,}755 \cdot e^{-0{,}00496 \cdot 120} - 0{,}126$	0,29

Für die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) der Versuchsserie C existieren versuchstechnisch bestimmte Tragwiderstände für den Kaltfall $N_{Rm,Versuch}$ (Tab. 4.12):

Großkammerziegel ThermoPlan MZ70: $N_{Rm,Versuch}$ = 1459,6 kN

UNIPOR W07 CORISO verfüllt: $N_{Rm,Versuch}$ = 1350,1 kN

UNIPOR W07 CORISO unverfüllt: $N_{Rm,Versuch}$ = 1030,2 kN

Allgemein sind die berechneten Mittelwerte für den Tragwiderstand N_{Rm} gemäß Tab. 5.8 ähnlich wie die versuchstechnisch bestimmten ($N_{Rm,Versuch}$). Dies spricht für eine realistisch angesetzte Streuung in Kapitel 5.2 von 15 % für die Umrechnung von charakteristischen Werten auf Mittelwertniveau in Bezug auf die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m). Wird anstelle des rechnerisch bestimmten Mittelwerts des vertikalen Tragwiderstandes für den Kaltfall N_{Rm} der versuchstechnisch ermittelte Tragwiderstand $N_{Rm,Versuch}$ zur Berechnung des Ausnutzungsgrades verwendet, resultieren die in Tab. 5.10 angegebenen Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$.

Tab. 5.10: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C gemäß $\gamma_{Rm,Versuch}$

Ziegel	$N_{Rm,Versuch}$ [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	$\gamma_{Rm,Versuch}$ [-]	Feuerwider-standsdauer [min]	Versuchsbezeichnung [-]
MZ70	1459,6	850	0,58	60 (REI 60)	C1-MZ70-365mm-850kN
MZ70	1459,6	700	0,48	124 (REI 120)	C2-MZ70-365mm-700kN
MZ70	1459,6	512	0,35	141 (REI 120)	C3-MZ70-365mm-512kN
MZ70	1459,6	375	0,26	161 (REI 120)	C4-MZ70-365mm-375kN
W07 V	1350,1	512	0,38	58 (REI 30)	C5-W07 V-365mm-512kN
W07 V	1350,1	460	0,34	198 (REI 180)	C6-W07 V-365mm-460kN
W07 V	1350,1	425	0,31	145 (REI 120)	C7-W07 V-365mm-425kN
W07 V	1350,1	365	0,27	128 (REI 120)	C8-W07 V-365mm-365kN
W07 UV	1030,2	512	0,50	71 (REI 60)	C9-W07 UV-365mm-512kN
W07 UV	1030,2	485	0,47	99 (REI 90)	C10-W07 UV-365mm-485kN
W07 UV	1030,2	460	0,45	123 (REI 120)	C11-W07 UV-365mm-460kN
W07 UV	1030,2	375	0,36	154 (REI 120)	C12-W07 UV-365mm-375kN
$\gamma_{Rm,Versuch} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm,Versuch}}$				in Anlehnung an Gleichung (5.10)	

Analog zu Abb. 5.21 resultiert die Abb. 5.22 in Bezug auf den Ausnutzungsfaktor $\gamma_{Rm,Versuch}$.

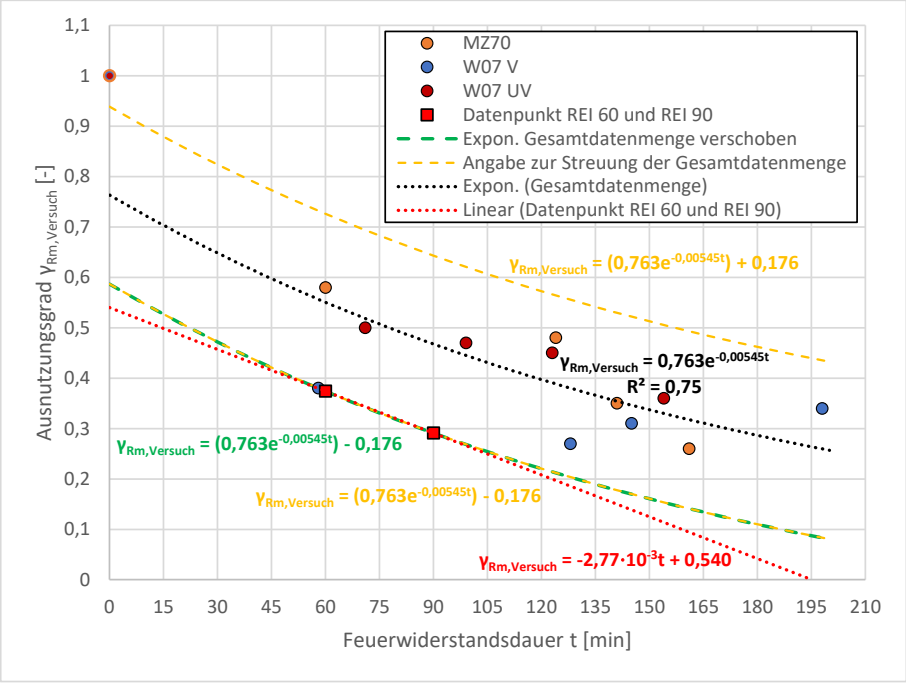


Abb. 5.22: Darstellung des Ausnutzungsgrades $\gamma_{Rm,Versuch}$ mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserie C

Die in Tab. 5.11 aufgeführten Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$ können mithilfe der in Abb. 5.22 aufgeführten mathematischen Funktionsgleichungen ermittelt werden.

Tab. 5.11: Resultierende Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$ gemäß Abb. 5.22

Feuerwider-standsdauer t [min]	Funktionsgleichung	Ausnutzungsgrad $\gamma_{Rm,Versuch}$[-]
30	$\gamma_{Rm,Versuch} = -2{,}77 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 0{,}540$	0,46
60	$\gamma_{Rm,Versuch} = 0{,}763 \cdot e^{-0{,}00545 \cdot 60} - 0{,}176$	0,37
90	$\gamma_{Rm,Versuch} = 0{,}763 \cdot e^{-0{,}00545 \cdot 90} - 0{,}176$	0,29
120	$\gamma_{Rm,Versuch} = 0{,}763 \cdot e^{-0{,}00545 \cdot 120} - 0{,}176$	0,22

Gemäß Tab. 5.9 und Tab. 5.11 sind die Ausnutzungsgrade γ_{Rm} auf Basis des berechneten charakteristischen Mittelwertes des vertikalen Tragwiderstandes höher als die aus den Bauteilversuchen resultierenden Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$. Dass aus dem berechneten vertikalen Tragwiderstand höhere Ausnutzungsfaktoren resultieren, liegt daran, dass der berechnete Mittelwert für den vertikalen Tragwiderstand im Kalt-

fall für den kleingelochten unverfüllten Ziegel UNIPOR W07 CORISO 191,6 kN geringer ist als der tatsächlich geprüfte. Für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 liegt der berechnete vertikale Tragwiderstand 149,2 kN unterhalb des versuchstechnisch bestimmten. Für den unverfüllten kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO konnte ein höherer Mittelwert für den vertikalen Tragwiderstand berechnet werden als aus Bauteilprüfungen vorliegt. Die Differenz beträgt 128,2 kN. Aus den unterschiedlichen Abweichungen und den daraus resultierenden Ausnutzungsgraden γ_{Rm} liegt der Datenpunkt für die Feuerwiderstandsprüfung C5-W07 V-365mm-512kN infolge der berechneten Mittelwerte der vertikalen Tragwiderstände näher an der schwarzen Exponentialfunktion der Gesamtdatenmenge, woraus diese geringfügiger nach unten verschoben wird und höhere Ausnutzungsgrade γ_{Rm} resultieren.

5.3.3 Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D

Die nachfolgende Auswertung bezieht sich auf die aufgeführten Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 3,0 m x 3,0 m) der Versuchsserie D aus Kapitel 4.4.4, welche zur Validierung dient. Es werden in Tab. 5.12 die Bemessungswerte des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} den berechneten Mittelwerten für den vertikalen Tragwiderstand im Kaltfall N_{Rm} gegenübergestellt. Weiter sind die aufgebrachten Prüflasten $P_{gewählt}$ sowie die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} und Ausnutzungsgrade γ_{Rm} aufgeführt. Für die durchgeführte Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m sind die aufgezeichneten Messdaten sowie weitere Informationen Anlage H zu entnehmen. Für die Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m sind diese dem Prüfbericht (2103/927/22)-FL [93] zu entnehmen.

Tab. 5.12: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D zur Validierung

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wanddicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	N_{Rm} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	γ_{Rm} [-]	Feuerwiderstandsdauer [min]	Versuchsbezeichnung [-]
MZ70 (2,7)	364	650	1300	200	0,31	0,155	181 (REI 180)	D1-MZ70-365mm-200kN/m
MZ70 (2,7)	364	650	1300	200	0,31	0,155	144 (REI 120)	D2-MZ70-365mm-200kN/m

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1{,}0\ m$; $\Phi_m =$ Tab. 4.16	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)
$N_{Rm} = \frac{N_{Rd} \cdot \gamma_M}{x_m}$	mit $\gamma_M = 1{,}5$; $x_m = 0{,}75$	siehe Gleichung (5.12 & 5.14)
$\gamma_{Rm} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rm}}$		siehe Gleichung (5.10)

Wie die Daten der Tab. 5.12 zeigen, weisen die Versuche unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern bei gleicher Prüflast sowie Ausnutzung auf. Um die Differenz einzuordnen, erfolgt ein Vergleich mit zwei Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie B aus Tab. 5.5 (B1-MZ70-190mm-200kN und B2-MZ70-190mm-200kN), welche ebenfalls gleiche Eigenschaften aufweisen. Gemäß Kapitel 5.1.8 weisen die beiden Versuche der Serie B eine größere prozentuale Differenz in Bezug auf die Feuerwiderstandsdauern auf. Aus diesem Grund wird ein Einfluss aus der Prüfvorrichtung bzw. dem Prüfinstitut auf die Ergebnisse ausgeschlossen.

6 Mindestfeuerwiderstandsklassen und erweiterter Anwendungsbereich

Es werden auf Grundlage der durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen an Mauerwerkswänden mit einer Länge von 1,0 m und einer Höhe von 3,0 m Mindestfeuerwiderstandsklassen gebildet. Anschließend werden für die Feuerwiderstandsklassen 30 bis 120 Minuten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m definiert. Für die Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmende Hochlochziegel werden die Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen von H x L = 3,0 m x 1,0 m bzgl. des Ausnutzungsfaktors α_{fi} ausgewertet. Dies ist nach aktuellem Stand der Technik der Faktor, nach welchem die Klassifizierung von wärmedämmenden Hochlochziegeln gemäß Zulassungen erfolgt. In Bezug auf die Ermittlung von Faktoren zur Lasterhöhung um äquivalente Feuerwiderstandsdauern mit einer kleinformatigeren Mauerwerkswand (H x L = 1,5 m x 1,0 m) und einem Prüfkörper nach DIN EN 1365-1 [5] (H x L = 3,0 m x 3,0 m) zu erzielen, werden gemäß Kapitel 5.2 die jeweils berechneten Ausnutzungsgrade γ_{Rm} bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$ gegenübergestellt.

6.1 Mindestfeuerwiderstandsklassen

Die Festlegung der Tabellenwerte für eine einfache und schnelle Klassifizierung des Feuerwiderstandes mit der Möglichkeit erhöhter Feuerwiderstandsdauern bei geringeren Ausnutzungsfaktoren α_{fi} bzw. höheren Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für geringere Feuerwiderstandsdauern beruht auf der Auswertung in Kapitel 5.3.1. In Bezug auf die Bildung von Mindestfeuerwiderstandsklassen ist ein weiteres Argument für eine gemeinsame Auswertung der unterschiedlichen Wanddicken der Versuchsserien A und B, dass andere Putze weniger flexibel sein können. Diese könnten aufgrund der größeren Verformungen der dünneren Mauerwerkswände gemäß Kapitel 5.1.3 im Brandfall zu einer stärkeren Rissbildung oder zu Abplatzungen neigen. Ist das darunterliegende Ziegelmauerwerk nicht mehr geschützt, können eher Abplatzungen von Ziegelstegen folgen, woraus kürzere Feuerwiderstandsdauern resultieren.

Die Abb. 6.1 zeigt die Auswertung der Feuerwiderstandsdauern in Abhängigkeit des Ausnutzungsfaktors α_{fi} der Versuchsserien A und B auf Grundlage von Abb. 5.19. Ebenfalls in der Abbildung dargestellt sind die Validierungsversuche der Versuchsserie D, welche aufgrund ihrer Prüfkörperlänge von 3,0 m statt 1,0 m längere Feuerwiderstandsdauern aufweisen. Gemäß dem in Kapitel 5.2.3 beschriebenem Vorgehen für die Auswertung resultiert aus der Gleichung (6.1) der Ausnutzungsfaktor α_{fi} der Mindestfeuerwiderstandsklasse für eine 30-minütige Brandbeanspruchung und aus der Gleichung (6.2) lassen sich die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für die Feuerwiderstandsklassen 60, 90 und 120 Minuten ermitteln.

Lineare Gleichung für den Ausnutzungsfaktor α_{fi} der Feuerwiderstandsklasse REI 30:

$$\alpha_{fi} = -3{,}27 \cdot 10^{-3} t + 0{,}608 \qquad (6.1)$$

Dabei ist:

t Feuerwiderstandsdauer in Minuten

Exponentielle Gleichung für die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} der Feuerwiderstandsklassen REI 60, REI 90 und REI 120:

$$\alpha_{fi} = (0{,}887e^{-0{,}00562t}) - 0{,}222 \quad (6.2)$$

Dabei ist:

t Feuerwiderstandsdauer in Minuten

Für die Klassifizierung der Feuerwiderstandsklasse wird immer abgerundet auf den nächsten durch 30 teilbaren Wert. Aus einer Feuerwiderstandsdauer von 59 Minuten resultiert demnach eine Klassifizierung für 30 Minuten. Des Weiteren sind in Abb. 6.1 die Ergebnisse der Feuerwiderstandsprüfungen aus den Prüfberichten des Kapitels 3 aufgeführt, um die festgelegten Mindestfeuerwiderstandsklassen aus der Versuchsserie A und B zu validieren.

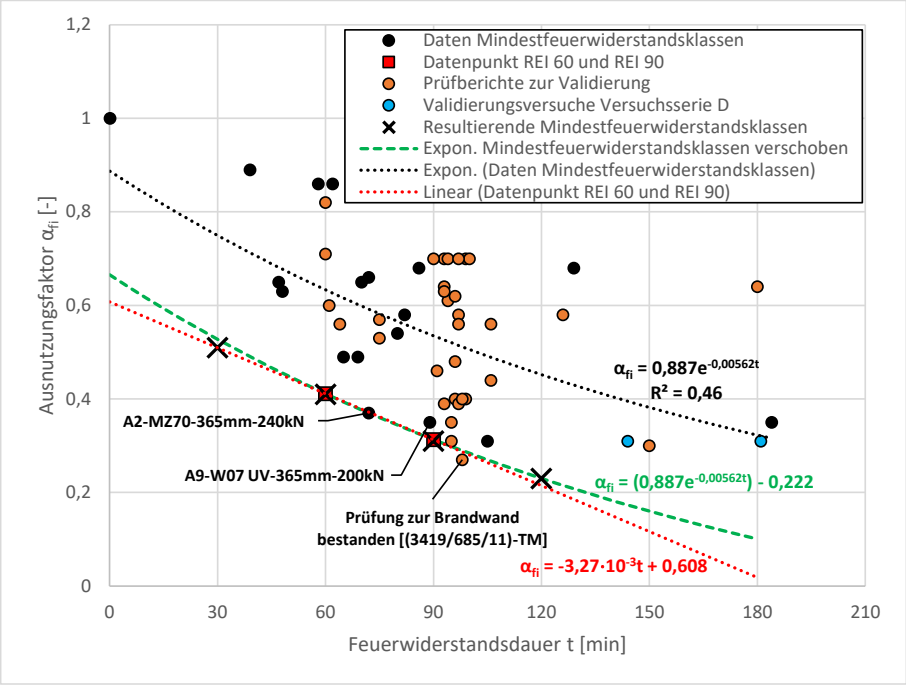


Abb. 6.1: Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmende Hochlochziegel

Gemäß Abb. 6.1 liegt nur ein orangener Datenpunkt unterhalb der grünen Exponentialfunktion. Bei dieser Prüfung handelt es sich gemäß Prüfbericht (3419/685/11)-TM [53] um eine Feuerwiderstandsprüfung, bei welcher die Mauerwerkswand kein Versagen nach der angegebenen Feuerwiderstandsdauer nach 98 Minuten aufwies, sondern nach 90 Minuten die Klassifizierung zu einer Brandwand gemäß DIN EN 1363-2 [12] erfolgte. Aus diesem Grund ist eine Unterschreitung der grünen Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) des Datenpunktes nicht bedenklich. Die Datenpunkte für die Feuerwiderstandsprüfungen A2-MZ70-365mm-240kN und

A9-W07 UV-365mm-200kN weisen geringere Ausnutzungsfaktoren α_{fi} auf als die Kennzeichnung für die resultierende Mindestfeuerwiderstandsklasse bei einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten (α_{fi} = 0,41), welches die resultierende Feuerwiderstandsklasse für diesen Zeitpunkt darstellt. Den beiden Versuchen wird unterstellt, dass diese bei einem höheren Ausnutzungsfaktor von α_{fi} = 0,41 mindestens eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten aufweisen. Für die Feuerwiderstandsprüfung A2-MZ70-365mm-240kN entspricht dies bei einem 10 % höheren Ausnutzungsfaktor α_{fi} einer 14 % geringeren Feuerwiderstandsdauer. Bei der Feuerwiderstandsprüfung A9-W07 UV-365mm-200kN wäre es eine Erhöhung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} um 16 % und eine 32 % geringere Feuerwiderstandsdauer.

Die schwarzen Datenpunkte der Abb. 6.1 zur Erstellung der Mindestfeuerwiderstandsklassen weisen bzgl. der Feuerwiderstandsdauer einen Mittelwert von 80 Minuten auf. Die Standardabweichung σ ist ein Maß für die Streubreite der Werte um den Mittelwert. Für die schwarzen Datenpunkte beträgt die Standardabweichung σ = 34,59. Aus Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert resultiert ein Variationskoeffizient von VK = 0,43 was einer Streuung bezogen auf den Mittelwert von 43 % entspricht. Der Mittelwert für den Ausnutzungsfaktor α_{fi} beträgt μ = 0,59. Bei einer Standardabweichung von σ = 0,18 kann ein Variationskoeffizient von 0,31 (≙ 31 %) berechnet werden. Aus den schwarzen Datenpunkten resultiert die Gleichung (6.3).

$$\alpha_{fi} = 0{,}887e^{-0{,}00562t} \tag{6.3}$$

Dabei ist:

t Feuerwiderstandsdauer in Minuten

Für diese kann aufgrund der zuvor definierten Streuungen der Eingangsdaten ein Bestimmtheitsmaß von R^2 = 0,46 berechnet werden. Die vertikalen Abstände für den Ausnutzungsfaktor α_{fi} der schwarzen Datenpunkte in Abb. 6.1 zur grünen Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) betragen im Mittel μ = 0,24. Die Standardabweichung kann zu σ = 0,15 bestimmt werden und der Variationskoeffizient beträgt VK = 0,64 (≙ 64 %).

Es wird angenommen, dass die bei einer Feuerwiderstandsprüfung resultierenden Feuerwiderstandsdauern bei gleichem Ausnutzungsfaktor normalverteilt sind. Werden die Versuchsdaten bzgl. derem vertikalen Abstand zur grünen Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) gemäß Abb. 6.1 in Abhängigkeit von der Häufigkeit der vorkommenden Abstände dargestellt, ergibt sich die Anordnung der Datenpunkte gemäß Abb. 6.2. Es folgt die Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung in Abhängigkeit von dem Mittelwert μ und Standardabweichung σ.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \tag{6.4}$$

Dabei ist:

μ Mittelwert

σ Standardabweichung

Der Mittelwert für die vertikalen Abstände zur grünen Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) ist μ = 0,24 und die Standardabweichung beträgt σ = 0,15. In Abb. 6.2 ist die Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung dargestellt.

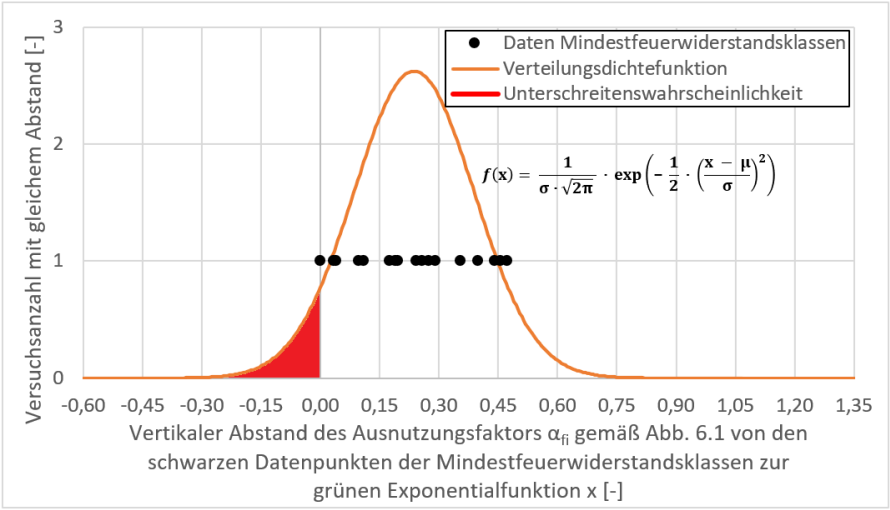


Abb. 6.2: Abstände und Verteilungsdichtefunktion

Gemäß Abb. 6.2 beträgt der Inhalt der rot eingefärbten Fläche unter der Verteilungsdichtefunktion 5 %. Dies ist die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die schwarzen Datenpunkte die grüne Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) gemäß Abb. 6.1 unterschreiten.

Tab. 6.1 zeigt die festgelegten Mindestfeuerwiderstandsklassen auf Grundlage der Abb. 6.1. Die Mindestwanddicke von 175 mm entspricht der kleinsten geprüften Wanddicke bei den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen, welche es mindestens einzuhalten gilt. Die Anwendungsbedingungen sind in Tab. 6.3 definiert.

Tab. 6.1: Mindestfeuerwiderstandsklassen

Mindestwanddicke für wärmedämmende Hochlochziegel zur Einstufung in Feuerwiderstandsklassen bei zentrischer Lasteinleitung und einseitiger Brandbeanspruchung				
Ausnutzungsfaktor α_{fi}	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120
$\alpha_{fi} \leq 0{,}51$	(≥ 175 mm)	-	-	-
$\alpha_{fi} \leq 0{,}41$	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)	-	-
$\alpha_{fi} \leq 0{,}31$	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)	-
$\alpha_{fi} \leq 0{,}23$	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)	(≥ 175 mm)
Wanddicken in (): Beidseitig verputzt mit einer ≥ 15 mm dicken Putzschicht mit besseren oder gleichen Eigenschaften in Bezug auf den Feuerwiderstand gemäß Kapitel 4.1.5				

In Tab. 6.1 werden die Feuerwiderstandsklassen mit den Buchstaben REI angegeben. Das R steht für die Tragfähigkeit der Mauerwerkswand und die dahinterstehende Zahl gibt die Feuerwiderstandsdauer in Minuten an. Die Versuche haben gezeigt, dass zu keinem Zeitpunkt einer Prüfung Rauch durch die beidseitig verputze Mauerwerkswand gedrungen ist (Kriterium E). Ebenso war die Temperaturerhöhung auf der Wandrückseite aufgrund der guten Dämmwirkung der Ziegel so gering, dass das Isolationskriterium auch bei jeder Feuerwiderstandsprüfung eingehalten wurde (Kriterium I). Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} des Mauerwerks im Kaltfall, der

für die Berechnung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} benötigt wird, ist gemäß des allgemeinen Nachweisverfahrens (DIN EN 1996-1-1 [13]) zu berechnen.

Es folgen die Anwendungsbedingungen für die in Tab. 6.1 festgelegten Ausnutzungsfaktoren. Diese wurden in Anlehnung an DIN EN 15080-12 [67] und DIN EN 1996-1-2 [6] definiert. DIN EN 15080-12 [67] beschreibt den erweiterten Anwendungsbereich von Ergebnissen aus Feuerwiderstandsprüfungen. In beiden Normen sind zudem Eigenschaften auflistet, die einen Einfluss auf die Feuerwiderstandsdauer haben. Ebenso werden gewonnene Erkenntnisse aus Kapitel 2, 3, 4 und 5.1 berücksichtigt. Die Art der Lochung kann gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] einen Einfluss auf den Feuerwiderstand haben. Aus diesem Grund wird auf der sicheren Seite liegend nachfolgend zwischen Großkammerziegeln und kleingelochten Ziegeln unterschieden, obwohl im Rahmen der Dissertationsschrift eine gemeinsame Auswertung erfolgte. Die ziegelbezogenen Eigenschaften in Tab. 6.2 stammen aus den Prüfzeugnissen der Anlage B. Für den Großkammerziegel wurden aus den unterschiedlichen Ziegelbreiten resultierend immer die jeweilige Angabe für die größtmögliche Übertragung aufgeführt. Eine Unterteilung bei den kleingelochten Ziegeln in Hinblick auf verfüllte und unverfüllte Ziegel erfolgt aufgrund der Erkenntnisse des Kapitels 5.1.9 nicht.

Tab. 6.2: Anwendungsbedingungen der Mindestfeuerwiderstandsklassen

Eigenschaften	Großkammerziegel	Kleingelochter Ziegel
Nennmaße der Mauersteine	L = 248 ± 6 mm; H = 249 ± 1 mm	L = 247 ± 4 mm; H = 249 ± 1 mm
Mittelwert der Brutto-Trockenrohdichte der Ziegel	≥ 549 kg/m^3	≥ 789 kg/m^3
Charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k	≥ 2,1 N/mm^2 (Tab. 4.3)	≥ 2,4 N/mm^2 (Tab. 4.4)
Mörtelauftrag Lagerfugen	Gedeckelt aufgetragener Dünnbettmörtel	Gedeckelt aufgetragener Dünnbettmörtel
Art der Stoßfuge	unvermörtelt	unvermörtelt
Schlankheit der Wand	≤ 12,86	≤ 12,86
Lastexzentrizität	Zentrische Lasteinleitung	Zentrische Lasteinleitung
Brandeinwirkung	Raumabschließend	Raumabschließend
Gesamtlochquerschnitt	≤ 63,4 %	≤ 62,1 %
Dicke der Innenlängsstege	≥ 13,1 mm	≥ 6,3 mm
Dicke der Innenquerstege	≥ 7,6	≥ 5,4 mm
Dicke der Außenlängsstege	≥ 13,1 mm	≥ 9,2 mm
Dicke der Außenquerstege	≥ 8,6 mm	≥ 6,6 mm
Dicke der Diagonalstege	-	≥ 5,1
Summe der Stegdicken	≥ 106 mm/m	≥ 128 mm/m
Dämmstofffüllung	Mineralwolle	Keine bzw. Mineralwolle
Form des Lochquerschnitts	(Abgerundetes) Quader (Randbereiche ausgenommen)	(Abgerundetes) Quader (Randbereiche ausgenommen)

In Kapitel 4.1.1 wurde ein Ziegel untersucht, der mit reiner Holzfaser verfüllt war. In Bezug auf die Spannungen aus Temperatur wurde dieser Ziegel als unbedenklicher eingestuft als der mit Mineralwolle verfüllte. Bei diesen Untersuchungen konnte nicht festgestellt werden, wie stark die brennbare Dämmstofffüllung zu einer Rauchentwicklung bei einer Feuerwiderstandsprüfung an einer Mauerwerkswand beiträgt. Aus diesem Grund schließt die Tab. 6.2 eine Holzfaserfüllung aus. Grifflöcher in der Ziegelstruktur bei kleingelochten unverfüllten wärmedämmenden Hochlochziegeln werden über den Gesamtlochquerschnitt und die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k berücksichtigt. Des Weiteren wurden Grifflöcher sowie alternative Steganordnungen zu denen der in der Dissertation geprüften Ziegel (siehe Abb. 4.4 und Abb. 4.5)

durch einen Abgleich der Mindestfeuerwiderstandsklassen mit den Prüfberichten aus Kapitel 3 berücksichtigt (siehe Abb. 6.1).

Zur Absicherung der in dieser Dissertationsschrift erstellten Tabellenwerte werden die ermittelten Ausnutzungsfaktoren α_{fi} der Feuerwiderstandsklassen mit den Ergebnissen der ausgewerteten Prüfberichte aus Kapitel 3 verglichen. Anhand der Abb. 6.1 kann festgestellt werden, dass die Ausnutzungsfaktoren α_{fi} der Tab. 6.1 auf der sicheren Seite liegen. Anhand von dem nachfolgenden Beispiel wird dies exemplarisch aufgezeigt. In dem Prüfbericht (3297/050/09)-TM [42] wurde für den dort untersuchten Ziegel im Rahmen einer Feuerwiderstandsprüfung aufgrund von einem Bauteilversagen eine Empfehlung für eine Klassifizierung von REI 60 mit einem Ausnutzungsfaktor von $\alpha_{fi} = 0{,}53$ empfohlen. Gemäß Tab. 6.1 hätte ohne eine Feuerwiderstandsprüfung eine identische Klassifizierung von REI 60 mit einem Ausnutzungsfaktor von $\alpha_{fi} = 0{,}41$ auf der sicheren Seite liegend getätigt werden können.

Es besteht die Möglichkeit, dass mit jeder weiteren Feuerwiderstandsprüfung ein Ergebnis vorliegt, welches einen neuen maximalen Abstand zur der in Abb. 6.1 dargestellten Exponentialfunktion gemäß der Gleichung (6.3) definiert. Demnach müsste die Gleichung (6.2) in Abb. 6.1 dann weiter nach unten verschoben werden, woraus geringere Ausnutzungsfaktoren α_{fi} für die Feuerwiderstandsklassen in Tab. 6.1 resultieren würden. Es wurden nur 1,0 m lange Mauerwerkswände zur Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen in Tab. 6.1 berücksichtigt. Zwei Validierungsversuche an 0,365 m dicken und 3,0 m langen Wänden haben gezeigt, dass die Ergebnisse der 1,0 m langen Wände in Bezug auf die Bildung der Mindestfeuerwiderstandsklassen aufgrund kürzerer Feuerwiderstandsdauern auf der sicheren Seite liegen (siehe Kapitel 5.1.5). Anhand der beiden Validierungsversuche konnte ein Faktor von 1,37 bis 1,72 als zusätzliche Sicherheit für längere Feuerwiderstandsdauern 3,0 m langer Wände in Bezug auf die Auswertung und Erstellung der Tab. 6.1 berechnet werden. Dieser Faktor basiert nur auf zwei Versuchsergebnissen mit einer Wanddicke von 0,365 m und zeigt nur eine Tendenz auf. Bei einer Berücksichtigung der geringeren Prüfkörperlänge in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Datenpunkte in Abb. 6.1 die grüne Exponentialfunktion (Gleichung (6.2)) unterschreiten, resultieren je nach angesetztem Faktor für die längere Prüfdauer geringere Wahrscheinlichkeiten. Bei einer Multiplikation der Feuerwiderstandsdauern mit dem Faktor 1,37 kann gemäß dem beschriebenen Vorgehen eine Wahrscheinlichkeit von 1 % für ein Unterschreiten berechnet werden. Eine Verrechnung eines Faktors für eine zusätzliche Sicherheit in Bezug auf die erstellten Mindestfeuerwiderstandsklassen ist demnach nicht vorgesehen.

Dass die Tabellenwerte für Wände mit einer geringen Wanddicke (< 0,365 m) bei einer Länge von 3,0 m statt 1,0 m nicht auf der unsicheren Seite liegen, wurden zur Überprüfung alle vorliegenden Prüfberichte mit einer Wanddicke ≤ 0,240 m bei einer Wandlänge von 3,0 m analysiert ((3197/6895)-TM [56] (0,115 m Wanddicke, $\alpha_{fi} = 0{,}30$), (3001/106/12)-TM [58] (0,175 m Wanddicke, $\alpha_{fi} = 0{,}70$) und (2100/457/15)-Wein [97] (0,240 m Wanddicke, $\alpha_{fi} = 0{,}70$)). Bei diesen Feuerwiderstandsprüfungen konnten Feuerwiderstandsdauern größer 90 Minuten trotz teilweise höherer Ausnutzungsfaktoren α_{fi} ermittelt werden. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Tabellenwerte auch für Feuerwiderstandsprüfungen mit einer Wandlänge von 3,0 m und einer Dicke < 0,365 m auf der sicheren Seite liegen. Prüfberichte von 3,0 m langen Wänden mit einer Dicke von > 0,365 m liegen nicht vor.

In der Praxis wird der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} für Mauerwerkswände bei einem Gebäude in der Regel nicht in Hinblick auf eine Feuerwiderstandsprüfung berechnet. Aus diesem Grund wird bei der Berechnung des Bemessungswerts der Druckfestigkeit des Mauerwerks f_d der Dauerstandsfaktor ζ gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [28] nicht mit 1,0 sondern mit 0,85 angesetzt. Daraus ergibt sich ein um 17,6 % höherer Tragwiderstand [31]. Des Weiteren kann bei einer Gebäudewand zwischen ständigen und veränderlichen Einwirkungen differenziert werden, was eine genaue Berechnung des Reduktionsfaktor η_{fi} für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall zulässt. Aus einer üblichen Annahme von 1:4 für die maßgebende veränderliche Last zu der ständig wirkenden Last, resultiert gemäß DIN EN 1996-1-2 [6] ein Reduktionsfaktor von η_{fi} = 0,65. Bei einer Feuerwiderstandsprüfung werden pauschal gemäß DIN EN 1996-1-2/ NA [7] η_{fi} = 0,70 angesetzt. Unter Berücksichtigung des Dauerstandfaktors ζ und des genau berechneten Reduktionsfaktors η_{fi} ergibt sich folgender Ausnutzungsfaktor α_{fi} für eine im Kaltfall zu 100 % ausgenutzte Wand ($N_{Ed} = N_{Rd}$):

$$\alpha_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} = \frac{\eta_{fi} \cdot N_{Ed}}{\zeta \cdot N_{Rd(Gebäude)}} = \frac{0{,}65 \cdot N_{Ed}}{1{,}176 \cdot N_{Rd(Gebäude)}} = 0{,}55 \tag{6.5}$$

Wird der Tragwiderstand einer Mauerwerkswand die Anforderungen an den Brandschutz hat nicht zu 100 % ausgenutzt, resultieren geringere Ausnutzungsfaktoren α_{fi}, welche der verwendete Ziegel für eine Klassifizierung des Feuerwiderstandes aufweisen muss.

6.2 Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m

Das horizontale Verformungsverhalten von Mauerwerkswänden nimmt durch die Reduzierung der Wandhöhe deutlich ab, wodurch die Gesamttragfähigkeit der Mauerwerkswand gesteigert wird. Aus diesem Grund besitzt die Schlankheit, welche als Quotient der effektiven Höhe dividiert durch die effektive Wanddicke definiert ist, einen großen Einfluss auf die Stabilität und Tragfähigkeit einer auf Druck beanspruchten Mauerwerkswand. Soll eine Feuerwiderstandsprüfung an einer Mauerwerkswand mit den Prüfkörperabmessungen von H x L = 1,5 m x 1,0 m (1,25 m beflammte Höhe) äquivalente Ergebnisse in Bezug auf die Feuerwiderstandsfähigkeit einer Mauerwerkswand gemäß DIN EN 1365-1 [5] (H x L = 3,0 m x 3,0 m) aufweisen, muss während der Prüfung bzw. bei der Auswertung die Schlankheit berücksichtigt werden.

Großformatige Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge gemäß DIN EN 1365-1 [5] sind sehr zeit- und kostenintensiv. Im Rahmen dieses Kapitels wird überprüft, inwiefern anhand von kleinformatigeren Prüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit einer beflammten Höhe von 1,25 m gleichwertige Ergebnisse in Bezug auf die Feuerwiderstandsfähigkeit für wärmedämmende Hochlochziegel mittels Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gewonnen werden können. Durch die Verkleinerung der Prüfkörper reduziert sich der Arbeitsaufwand, außerdem können die Kosten für das Material und die fossilen Brennstoffe gesenkt werden. Ebenso resultieren aus der kleineren Prüfkörpergeometrie der Mauerwerkswände mehr Prüfstellen für die Klassifizierung des Feuerwiderstandes.

Die Festigkeit von wärmedämmenden Hochlochziegeln nimmt immer weiter zu. Eine Vielzahl der Prüfinstitute kann keine Feuerwiderstandsprüfungen mit Prüflasten > 2000 kN durchführen. Bei einer Verkleinerung der Prüfkörperlänge von 3,0 m auf 1,0 m reduziert sich die Prüflast im Verhältnis der Wandlänge. Bei Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung kleiner drei ergibt sich daraus eine Reduzierung der Prüflast. Demnach könnten höhere Ausnutzungen bzw. hochfestere Ziegel geprüft werden. In Bezug auf die Prüfung zur Eignung einer Brandwand müssten weitere Untersuchungen zeigen, ob die kleinformatigeren Feuerwiderstandsprüfungen äquivalente Ergebnisse liefern. Brandwände dienen unter anderem zur Unterteilung von ausgedehnten Gebäuden mit einer Länge von > 40 m [3]. Wärmedämmende Hochlochziegel werden hauptsächlich bei Außenwänden verbaut. Demnach ist eine Eignung zur Brandwand für diese Ziegel in Bezug auf innere Brandwände nicht zwingend erforderlich. Äußere Brandwände sind erforderlich, wenn beispielsweise eine Grenzbebauung vorliegt und die Gefahr eines Flammenüberschlags besteht.

Tab. 6.3 enthält auf Grundlage der Erkenntnisse aus Kapitel 5.2 eine Gegenüberstellung der ermittelten Ausnutzungsgrade γ_{Rm} (Ausnutzungsgrad aus berechnetem vertikalen Tragwiderstand auf Mittelwertniveau) bzw. $\gamma_{Rm,Versuch}$ (Ausnutzungsgrad aus dem vertikalen Tragwiderstand, ermittelt aus Bauteilprüfungen) für die 1,0 m langen Wände mit unterschiedlichen Prüfkörperhöhen. Die Berechnung der Ausnutzungsgrade ist der Gleichung (5.10) zu entnehmen. Für die 1,5 m hohen Wände erfolgt neben einer Berechnung des Ausnutzungsgrades γ_{Rm} auch eine Ermittlung von $\gamma_{Rm,Versuch}$ auf Grundlage des versuchstechnisch bestimmten Mittelwertes des vertikalen Tragwiderstandes $N_{Rm,Versuch}$. Die Tab. 6.3 fasst die resultierenden Ausnutzungsgrade aus Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 zusammen, welche für weitere Berechnungen benötigt werden.

Tab. 6.3: Zusammenfassung der Ausnutzungsgrade γ_{Rm} und $\gamma_{Rm,Versuch}$

Feuerwiderstandsklasse	Versuchsserie A und B (H x L = 3,0 m x 1,0 m) Ausnutzungsgrad γ_{Rm} (Tab. 5.7)	Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m) Ausnutzungsgrad γ_{Rm} (Tab. 5.9)	Versuchsserie C (H x L = 1,5 m x 1,0 m) Ausnutzungsgrad $\gamma_{Rm,Versuch}$ (Tab. 5.11)
REI 30	0,28	0,51	0,46
REI 60	0,21	0,43	0,37
REI 90	0,14	0,36	0,29
REI 120	0,09	0,29	0,22

Es folgt die Berechnung von Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse von den kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen H x L = 1,5 m x 1,0 m (1,25 m beflammte Höhe) auf Mauerwerkswände mit den Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge bei einer einseitigen Brandbeanspruchung. Auf der sicheren Seite liegend erfolgt in Tab. 6.4 jeweils für den größeren Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung (unterstrichener Wert), in Bezug auf die Schwankungen der Prüflast bei einer Feuerwiderstandsprüfung, eine Aufrundung auf das nächste Zehntel.

Tab. 6.4: Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.3

Feuerwiderstandsklasse	Berechnung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung auf Basis γ_{Rm} für H x L = 1,5 m x 1,0 m	Berechnung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung auf Basis $\gamma_{Rm,Versuch}$ für H x L = 1,5 m x 1,0 m	Größerer aufgerundeter Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung
REI 30	0,51 / 0,28 = 1,82	0,46 / 0,28 = 1,64	1,90
REI 60	0,43 / 0,21 = 2,05	0,37 / 0,21 = 1,76	2,10
REI 90	0,36 / 0,14 = 2,57	0,29 / 0,14 = 2,07	2,60
REI 120	0,29 / 0,09 = 3,22	0,22 / 0,09 = 2,44	3,30

Die Ergebnisse der Tab. 6.4 zeigen, dass mit zunehmender Feuerwiderstandsdauer die Feuerwiderstandsprüfungen an den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit einer zunehmend höheren Normalkraftbeanspruchung geprüft werden müssen, um äquivalente Feuerwiderstandsdauern zu erhalten. Ob eine Kompensation durch geringere Wanddicken für gleiche Schlankheiten möglich ist, müssten weitere Untersuchungen zeigen. Es wird immer der größere Faktor maßgebend, welcher sich gemäß Tab. 6.4 aus dem rechnerisch ermittelten vertikalen Tragwiderstand für die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) bestimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass die rechnerisch ermittelten Tragwiderstände für diese Prüfkörpergeometrie auf der sicheren Seite liegen.

Eine alternative Ermittlung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung beruht darauf, dass Feuerwiderstandsdauern der Versuchsserie A und C aufgrund gleicher Wanddicken und verwendeter Ziegel gegenübergestellt werden. Es wird in Tab. 6.5 immer den Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C mit den Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) ein Versuch der Serie A gegenübergestellt, welcher eine minimal längere Feuerwiderstandsdauer aufweist. Da keine Prüfdauern > 105 Minuten für die Versuchsserie A existieren, bleiben vier Versuche für eine Ermittlung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung übrig. Auf Grundlage der Prüfdauer bis zum Bauteilversagen bei den Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C ergibt sich die Feuerwiderstandsklasse, für welche der Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung gilt. Ein Faktor für die Feuerwiderstandsklasse REI 120 kann anhand fehlender Versuchsdaten nicht definiert werden.

Tab. 6.5: Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung aus Versuchsabgleich 0,365 m dicker Wände

Versuchsbezeichnung [-]	Prüfkörperabmessungen H x L [m]	$P_{gewählt}$ [kN]	Feuerwiderstandsdauer [min]	Feuerwiderstandsklasse	Aufgerundete Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung
C5-W07 V-365mm-512kN	1,5 x 1,0	512	58	REI 30	512 kN / 280 kN = 1,9
A8-W07 UV-365mm-280kN	3,0 x 1,0	280	65		
C9-W07 UV-365mm-512kN	1,5 x 1,0	512	71	REI 60	850 kN / 280 kN = 2,2
A2-MZ70-365mm-240kN	3,0 x 1,0	240	72		
C1-MZ70-365mm-850kN	1,5 x 1,0	850	60	REI 60	850 kN / 280 kN = 3,1
A8-W07 UV-365mm-280kN	3,0 x 1,0	280	65		
C10-W07 UV-365mm-485kN	1,5 x 1,0	485	99	REI 90	850 kN / 280 kN = 2,5
A3-MZ70-365mm-200kN	3,0 x 1,0	200	105		

Für die Feuerwiderstandsklasse REI 60 sind in Tab. 6.5 zwei Faktoren aufgeführt. Die Differenz der Faktoren beträgt 0,9 und ist darauf zurückzuführen, dass die Feuerwiderstandsprüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit dem Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 gemäß Kapitel 5.1.9 sehr lange Feuerwiderstandsdauern bei hoher Ausnutzung aufweisen. Dies liegt unter anderem maßgebend an dem Versuch C1-MZ70-365mm-850kN, welcher in der Tab. 6.5 aufgeführt ist und bei der Berechnung des Faktors 3,1 einfließt. Als Ausreißer kann dieser Versuch nicht identifiziert werden. Es folgt in Tab. 6.6 die Gegenüberstellung der ermittelten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung aus Tab. 6.4 und Tab. 6.5.

Tab. 6.6: Gegenüberstellung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung

Feuerwiderstandsklasse	Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.4	Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.5	Maßgebende Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung y
REI 30	1,9	1,9	1,9
REI 60	2,1	3,1 (bzw. 2,2)*	3,1 (bzw. 2,2)*
REI 90	2,6	2,5	2,6** (bzw. 4,3)***
REI 120	3,3	-	-****

* Ohne Berücksichtigung des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN

** Faktor kleiner als für REI 60 bei Berücksichtigung des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN

*** Auf Grundlage der Differenz der Faktoren für REI 30 und REI 60 nach Tab. 6.5 berechnet

**** Keine Angabe aufgrund fehlender Validierung anhand von Prüfberichten

Ohne Berücksichtigung des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN weisen in Tab. 6.6 die Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.4 und Tab. 6.5 für die Feuerwiderstandsklassen REI 30 bis REI 90 einen geringen Unterschied von 0,1 auf. Demnach resultieren auf beide Arten der Ermittlung gleichartige Ergebnisse. Aufgrund der geringen Datenmenge und des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN sind weitere Versuche

zur Verifizierung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung durchzuführen. Die in Tab. 6.2 aufgeführten Anwendungsgrenzen gelten auch für die definierten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung. Eine weitere Anwendungsgrenze ist, dass die Faktoren nur für Wanddicken von 0,365 m gelten, da nur kleinformatige Wandprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit der genannten Wanddicke durchgeführt wurden. Es folgt schrittweise das Vorgehen für die Anwendung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.6:

1) Festlegung der maximalen Feuerwiderstandsdauer (REI 30, REI 60, REI 90 bzw. REI 120).
2) Berechnung des Bemessungswerts des vertikalen Tragwiderstandes für den Kaltfall N_{Rd} nach dem allgemeinen Nachweisverfahren (DIN EN 1996-1-1 [13]) für eine Wand mit den Abmessungen von H x L = 3,0 m x 1,0 m.

$$N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot l \cdot \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M} \tag{6.6}$$

Dabei ist:

Φ Abminderungsfaktor Φ_i am Kopf oder Fuß der Wand, bzw. Φ_m in Wandmitte

t Wanddicke

l Wandlänge

ζ Dauerstandsfaktor zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen und weiterer Einflüsse ζ = 0,85; für kurzzeitige Beanspruchungsarten wie beispielsweise ein Brandfall kann ζ = 1,0 eingesetzt werden. [28]

f_k Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit des Mauerwerks

γ_M Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1996-1-1/NA [28] = 1,5

3) Festlegung der Prüflast $N_{Ed,fi}$. Die Schritte a) und b) dienen als Entscheidungshilfe.
   a) Berechnung der Prüflast $N_{Ed,fi}$ mithilfe des Ausnutzungsfaktors α_{fi} aus Tab. 6.1 für die festgelegte Feuerwiderstandsdauer aus Schritt 1).

$$N_{Ed,fi} = N_{Rd} \cdot \alpha_{fi} \tag{6.7}$$

Dabei ist:

N_{Rd} Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes des Mauerwerks im Kaltfall

α_{fi} Ausnutzungsfaktor

b) Verrechnung eines frei wählbaren Faktors x für eine Erhöhung der Prüflast, um einen höheren Ausnutzungsfaktor als in Tab. 6.1 zu erhalten.

$$N_{Ed,fi,x} = N_{Ed,fi} \cdot x \tag{6.8}$$

Dabei ist:

$N_{Ed,fi}$ Gewählte Prüflast einer Feuerwiderstandsprüfung

x Faktor zur Prüflasterhöhung

4) Für die Übertragbarkeit auf die kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) erfolgt eine Faktorisierung der berechneten Prüflast um den jeweiligen Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung y für REI 30, REI 60, REI 90 bzw. REI 120 gemäß Tab. 6.6.

$$N_{Ed,fi,x,y} = N_{Ed,fi,x} \cdot y \tag{6.9}$$

Dabei ist:

$N_{Ed,fi,x}$ Erhöhte Prüflast bzw. einwirkende Normalkraft im Brandfall

y Maßgebender Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung (Tab. 6.6)

5) Durchführung einer Feuerwiderstandsprüfung an einem 1,5 m hohen (1,25 m beflammte Höhe) und 1,0 m langen Prüfkörper mit der aus Schritt 4) resultierenden Prüflast $N_{Ed,fi,x,y}$.

6) Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung nach dem Erreichen des zuvor festgelegten Prüfziels, da für längere Feuerwiderstandsdauern bei Schritt 4) ein höherer Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.4 hätte verrechnet werden müssen.

Die aus der Feuerwiderstandsprüfung resultierende Feuerwiderstandsdauer gilt für eine Mauerwerkswand mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m und einem Ausnutzungsfaktors α_{fi}, der sich gemäß Gleichung (2.12) aus den Schritten 2) und 3) berechnen lässt. Eine Sicherheit für die definierten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m resultiert daraus, dass die Ergebnisse der Mindestfeuerwiderstandsklassen aus Kapitel 6.1 aufgrund der geringeren Wandlänge von 1,0 m auf der sicheren Seite liegen. Das 3,0 m lange Wände tendenziell zu längeren Feuerwiderstandsdauern neigen ist in Kapitel 5.1.5 nachzulesen. Dort konnte ein Faktor von 1,37 bis 1,72 für die Feuerwiderstandsdauern bei Wänden mit den Abmessungen von H x L = 3,0 m x 3,0 im Vergleich zu Wänden mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m ermittelt werden.

6.3 Anwendung und Validierung anhand von Exkursversuchen

Es folgt ein Abgleich der Mindestfeuerwiderstandsklassen (Tab. 6.1) mit Feuerwiderstandsprüfungen, welche im Rahmen eines Forschungsprojektes [96] durchgeführt wurden. Ebenfalls wird Anhand dieser Versuche überprüft, ob die Faktoren (1,37 bis 1,72) in Bezug auf die längeren Feuerwiderstandsdauern der 3,0 m langen Mauerwerkswände zu den 1,0 m langen verifiziert werden können. Des Weiteren folgt eine

Anwendung und ein Abgleich der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m aus Kapitel 6.2. Die Exkursversuche wurden aufgrund ihrer deutlich höheren charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k = 4,4 N/mm² nicht bei den Auswertungen in Kapitel 6.1 und 6.2 berücksichtigt. Für die Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen und Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m wurden explizit Feuerwiderstandsprüfungen an Ziegeln mit einer geringeren Druckfestigkeit f_k ≤ 2,7 N/mm² durchgeführt. Dadurch beruhen die Ergebnisse auf Wänden geringer charakteristischer Mauerwerksdruckfestigkeit f_k und werden nicht durch höherfestere Ziegel reglementiert.

6.3.1 Mindestfeuerwiderstandsklassen

Im Rahmen eines AIF IGF Forschungsvorhabens mit der Vorhabennummer 22454 N und dem Titel „Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von monolithischem wärmedämmendem Ziegelmauerwerk durch den Nachweis eines erhöhten Feuerwiderstandes bei teilflächig belasteten Außenwandkonstruktionen“ [96] wurden Referenzversuche mit vollflächiger Aufstandsfläche und zentrischer Belastung in Anlehnung an die Prüfnorm DIN EN 1365-1 [5] durchgeführt. Die Feuerwiderstandsprüfungen erfolgten analog zu denen, die in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 beschrieben wurden. Die Prüfkörper hatten identische Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge. Für die Versuche wurde der kleingelochte verfüllte Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS in der Breite von 0,365 m verwendet. Die mittlere Druckfestigkeit wurde gemäß dem Prüfzeugnis 004/23/S/1 in Anlage B von der Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH in Essen zu 10,0 N/mm² bestimmt, woraus eine charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k = 4,4 N/mm² resultiert. Die exakte Ziegelbreite beträgt gemäß Prüfprotokoll 367 mm und der Ziegel weist einen Gesamtlochquerschnitt von 50,2 % auf. Die Mauerwerkswände wurden mit dem gleichen Putz in derselben Schichtdicke versehen, wie die bei den Versuchen, auf dessen Grundlage die Mindestfeuerwiderstandsklassen der Tab. 6.1 erstellt worden sind. Aufgrund der Einhaltung der Anforderungen an die Materialkennwerte gemäß Kapitel 6.1, ist die Anwendbarkeit der Mindestfeuerwiderstandklassen gegeben. Eine Ausnahme stellen die Abmessungen der Innenstege dar, welche gemäß dem Prüfzeugnis 004/23/S/1 in Anlage B 0,1 mm zu klein sind. Laut den Herstellerangaben sollten diese aber größer sein. Die Tab. 6.7. enthält die relevantesten Versuchsinformationen sowie ein Abgleich mit den Mindestfeuerwiderstandsklassen. Weitere Informationen zu den Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie E sind Anlage J zu entnehmen.

Tab. 6.7: Abgleich der Mindestfeuerwiderstandsklassen anhand von Wänden H x L = 3,0 m x 1,0 m

Ziegel (f_k-Wert [N/mm²])	Wand-dicke t [mm]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuerwider-standsdauer [min]	Versuchsbe-zeichnung [-]	Gemäß Tab. 6.1 auf der sicheren Seite?
WS09 V (4,4)	367	1069	500	0,47	67 (REI 60)	E1-WS09 V-365mm-500kN	Ja, da $\alpha_{fi} > 0,41$
WS09 V (4,4)	367	1069	350	0,33	99 (REI 90)	E2-WS09 V-365mm-350kN	Ja, da $\alpha_{fi} > 0,31$
WS09 V (4,4)	367	1069	600	0,56	56 (REI 30)	E3 -WS09 V-365mm-600kN	Ja, da $\alpha_{fi} > 0,51$

$\Phi_m = 1,14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0,024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$		siehe Gleichung (2.6)
$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$	mit $\zeta = 1,0$; $\gamma_M = 1,5$	siehe Gleichung (2.3)
$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$	mit $l = 1,0\ m$	siehe Gleichung (2.2)
$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$		siehe Gleichung (2.12)

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die erstellten Mindestfeuerwiderstandsklassen in Bezug auf den kleingelochten verfüllten Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS in der Breite von 0,365 m mit einer charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k = 4,4 N/mm² auf der sicheren Seite liegen.

6.3.2 Wandlänge

Mithilfe der durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen mit den Abmessungen von H x L = 3,0 m x 1,0 m mit dem höherfesteren Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS kann äquivalent zum Kapitel 5.1.5 bestätigt werden, dass 3,0 m lange Wände längere Feuerwiderstandsdauern aufweisen als 1,0 m lange Wände. Hierfür können die zuvor aufgeführten Feuerwiderstandsdauern und Ausnutzungsfaktoren der Tab. 6.7 mit den nachfolgend aufgeführten Versuchsinformationen aus den Prüfberichten (2100/173/15)-Kip [105] und (3311/496/12)-TM [44] verglichen werden. Die Prüfberichte beinhalten Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden (H x L = 3,25 m x 3,0 m), welche aus UNIPOR WS09 CORISO Ziegeln hergestellt wurden. Dieser Ziegel weist keine sichtbaren Unterschiede zu dem Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS auf. Tab. 6.8 enthält die für den Abgleich relevanten Informationen der Prüfberichte.

Tab. 6.8: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern anhand unterschiedlich langer Mauerwerkswände

Prüfbericht	Wanddicke t [mm]	f_k-Wert [N/mm²]	N_{Rd} [kN/m]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	α_{fi} [-]	Feuerwiderstandsdauer [min]	Vergleich der Feuerwiderstandsdauer mit Tab. 6.7
(2100/173/15)-Kip [105]	297	2,9	541	213	0,39*	99 (REI 90+M)	E2-WS09 V-365mm-350kN
(3311/496/12)-TM [44]	361	4,1	965	578	0,60	61** (REI 60)	E3 -WS09 V-365mm-600kN

$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \lambda \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}$ siehe Gleichung (2.6)

$f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$ mit $\zeta = 1{,}0$; $\gamma_M = 1{,}5$ siehe Gleichung (2.3)

$N_{Rd} = \Phi_m \cdot t \cdot l \cdot f_d$ mit $l = 1{,}0\ m$ siehe Gleichung (2.2)

$\alpha_{fi} = \frac{P_{gewählt}}{N_{Rd}}$ siehe Gleichung (2.12)

* Abweichend von Ausnutzungsfaktor α_{fi} in Tab. 3.1, da einheitliche Rundung zu Tab. 6.7

** Verlust der Tragfähigkeit nach 1. Pendelschlag bei Prüfung zur Brandwand

Trotz höherer Ausnutzungsfaktoren α_{fi} liegen bei den 3,0 m langen Wänden äquivalente bzw. längere Feuerwiderstandsdauern vor. Die in den Prüfberichten aufgeführten Wände wurden einer mechanische Stoßbeanspruchung (M) gemäß DIN EN 1363-2 [12] zur Eignung einer Brandwand ausgesetzt. Ohne eine solche Prüfung resultieren längere Feuerwiderstandsdauern.

Des Weiteren wurden im Rahmen des AIF IGF Forschungsvorhabens mit der Vorhabennummer 22454 N [96] zwei Feuerwiderstandsprüfungen mit einer exzentrischen Lasteinleitung in Höhe von 200 kN/m im zwei Drittelpunkt der Wanddicke durchgeführt. Die 0,365 m dicken Ziegelwände standen nur zu zwei Drittel auf einem Betonbalken. Einziger Unterschied bei den Feuerwiderstandsprüfungen war die Wandlänge. Die 1,0 m lange Wand hat nach 66 Minuten versagt und die 3,0 m lange Wand nach 110 Minuten. Daraus lässt sich ein Faktor von 1,66 ermitteln. Dieser liegt zwischen den in Kapitel 5.1.5 ermittelten Faktoren von 1,37 bis 1,72 und deutet somit nicht auf kürzere oder noch längere Prüfdauern der 3,0 m langen Wände im Vergleich zu 1,0 m langen Wänden hin. Weitere Informationen zu den Versuchen können der Anlage J entnommen werden.

6.3.3 Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m

Im Rahmen des AIF IGF Forschungsvorhabens mit der Vorhabennummer 22454 N [96] wurden vollflächig gelagerte und zentrisch belastete Feuerwiderstandsprüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m) bestehend aus den Ziegeln UNIPOR WS09 CORISO PLUS durchgeführt. Tab. 6.9 sowie der Anlage J sind Informationen zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen zu entnehmen. In

Tab. 6.9 sind die Feuerwiderstandsprüfungen E5-WS09 V-365mm-1000kN und E6-WS09 V-365mm-1140kN aufgeführt, anhand derer ein Abgleich der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.6 möglich ist. Diese werden den Feuerwiderstandsprüfungen E1-WS09 V-365mm-500kN und E3 -WS09 V-365mm-600kN aus Tab. 6.7 mit den Wandabmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 gegenübergestellt. In Tab. 6.9 wurden auf der sicheren Seite liegend die geringeren Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung ohne Berücksichtigung des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN aus Tab. 6.8 verwendet.

Tab. 6.9: Abgleich der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung anhand unterschiedlich hoher Mauerwerkswände

Versuchsbezeichnung [-]	$P_{gewählt}$ [kN/m]	Feuerwiderstandsdauer [min]	Maßgebender Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung y (Tab. 6.6) [-]	Prüflast / Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung [kN/m]	Abgleich der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung anhand der Versuchsergebnisse in Tab. 6.7
E5-WS09 V-365mm-1000kN	1000	75 (REI 60)	2,2 (REI 60)*	1000 / 2,2 = 455	Der Versuch E1-WS09 V-365mm-500kN hat acht Minuten früher versagt bei einer 10 % höheren Prüflast nach Verrechnung des Anpassungsfaktors zur Lasterhöhung. Beide Versuche weisen die Feuerwiderstandsklasse REI 60 auf.
E6-WS09 V-365mm-1140kN	1140	33 (REI 30)	1,9 (REI 30)	1140 / 1,9 = 600	Der Versuch E3 -WS09 V-365mm-600kN hat 23 Minuten länger gehalten bei identischer Prüflast nach Verrechnung des Anpassungsfaktors zur Lasterhöhung. Beide Versuche weisen die Feuerwiderstandsklasse REI 30 auf.
* Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung ohne Berücksichtigung des Versuchs C1-MZ70-365mm-850kN					

In Bezug auf die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen unterschiedlicher Prüfkörpergeometrien und den in Kapitel 6.2 ermittelten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung lässt sich anhand Tab. 6.9 feststellen, dass diese für Wände mit den Abmessungen H x L = 3,0 m x 1,0 m bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln in Bezug auf die Feuerwiderstandsklassen auf der sicheren Seite liegen.

6.4 Vereinfachtes Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer

In DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] ist ein vereinfachtes Rechenverfahren aufgeführt, welches gemäß dem zugehörigen nationalen Anhang [7] nicht in Deutschland angewendet werden darf. Das vereinfachte Rechenverfahren dient zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts einer Mauerwerkswand nach einer definierten Branddauer unter Verwendung der Einwirkungen bei Raumtemperatur. Demnach ist die maximale Normalkraftbeanspruchung bei dem Rechenverfahren durch die Tragfähigkeit des Bauteils im Kaltfall begrenzt. Im Zuge dieses Ausblicks sollen die Anwendungsgrenzen dieses Verfahrens dargelegt werden. Nötige Untersuchungen zur Definition fehlender Parameter für wärmedämmende Hochlochziegel, welche sich aufgrund ihrer Eigenschaften bei einer Brandbeanspruchung vom herkömmlichen Mauerziegel stark unterscheiden, werden ebenso aufgezeigt.

In DIN EN 1996-1-2 [6] sind Grenztemperaturen für verschiedene Stein-Mörtel Kombinationen aufgeführt. Die Grenztemperatur θ_1 gibt an, bis zu welcher Temperatur die Festigkeitseigenschaften bei Raumtemperatur angenommen werden dürfen. Nach einem Überschreiten der Grenztemperatur θ_2 dürfen keine Materialfestigkeiten mehr angesetzt werden. Eine Begründung für die Abminderung der Festigkeit ist beispielsweise die schnelle Volumenvergrößerung im Rahmen des Quarzsprunges bei ~573 °C, durch die es unter anderem zu Rissen in dem Material kommen kann [91]. In DIN EN 1996-1-2 [6] sind aktuell keine Angaben für wärmedämmende Hochlochziegel mit Dünnbettmörtel definiert. Diese haben in der Regel im Vergleich zu anderen Ziegeln dünnere Stege. Es ist davon auszugehen, dass es dadurch zu einer stärkeren Rissbildung oder Abplatzungen aufgrund der einseitigen Brandbeanspruchung bei einer zentrisch auf den Wandkopf einwirkenden Normalkraftbeanspruchung kommt. Ein auf der Wandoberfläche aufgebrachter Putz wird bei dem Rechenverfahren nicht berücksichtigt. Für Mauerziegel mit Normalmörtel bei einer unverputzen Wandoberfläche sind nachfolgende Grenztemperaturen in DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] definiert.

$\theta_1 = 100\ °C$

$\theta_2 = 600\ ºC$ (In Anlehnung an Quarzsprung [91])

Das Berechnungsverfahren basiert auf einer sich einstellenden exzentrischen Belastung aufgrund von Überschreitungen der Grenztemperatur θ_2 oder Abplatzungen auf der brandzugewandten Wandseite im Laufe des Brandes. Die Exzentrizität infolge der Brandbeanspruchung $e_{\Delta\theta}$ kann rechnerisch mit der Annahme einer Raumtemperatur von 20°C gemäß der Gleichung (6.10) ermittelt werden [6].

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} \cdot h_{ef}^2 \cdot \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq \frac{h_{ef}}{20} \tag{6.10}$$

Dabei ist:

h_{ef} Die Knicklänge der Wand

α_t Wärmeausdehnungskoeffizient von Mauerwerk gemäß [13]

t_{Fr} Dicke des Querschnitts, dessen Temperatur θ_2 nicht überschreitet

Die Dicke t_{Fr} beschreibt die Restdicke des Mauerwerksquerschnitts und ist für 30, 60, 90 sowie 120 Minuten Feuerwiderstandsdauer zu berechnen. Als ineffektive Dicke (t_{ineff}) wird der Anteil der Wanddicke bezeichnet, welcher die kritische Grenztemperatur θ_2 überschritten hat. Wie stark der Mauerwerksquerschnitt zu den jeweiligen Feuerwiderstandsdauern durch die Grenztemperatur θ_2 reduziert ist, soll aus Prüfungen oder Datensammlungen ermittelt werden. Aktuell liegen keine Datensammlungen vor, welche Querschnittsreduzierungen für Wände bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln definieren. Abb. 6.3 ist ein Auszug aus DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] und zeigt die Temperaturverteilung für Ziegelmauerwerk mit einer Trockenrohdichte von 1000 kg/m³ bis 2000 kg/m³. Die Dicke t_{Fr} ist aus der Gesamtwanddicke t abzüglich der ineffektiven Dicke t_{ineff} zu berechnen.

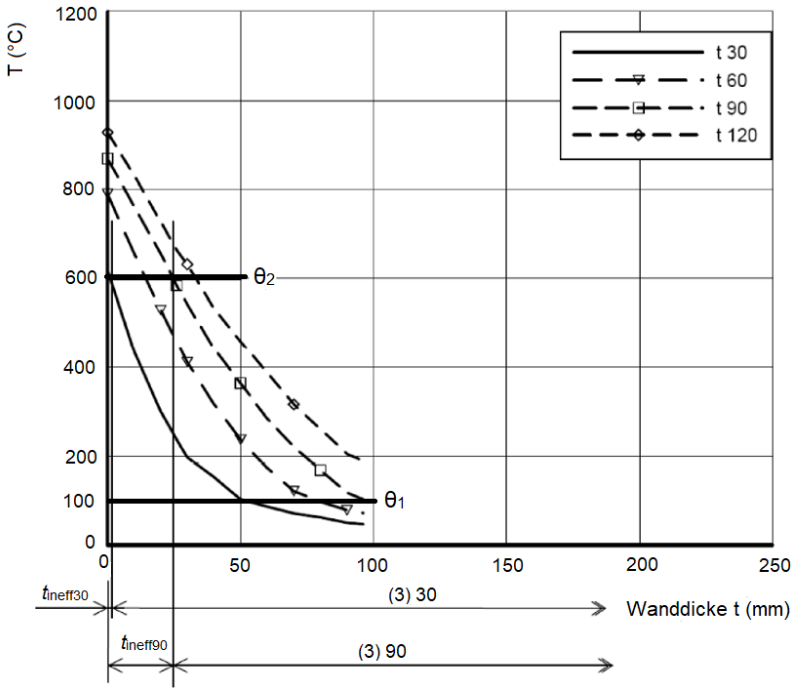


Abb. 6.3: Temperaturverteilung für Ziegelmauerwerk mit einer Trockenrohdichte von 1000 kg/m³ bis 2000 kg/m³ [6]

Wärmedämmende Hochlochziegel weisen eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Dadurch erfolgt bei einer einseitigen Brandbeanspruchung eine langsame Durchwärmung des Wandquerschnitts. Demnach kann bei diesen Ziegeln von geringeren Wanddicken ausgegangen werden, welche die Grenztemperatur θ_2 nach einer Brandbeanspruchung von 30, 60, 90 und 120 Minuten aufweisen. Allerdings neigen Wände bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln unter Normalkraftbeanspruchung im Brandfall zu Abplatzungen, was einer Grenztemperatur θ_2 in der Berechnung gleichgesetzt werden kann. In beiden Fällen wäre keine Materialfestigkeit mehr vorhanden.

Das Abplatzverhalten ist unter anderem vom Ausnutzungsfaktor α_{fi} und von der Länge des Prüfkörpers abhängig, da eine 3,0 m lange Mauerwerkswand gemäß Kapitel 5.1.2 zu einem späteren Zeitpunkt Ziegelabplatzungen aufweist als eine 1,0 m lange. Es können nicht pauschal Rechenwerte für definierte Feuerwiderstandsdauern angesetzt werden, da im Rahmen eigener Feuerwiderstandsprüfungen herausgefunden wurde, dass das sichtbare Abplatzverhalten auch teilweise von der Wandschlankheit λ abhängig ist und keiner Systematik unterliegt, was die Größe und den Ort anbelangt. Des Weiteren waren die Mauerwerkswände verputzt und ein Putz wird bei dem vereinfachten Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer nicht berücksichtigt. Es kann pauschal davon ausgegangen werden, dass bei einem Brandereignis mehr Querschnittsfläche bei wärmedämmenden Hochlochziegeln aufgrund der dünneren Stege im Vergleich zu herkömmlichen Mauerziegeln abplatzt. Ob die Abplatzungen bei wärmedämmenden Hochlochziegeln eine äquivalente Dicke aufweisen, wie der Mauerwerksquerschnitt bei Ziegeln mit einem Lochanteil ≤ 5%, der zum gleichen Zeitpunkt die Grenztemperatur θ_2 überschreitet, ist von der Wärmeleitfähigkeit abhängig. Es wird in Bezug auf die Abplatzungen bei wärmedämmenden Hochlochziegeln davon ausgegangen, dass eine größere ineffektive Dicke t_{ineff} resultiert als in Abb. 6.3 abzulesen ist. Wärmedämmende Hochlochziegel weisen in der Regel eine Brutto-Trockenrohdichte von 500 kg/m³ bis 750 kg/m³ auf. Demnach dürfen die Abb. 6.3 angegebenen Temperaturverteilungen nicht für diese Ziegel verwendet werden. Allgemein werden wärmedämmende Hochlochziegel für das Rechenverfahren aufgrund der nachfolgenden Anwendungsgrenzen für Mauerziegel ausgeschlossen [6]:

- Verwendung nur für Ziegel der Gruppe 1S und 1 (maximal 5 % Lochanteil)
- Die Steindruckfestigkeit f_b muss 10 N/mm² bis 40 N/mm² betragen
- Die Trockenrohdichte muss 1000 kg/m³ bis 2000 kg/m³ betragen
- Verwendung von Normalmauermörtel

Tab. 6.10 definiert auf Grundlage von Versuchsbeobachtungen Annahmen für die ineffektive Dicke t_{ineff} für unterschiedliche Typen wärmedämmender Hochlochziegel. Bei den kleingelochten Hochlochziegeln wird nicht zwischen verfüllten und unverfüllten Ziegeln unterschieden. In Bezug auf die angegebenen ineffektiven Dicken t_{ineff} müssten weitere Untersuchungen zu Validierung durchgeführt werden. Bei diesen müsste gezielt das Abplatzverhalten der wärmedämmenden Hochlochziegel bei einseitiger Brandbeanspruchung für verschiedene Branddauern in Abhängigkeit von dem Ausnutzungsfaktor α_{fi} und der Wandgeometrie untersucht werden.

Tab. 6.10: Annahmen zur ineffektiven Dicke t_{ineff} für verschiedene Ziegeltypen

Branddauer [min]	t_{ineff} Abb. 6.3 [mm]	t_{ineff} wärmedämmender Großkammer-Hochlochziegel [mm]	t_{ineff} wärmedämmender kleingelochter Hochlochziegel [mm]
30	2 mm	~58 mm (1x Kammern)	~30 mm (1x Kammer)
60	14 mm	~58 mm (1x Kammern)	~53 mm (2x Kammern)
90	26 mm	~116 mm (2x Kammern)	~76 mm (3x Kammern)
120	34 mm	~116 mm (2x Kammern)	~100 mm (4x Kammern)

Bei dem Berechnungsverfahren ist der Bemessungswert der vertikalen Tragfähigkeit einer Mauerwerkswand im Brandfall gemäß nachfolgender Gleichung zu ermitteln: [6]

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi_m \cdot (f_{d\theta_1} \cdot A_{\theta_1} + f_{d\theta_2} \cdot A_{\theta_2}) \quad (6.11)$$

Dabei ist:

A_{θ_1} Mauerwerkquerschnitt bis zur Isotherme θ_1

A_{θ_2} Mauerwerkquerschnitt zwischen den Isothermen θ_1 und θ_2

$f_{d\theta_1}$ Bemessungsdruckfestigkeit von Mauerwerk bis zur Temperatur θ_1

$f_{d\theta_2}$ Bemessungsdruckfestigkeit von Mauerwerk zwischen θ_1 und θ_2 ºC

Φ_m Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Schlankheit und Lastausmitte in Wandmitte unter Berücksichtigung der zusätzlichen Exzentrizität $e_{\Delta\theta}$

Für die Ermittlung von A_{θ_1} (Querschnittsfläche, welche Temperaturen > 100 °C aufweist), liegen ebenfalls wie für A_{θ_2} (Querschnittsfläche, welche Temperaturen > 600 °C aufweist) für wärmedämmende Hochlochziegel keine tabellarischen Temperaturdaten vor. Da θ_1 auch abhängig von den Abplatzungen ist, müsste die Grenztemperatur für verschiedene Ausnutzungsfaktoren und Prüfkörpergeometiren experimentell ermittelt werden. Nachfolgend werden die definierten Grenztemperaturen θ_1 und θ_2 aus DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] für die Mauerziegel mit Normalmörtel auf wärmedämmenden Hochlochziegel übertragen. Eine erste Abschätzung wie groß die Querschnittsfläche ist, die eine Temperatur > 100 °C aufweist, kann Abb. 6.3 entnommen werden. Demnach ergeben sich folgende Dicken für A_{θ_1} pro laufenden Meter für eine Brandbeanspruchung von 30, 60, 90 und 120 Minuten.

$A_{\theta_{1,F30}}$ = 50 mm

$A_{\theta_{1,F60}}$ = 80 mm

$A_{\theta_{1,F90}}$ = 100 mm

$A_{\theta_{1,F120}}$ = ~130 mm (Keine Angaben gemäß Abb. 6.3, abgeleitete Dicke)

Unter Verwendung der aufgeführten Bemessungsregeln soll eine Relation zwischen einer 3,0 m hohen Mauerwerkswand zu einer 1,5 m hohen Mauerwerkswand hergestellt werden. Hierzu wird in einem Rechenbeispiel für beide Prüfkörper die Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach einer einseitigen Brandbeanspruchung gemäß des vereinfachten Rechenverfahrens nach DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] in Kombination mit den eigenen Annahmen für die ineffektive Dicke t_{ineff} berechnet. Die Ergebnisse werden im Anschluss auf ihre Plausibilität überprüft. Dies erfolgt mittels eines Abgleichs der Versuchsergebnisse des Kapitels 5.3.

Die nachfolgenden Berechnungen gelten für den kleingelochten wärmedämmenden Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO. Es kommt eine Wanddicke von 0,362 m und ein zugehöriger Wert für die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit von f_k = 2,4 N/mm² zur Ausführung. Nachfolgend werden die Tragfähigkeiten mittels des allgemeinen Nachweisverfahrens gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] ermittelt. Ausmitten infolge exzentrischer Lasteinleitung werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt,

da nur zentrisch normalkraftbelastete Mauerwerkswände untersucht werden. Während bei einer Berechnung der vertikalen Tragwiderstände gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] für eine Feuerwiderstandsprüfung mit einer anschließenden Abminderung für den Brandfall meist keine Ausmitte infolge Kriechens sowie keine Mindestausmitte ($0{,}05 \cdot t$) und keine ungewollte Lastausmitte (e_{init}) berücksichtigt wird, werden diese nachfolgend beachtet. Begründet wird dies mit der Berücksichtigung der Exzentrizität aus dem Temperaturprofil des Mauerwerks bei dem vereinfachten Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer gemäß DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6]. Demnach ist es nur konsequent auch Ausmitten aus Ungenauigkeiten bei der Ausführung und unterschiedlicher Baustoffeigenschaften einzelner wärmedämmender Hochlochziegel bei Wandkonstruktionen aller Art und Funktion zu berücksichtigen. Des Weiteren wird durch die Berücksichtigung der Ausmitten die Tragfähigkeit des Restquerschnitts der Mauerwerkswand nach einer Brandbeanspruchung reduziert, wodurch die berechneten Tragfähigkeiten auf der sicheren Seite liegen.

1. Angaben (Index g für große Wand; Index k für kleine Wand):

   Wandhöhen: $h_g = 3{,}00\ m$, $h_k = 1{,}50\ m$

   Wandlängen: $l_g = 3{,}00\ m$, $l_k = 1{,}00\ m$

   Wanddicken: $t_g = t_k = 0{,}362\ m$

   Bemessungsdruckfestigkeit:

   $f_k = 2{,}40 \frac{N}{mm^2} \rightarrow f_{d,g} = f_{d,k} = 1{,}60 \frac{N}{mm^2}$ (gemäß Gleichung (2.3))

   Wärmeausdehnungskoeffizient (DIN EN 1996-1-1 [13]):

   $\alpha_{t,g} = \alpha_{t,k} = 6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$

   Grenztemperatur θ_2:

   $\theta_{2,g} = \theta_{2,k} = 600°C$

   Lochung vom Stein: Kleinlochung

2. Ermittlung der Knicklänge gemäß DIN EN 1996-1-1 [13]:

   $h_{ef,g} = \rho \cdot h_g = 0{,}75 \cdot 3{,}00\ m = 2{,}25\ m$ (6.12)

   $h_{ef,k} = \rho \cdot h_k = 0{,}75 \cdot 1{,}50\ m = 1{,}125\ m$ (6.13)

Dabei ist:

ρ = Abminderungsfaktor, gemäß DIN EN 1996-1-1, 5.5.1.2 [13] $\rho = 0{,}75$

3. Ermittlung der Restdicke des Mauerwerksquerschnitts t_{Fr}:
Für die Ermittlung der Dicke des Querschnitts t_{Fr}, dessen Temperatur nicht θ_2 überschreitet, wird eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten zugrunde gelegt. Dies entspricht einem bei wärmedämmenden Hochlochziegeln häufig vorhandenen Feuerwiderstand. Gemäß den Annahmen der Tab. 6.10 ergibt sich eine angenommene, ineffektive Dicke $t_{ineff,90}$ von 76 mm. Die Dicke des Restquerschnitts t_{Fr} beträgt dementsprechend:

$$t_{Fr,F90} = 0{,}362\ m - 0{,}076\ m = 0{,}286\ m \tag{6.14}$$

Die berechnete Restdicke des Mauerwerksquerschnitts ist unabhängig von der Wandgröße und gilt demnach für die große und die kleine Wand.

4. Ermittlung der Ausmitten:

$$e_{ges} = e_{mk} + e_{\Delta\theta} \tag{6.15}$$

Dabei ist:

$$e_{mk} = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} + e_{init} + e_k \geq 0{,}05 \cdot t \tag{6.16}$$

Folgende Ausmitten werden vernachlässigt:

$$\frac{M_{md}}{N_{md}} = e_{hm} = e_k = 0 \tag{6.17}$$

5. Die gesamte Ausmitte ergibt sich dadurch zu:

$$e_{ges} = e_{mk} + e_{\Delta\theta} \tag{6.18}$$

Dabei ist:

$$e_{mk} = e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} \geq 0{,}05 \cdot t \tag{6.19}$$

$$e_{\Delta\theta} = \frac{1}{8} \cdot h_{ef}^2 \cdot \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \leq \frac{h_{ef}}{20} \tag{6.20}$$

Es resultiert:

Große Wand:

$$e_{mk,g} = e_{init,g} = \frac{2{,}25\ m}{450} = 0{,}005\ m \geq 0{,}05 \cdot t = 0{,}05 \cdot 0{,}362\ m = 0{,}0181\ m \tag{6.21}$$

$$e_{\Delta\theta,g} = \frac{1}{8} \cdot (2{,}25\ m)^2 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot (600 - 20)K}{0{,}286\ m} = 0{,}0077\ m \leq \frac{2{,}25\ m}{20} = 0{,}1125\ m \tag{6.22}$$

$$e_{ges,g} = 0{,}0181\ m + 0{,}0077\ m = 0{,}0258\ m \tag{6.23}$$

Kleine Wand:

$$e_{mk,k} = e_{init,k} = \frac{1{,}125\ m}{450} = 0{,}0025\ m \geq 0{,}05 \cdot t = 0{,}05 \cdot 0{,}362\ m = 0{,}0181\ m \tag{6.24}$$

$$e_{\Delta\theta,k} = \frac{1}{8} \cdot (1{,}125\ m)^2 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot (600 - 20)K}{0{,}286\ m} = 0{,}0019\ m \leq \frac{1{,}125\ m}{20} = 0{,}0560\ m \tag{6.25}$$

$$e_{ges,k} = 0{,}0181\ m + 0{,}0019\ m = 0{,}0200\ m \tag{6.26}$$

6. Ermittlung des Abminderungsfaktors Φ_m ohne Brandeinwirkung:

$$\Phi_m = 1{,}14 \cdot \left(1\text{-}2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}}\right) - 0{,}024 \cdot \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \leq 1 - 2 \cdot \frac{e_{mk}}{t_{ef}} \tag{6.27}$$

$$\Phi_{m,g} = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0{,}0181\ m}{0{,}362\ m}\right) - 0{,}024 \cdot \frac{2{,}25\ m}{0{,}362\ m} \tag{6.28}$$

$$= 0{,}88 \leq 1 - 2 \cdot \frac{0{,}0181\ m}{0{,}362\ m} = 0{,}90 \qquad \text{Maßgebend wird 0,88}$$

$$\Phi_{m,k} = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0{,}0181\ m}{0{,}362\ m}\right) - 0{,}024 \cdot \frac{1{,}125\ m}{0{,}362\ m} \tag{6.29}$$

$$= 0{,}95 \leq 1 - 2 \cdot \frac{0{,}0181\ m}{0{,}362\ m} = 0{,}90 \qquad \text{Maßgebend wird 0,90}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors $\Phi_{m,fire}$ im Brandfall:

$$\Phi_{m,fire,g} = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0{,}0258\ m}{0{,}362\ m}\right) - 0{,}024 \cdot \frac{2{,}25\ m}{0{,}362\ m} \tag{6.30}$$

$$= 0{,}83 \leq 1 - 2 \cdot \frac{0{,}0258\ m}{0{,}362\ m} = 0{,}86 \qquad \text{Maßgebend wird 0,83}$$

$$\Phi_{m,fire,k} = 1{,}14 \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{0{,}0200\ m}{0{,}362\ m}\right) - 0{,}024 \cdot \frac{1{,}125\ m}{0{,}362\ m} \tag{6.31}$$

$$= 0{,}90 \leq 1 - 2 \cdot \frac{0{,}0200\ m}{0{,}362\ m} = 0{,}89 \qquad \text{Maßgebend wird 0,89}$$

7. Vergleich der Tragfähigkeiten:
Der vertikale Tragwiderstand ohne Brandeinwirkung je Meter kann gemäß DIN EN 1996-1-1 [13] wie folgt ermittelt werden:

$$N_{Rd,g} = \Phi_{m,g} \cdot t_g \cdot f_{d,g} = 0{,}88 \cdot 0{,}362\ m \cdot 1{,}60 \frac{MN}{m^2} = 509{,}7 \frac{kN}{m} \tag{6.32}$$

$$N_{Rd,k} = \Phi_{m,k} \cdot t_k \cdot f_{d,k} = 0{,}90 \cdot 0{,}362\ m \cdot 1{,}60 \frac{MN}{m^2} = 521{,}3 \frac{kN}{m} \tag{6.33}$$

Die Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach 90-minütiger Brandbeanspruchung wird nach DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] sowie Tab. 6.10 wie folgt ermittelt:

$$N_{Rd,fi\theta_2,F90,g} = \Phi_{m,fire,g} \cdot \left(f_{d\theta_1} \cdot A_{\theta_1} + f_{d\theta_2} \cdot A_{\theta_2}\right) \tag{6.34}$$

$$= \Phi_{m,fire,g} \cdot \left(f_{d\theta_1} \cdot t_{\theta_1} + f_{d\theta_2} \cdot t_{\theta_2}\right) \text{ auf 1,0 m Wandlänge bezogen.}$$

$$N_{Rd,fi\theta_2,F90,k} = \Phi_{m,fire,k} \cdot \left(f_{d\theta_1} \cdot A_{\theta_1} + f_{d\theta_2} \cdot A_{\theta_2}\right) \tag{6.35}$$

$$= \Phi_{m,fire,k} \cdot \left(f_{d\theta_1} \cdot t_{\theta_1} + f_{d\theta_2} \cdot t_{\theta_2}\right) \text{ auf 1,0 m Wandlänge bezogen.}$$

Dabei ist:

$$f_{d\theta_1} = \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}} \text{ mit } \gamma_{M,fi} = 1{,}00 \text{ [7]} \rightarrow \frac{2{,}4\ \frac{N}{mm^2}}{1{,}0} = 2{,}4\ \frac{N}{mm^2} = 2400\ \frac{kN}{m^2} \tag{6.36}$$

$$f_{d\theta_2} = c_{cl} \cdot f_{d\theta_1} \text{ mit } c_{cl} = 0{,}50 \rightarrow 0{,}50 \cdot 2{,}4\ \frac{N^2}{mm} = 1{,}2\ \frac{N}{mm^2} = 1200\ \frac{kN}{m^2} \tag{6.37}$$

Wanddicke auf 1,0 m Wandlänge bezogen und mit Temperaturen nach 90 Minuten < 100 °C:

$$t_{\theta 1,F90} = t - t_{\theta 2,F90} = 0{,}362\ m - 0{,}100\ m = 0{,}262\ m \quad (6.38)$$

Wanddicke auf 1,0 m Wandlänge bezogen und mit Temperaturen nach 90 Minuten von 100 °C bis 600 °C:

$$t_{\theta 2,F90} = t_{Fr,F90} - t_{100\text{-}600°C}$$

$$= 0{,}362\ m - (0{,}362\ m - 0{,}100\ m) - 0{,}076\ m) = 0{,}024\ m \quad (6.39)$$

Es resultiert:

$$N_{Rd,fi,\theta_2,F90,g} = 0{,}83 \cdot (2400\ \frac{kN}{m^2} \cdot 0{,}262\ m + 1200\ \frac{kN}{m^2} \cdot 0{,}024\ m) \quad (6.40)$$

$$= 545{,}8\ \frac{kN}{m}$$

$$N_{Rd,fi,\theta_2,F90,k} = 0{,}89 \cdot (2400\ \frac{kN}{m^2} \cdot 0{,}262\ m + 1200\ \frac{kN}{m^2} \cdot 0{,}024\ m) \quad (6.41)$$

$$= 585{,}3\ \frac{kN}{m}$$

Die maximale Last bei Raumtemperatur bei einer vollen Ausnutzung entspricht dem Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd}. Aus diesem Grund sind die ermittelten Tragfähigkeiten der Restquerschnitte N_{Rd,fi,θ_2} nach einer Brandbeanspruchung unter Verwendung der Lasten bei Raumtemperatur höher als die Bemessungswerte des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd}. Bei der Berechnung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} nach DIN EN 1996-1-1 [13] wird die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k durch einen Teilsicherheitsbeiwert von γ_M = 1,5 abgemindert. Bei der Berechnung der Tragfähigkeit des Restquerschnitts gemäß vereinfachten Rechenverfahren (DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6]) wird für den Brandfall ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1{,}0$ (Temperatur Ziegelquerschnitt < 100°C) bzw. $\gamma_{M,fi} = 0{,}5$ (Temperatur Ziegelquerschnitt 100 °C bis 600 °C) angesetzt. Die Begründung für $N_{Rd,fi,\theta_2} > N_{Rd}$ ist demnach auf Teilsicherheitsbeiwerte zurückzuführen.

Bei einer Gegenüberstellung der berechneten Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach 90 Minuten Brandbeanspruchung unter Verwendung der Lasten bei Raumtemperatur mit vergleichbaren Feuerwiderstandsprüfungen ist zu erkennen, dass das berechnete Ergebnis in Bezug auf die kleinformatigen Wände (H x L = 1,5 m x 1,0 m) nicht realistisch ist. Die Feuerwiderstandsprüfung mit der Bezeichnung C5-W07 V-365mm-512kN bzw. C9-W07 UV-365mm-512kN (siehe Tab. 5.10) weisen Feuerwiderstandsdauern bei einer Prüflast von 512 kN/m von 58 Minuten bzw. 71 Minuten auf. Gemäß der Berechnung sollte der von den Abmessungen identische Probekörper nach einer 90-minütigen Brandbeanspruchung mit einer Prüflast in Höhe der vollen Ausnutzung bei Raumtemperatur, was 521,3 kN/m entspricht, noch eine Tragfähigkeit des Restquerschnitts von 585,3 kN/m aufweisen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Mauerwerkswand bei einer Prüflast von 521,3 kN/m schon vor dem Erreichen der 90 Minuten versagt hätte. Die Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) waren bei den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfung nur 1,25 m in der Höhe einer Brandbeanspruchung ausgesetzt. Wie groß ein hieraus resultierender Einfluss auf der sicheren Seite ist, kann nicht abgeschätzt werden.

Für eine Wand mit den Abmessungen von 3,0 m in der Höhe und Länge konnte rechnerisch bei einer maximalen Prüflast von 509,7 kN/m eine Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach 90-minütiger Brandbeanspruchung von 544,5 kN/m berechnet werden. Eine Mauerwerkswand mit der Länge von 1,0 m hat bei einer Feuerwiderstandsprüfung mit einer Normalkraftbeanspruchung von 509 kN/m nach 39 Minuten versagt (A4-W07 V-365mm-509kN). Allerdings wurde auch in Kapitel 5.1.5 herausgefunden, dass 1,0 m lange Wände um den Faktor 1,37 bis 1,72-fach geringere Feuerwiderstandsdauern aufweisen. Bei einer Berücksichtigung von dem zuvor genannten maximalen Faktor von 1,72 resultiert eine Feuerwiderstandsdauer von 67 Minuten bis zum Bauteilversagen bei Probekörperabmessungen von H x L = 3,0 m x 3,0 m. Demnach ist auch in diesem Fall eine Tragfähigkeit des Restquerschnitts von 544,5 kN/m nach 90-minütiger Brandbeanspruchung bei einer maximalen Prüflast von 509,7 kN/m nicht möglich.

Die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k und die Temperaturverläufe wurden für beide Wände identisch angenommen. Die Relation der Tragfähigkeiten des Restquerschnitts nach 90-minütiger Brandbeanspruchung kann damit direkt aus dem Verhältnis der Abminderungsfaktoren $\Phi_{m,fire}$ berechnet werden:

$$\frac{N_{Rd,fi,\theta_2,F90,k}}{N_{Rd,fi,\theta_2,F90,g}} = \frac{\Phi_{m,fire,k}}{\Phi_{m,fire,g}} = \frac{0,89}{0,83} = 1,07 \tag{6.42}$$

Es resultiert eine 7 % höhere Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach einer 90-minütigen Brandbeanspruchung für die kleinformatige Mauerwerkswand (H x L = 1,5 m x 1,0 m). Dies entspricht einem Faktor von 1,07. Gemäß Tab. 6.6 beträgt der Anpassungsfaktor zur Lasterhöhung für eine 90-minüte Feuerwiderstandsdauer mindestens 2,6. Aus dem vereinfachten Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer gemäß DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] mit den Annahmen nach Tab. 6.10 für wärmedämmende Hochlochziegel resultieren keine zuverlässigen Ergebnisse. Auf Grundlage eines generellen Ausschlusses des vereinfachten Rechenverfahrens in Deutschland gemäß DIN EN 1996-1-2/NA [7] ist davon auszugehen, dass für die in der Norm aufgeführten Baustoffe ebenso keine zuverlässigen Ergebnisse resultieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es folgt eine Zusammenfassung der einzelnen Kapitel und der wichtigsten Erkenntnisse der Forschung. Im Zuge des Ausblickes werden offene Fragestellungen in Bezug auf das Forschungsthema aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung

Aktuelle existieren nach aktuellem Stand der Technik keine zugelassenen Berechnungsverfahren oder vereinfachten Tabellenwerte für eine schnelle Einstufung von wärmedämmenden Hochlochziegeln in Feuerwiderstandsklassen [6, 7]. Die Festlegung des Feuerwiderstandes erfolgt auf Grundlage von zeit- und kostenintensiven Feuerwiderstandsprüfungen. Aufgrund normativer Anforderungen an die Feuerwiderstandsprüfungen gemäß DIN EN 1365-1 [5] sind die Abmessungen der Probekörper H x L = 3,0 m x 1,0 m. Daraus resultiert eine Begrenzung der Anzahl möglicher Prüfinstitute zur Klassifizierung.

Die vorliegende Dissertationsschrift beschreibt die Ermittlung von Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk, wodurch eine einfache und schnelle Klassifizierung des Feuerwiderstandes erfolgen kann. Ebenso wurden Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung definiert, mithilfe dessen eine Beurteilung des Feuerwiderstandes in Anlehnung an DIN EN 1365-1 [5] anhand von kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) möglich ist.

Während sich Kapitel 1 thematisch mit der Einführung in die Problemstellung, der Zielsetzung und der Vorgehensweise der Dissertationsschrift befasst, wurden im Rahmen der Ausarbeitung in Kapitel 2 die Grundlagen in Bezug auf Mauerwerk zusammengestellt. Darauf aufbauend wurde Ziegelmauerwerk genauer erläutert. Ebenso wurde die Notwendigkeit der Ermittlung des Feuerwiderstands von Mauerwerkswänden aufgezeigt sowie die Möglichkeiten der Klassifizierung. In Bezug auf Feuerwiderstandsprüfungen, mithilfe welcher wärmedämmende Hochlochziegel klassifiziert werden, wurde das allgemeinen Nachweisverfahren zur Berechnung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes einer Mauerwerkswand N_{Rd} (DIN EN 1996-1-1 [13]) erläutert. Anhand dessen wird die Prüflast für eine Feuerwiderstandsprüfung abgeleitet.

In Kapitel 3 erfolgte eine Auswertung vorhandener Prüfberichte von Feuerwiderstandsprüfungen unterschiedlichster wärmedämmender Hochlochziegel. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Faktoren, die das Bauteilverhalten bei einer Brandbeanspruchung beeinflussen, wurden ausgearbeitet und im weiteren Verlauf der Dissertationsschrift berücksichtigt.

Kapitel 4 beinhaltet Untersuchungen an Einzelsteinen, Zweistein- und Dreisteinkörpern sowie an Mauerwerkswänden unterschiedlicher Abmessungen. Diese wurden bei Raumtemperatur sowie bei Temperaturbeanspruchungen gemäß ETK durchgeführt. Im Zuge dessen wurde die zur Berechnung des Bemessungswertes des vertikalen Tragwiderstandes N_{Rd} benötigte charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k sowie weitere Baustoffeigenschaften der verwendeten Materialien bestimmt. Des Weiteren wurden Untersuchungen bzgl. des in Kapitel 3 beschriebenen Bauteilverhaltens bei einer Feuerwiderstandsprüfung durchgeführt. Im Rahmen von Brandversuchen, bei denen die Resttragfähigkeit nach einer definierten Brandbeanspruchung gemäß ETK

untersucht wurde, konnten neben den in Kapitel 3 erlangten Erkenntnissen zur Abhängigkeit von Ausnutzungsfaktor α_{fi} zur Feuerwiderstandsdauer auch weitere Informationen zur Streuung gewonnen werden. Ebenso wurden in Kapitel 4.4 Feuerwiderstandsprüfungen für die Festlegung von Mindestfeuerwiderstandsklassen und Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m an unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien durchgeführt.

Die Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen erfolgte in Kapitel 5. Im Zuge dessen konnte unter anderem festgestellt werden, dass die Bauteillänge einen Einfluss auf die Feuerwiderstandsdauer hat und für 3,0 m lange Wände im Vergleich zu 1,0 m langen eine 1,37 bis 1,72-fach längere Feuerwiderstandsdauer resultieren kann. Ebenfalls einen Einfluss auf die Feuerwiderstandsdauer hat die deckelnde Ausführung der Lagerfugen bei unverfüllten Ziegeln. Sofern keine gedeckelten Lagerfugen vorliegen, können in der Größenordnung von 1,6 bis 2,9-mal kürzere Feuerwiderstandsdauern resultieren. In Bezug auf die Streuung der Feuerwiderstandsdauern konnten Abweichungen von bis zu 40 % für die gleiche Feuerwiderstandsprüfung festgestellt werden.

Kapitel 6.1 beinhaltet die festgelegten Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk (Tab. 6.1), welche mit den in Kapitel 3 aufgeführten Feuerwiderstandsprüfungen verifiziert wurden. Die Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit von Feuerwiderständen bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m sind Tab. 6.4 zu entnehmen. Eine Validierung der Mindestfeuerwiderstandsklassen und Anpassungsfaktoren zu Lasterhöhung erfolgte jeweils in dem zugehörigen Kapitel 6.1 bzw. 6.2 sowie im Rahmen des Kapitels 6.3. In Kapitel 6.4 wurde das vereinfachte Rechenverfahren gemäß DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] zur Bestimmung der Tragfähigkeit eines Restquerschnitts nach einer definierten Branddauer unter Verwendung der Einwirkungen bei Raumtemperatur analysiert. Im Zuge dessen erwies es sich als richtig, dass das Rechenverfahren gemäß DIN EN 1996-1-2/ NA [7] aktuell in Deutschland nicht zugelassen ist.

7.2 Ausblick

Zur Verifizierung der angegebenen Abweichungen der Versagenszeit von bis zu 40 % für gleiche Feuerwiderstandsprüfungen sowie in Bezug auf den Einfluss der Wandlänge und der Deckelung der Mörtelfuge auf die Feuerwiderstandsdauer müssten weitere zielgerichtete Untersuchungen durchgeführt werden. Ebenso könnten zusätzliche Feuerwiderstandsprüfungen mit wärmedämmenden Hochlochziegel mit anderen Eigenschaften den Anwendungsbereich (siehe Tab. 6.2) der festgelegten Mindestfeuerwiderstandsklassen erweitern. Anhand von kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen (H x L = 1,5 m x 1,0 m) mit unterschiedlichen Wanddicken, könnte auch eine Übertragung der Feuerwiderstände mittels der definierten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung bei Halbierung der Prüfkörperhöhe von 3,0 m auf 1,5 m auf Wände mit einer Dicke ungleich 365 mm erfolgen. Ob auch eine Kompensation neben der Prüflasterhöhung durch geringere Wanddicken für gleiche Schlankheiten möglich ist, müssten separate Untersuchungen zeigen.

Durch die Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen in Kapitel 6.1 könnten die Bemessungswerte zur Klassifikation des Feuerwiderstandes im nationalen Anhang

DIN EN 1996-1-2 [7] um wärmedämmende Hochlochziegel mit Dünnbettmörtel erweitert werden. Dadurch könnte eine Feuerwiderstandsprüfung gemäß DIN EN 1365-1 [5] entfallen. Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation der Feuerwiderstandsdauer wäre eine kleinformatige Feuerwiderstandsprüfung mit den Wandabmessungen H x L = 1,5 m x 1,0 m mittels der in Kapitel 6.2 definierten Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung für die Übertragbarkeit der Feuerwiderstände. Diese müssten durch weitere Versuche verifiziert und normativ geregelt werden.

Für eine Zulassung des in Kapitel 6.4 vorgestellten vereinfachten Rechenverfahrens nach DIN EN 1996-1-2 Anhang C [6] für wärmedämmende Hochlochziegel müssten Untersuchungen in Bezug auf das lastabhängige Materialverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung für verschiedene Feuerwiderstandsdauern durchgeführt werden. Nur so könnte mithilfe von definierten Materialkennwerten für die wärmedämmenden Hochlochziegel im Brandfall eine realitätsnahe Tragfähigkeit des Restquerschnitts nach einer Brandbeanspruchung berechnet werden.

Wärmedämmende Hochlochziegel werden für ihren bestimmungsgemäßen Einsatz aufgrund ihrer bauphysikalischen Eigenschaften meist bei Außenwänden verbaut. Wird die Decke in Stahlbeton ausgeführt, wird diese oft nicht vollflächig auf der Außenwand aufgelagert und die Decke wird stirnseitig mit wärmedämmenden Elementen oder speziellen Ziegeln zur Abmauerung gedämmt. Dies liegt an der guten Wärmeleitfähigkeit der Stahlbetondecke in Abhängigkeit von dem verwendeten Beton und Bewehrungsgrad. Die Wärmeleitfähigkeit von Stahlbeton beträgt ein Vielfaches im Vergleich zu wärmedämmenden Ziegelmauerwerk. Ohne zusätzliche Dämmung bzw. vollflächiger Auflagerung der Decke entsteht eine Wärmebrücke, welche eine Schimmelbildung im Bereich des Außenwand-Decken-Knotens im Gebäudeinneren begünstigt. Bei der Betrachtung verschiedener Wandfußausführungen ist festzustellen, dass dort öfters stirnseitig der Bodenplatte eine einbindende Perimeterdämmung zur Reduzierung der Wärmebrückeneinflüsse verbaut wird. Sowohl bei der Ausbildung des Wand-Decken-Knotens als auch bei dem Wandfußpunkt sind weitere unterschiedliche Detailausbildungen in der Praxis möglich, aus denen eine exzentrische Belastung der Mauerwerkswand resultiert. Kenntnisse zum Verhalten von Mauerwerk unter zentrischer und exzentrischer Belastung im Kaltfall sind aus der Literatur sowie Forschungsaktivitäten bekannt. Die Auswirkungen dieser Lastfälle im Brandfall sind dagegen noch weitestgehend unerforscht.

Bei Feuerwiderstandsprüfungen an geschosshohen Mauerwerkswänden wird die Wand in der Regel vollflächig aufstehend und zentrisch mit einer Normalkraftbeanspruchung belastet [5, 11]. Die zuvor beschriebenen exzentrischen Belastungssituationen werden nur in Einzelfällen geprüft. Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen zentrischen und exzentrisch belasteten Mauerwerkswänden aus wärmedämmenden Hochlochziegeln im Brandfall exzitiert ein aktuelles AIF IGF Forschungsvorhaben mit der Vorhabennummer 22454 N und dem Titel „Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von monolithischem wärmedämmendem Ziegelmauerwerk durch den Nachweis eines erhöhten Feuerwiderstandes bei teilflächig belasteten Außenwandkonstruktionen“ [96].

8 Literatur

[1] H. Kruse und C. Thiele, "Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 21484 N: Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von wärmedämmendem Ziegelmauerwerk durch Erhöhung des Feuerwiderstandes bei unterschiedlichen statischen Ausnutzungsgraden auf Basis eines vereinfachten Nachweisverfahrens", Institut für Ziegelforschung Essen e.V. und Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Berichtszeitraum 01.01.2021 bis 30.06.2023, Dez. 2023.

[2] Statista. „Anzahl der Brände in Deutschland von 2002 bis 2015." https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155263/umfrage/entwicklung-der-gesamtanzahl-der-braende-in-deutschland-seit-2002/ (Zugriff am: 17. Januar 2024).

[3] *Musterbauordnung: Fassung November 2002,* Beschluss der Bauministerkonferenz, Feb. 2019.

[4] Statistisches Bundesamt, *Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff* (Lange Reihen z. T. ab 1980) (2021). Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021.

[5] *Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile: Teil 1: Wände*, 1365-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Aug. 2013.

[6] *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten: Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*, 1996-1-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Apr. 2011.

[7] *National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten: Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*, 1996-1-2/NA, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 2022.

[8] R. Braun und J. Grade, "Wohnungsmarktprognose 2023: Regionalisierte Prognose in drei Varianten mit Ausblick bis 2035", Berlin, empirica-Paper Nr. 271, Rep. 271, Feb. 2023. Zugriff am: 17. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.empirica-institut.de/fileadmin/Redaktion/Publikationen_Referenzen/PDFs/empi256rb.pdf

[9] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks e.V., *Mehrgeschossbau: Massive Argumente pro Mauerwerk*. Berlin, 2015. Zugriff am: 10. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dgfm.de/presse/artikel/mehrgeschossbau-massive-argumente-pro-mauerwerk

[10] M. Pröll, *Ziegellexikon Mauerwerk 2020,* 2020. Aufl. München: G. Peschke Druckerei Gmbh, 2020.

[11] *Feuerwiderstandsprüfungen: Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 1363-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2020.

[12] *Feuerwiderstandsprüfungen: Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren*, 1363-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Okt. 1999.

[13] *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten: Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*, 1996-1-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Feb. 2013.

[14] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks und Wohnungsbau e.V., *Mehrheit der Bauherren setzt auf Mauerwerk: Mauerwerksbau: Wichtiger Beitrag für bezahlbares Wohnen*. Berlin, 2019. Zugriff am: 15. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dgfm.de/aktuelles/artikel/pestel-institut-mehrheit-der-bauherren-setzt-auf-mauerwerk

[15] Bundes Bau Blatt. „Bezahlbar Bauen: Am besten mit Mauerwerk." https://www.bundesbaublatt.de/news/bezahlbar-bauen-am-besten-mit-mauerwerk_3324960.html (Zugriff am: 10. November 2021).

[16] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V., "Bemessung von unbewehrtem Mauerwerk für Querkraftbeanspruchung nach dem allgemeinen Nachweisverfahren", Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V., Berlin, Rep. 8. Zugriff am: 18. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mauerwerksbau-lehre.de/fileadmin/downloads/Kap._8_-_Bemessung_von_unbewehrtem_Mauerwerk_fuer_Q_nach_allg.V.pdf

[17] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., *KALKSANDSTEIN – Statikhandbuch: Berechnung, Bemessung, Beispiele,* 3. Aufl. Düsseldorf: Bau+Technik GmbH, 2014. Zugriff am: 18. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.ks-original.de/media/pdf/04/17/ec/KS_Statikhandbuch.pdf

[18] S. Wagner, B. Harr und U. Meyer, "Ökologisches Bauen mit Ziegeln", Mainz, Jan. 1998. Zugriff am: 21. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2018-10/O_01__Ziegel-Oekobilanz-Broschuere_2002%5B1358%5D.pdf

[19] Verband Österreichischer Ziegelwerke. „Wärme _ ziegel.at." https://www.ziegel.at/ziegeltechnik/bauphysik/waerme (Zugriff am: 14. März 2024).

[20] August Lücking GmbH & Co. KG, "Produkthandbuch 2023: Technische Daten und Ausschreibungstexte", Warburg-Bonenburg, Bausteine für eine gesunde Welt, Dez. 2022. Zugriff am: 18. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.luecking.de/wp-content/uploads/2023/01/luecking_produkthandbuch_2023.pdf

[21] *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, 4102-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 1998.

[22] *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten: Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*, 13501-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2019.

[23] *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, 4102-4, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2016.

[24] U. Meyer, *Baulicher Brandschutz im Wohnungsbau*. Bonn: Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel e. V., 2016.

[25] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks e.V. „Brandschutz mit Mauewerk." https://mauerwerk.online/wp-content/uploads/2020/03/DGfM_Brandschutz-mit-Mauewerk.pdf (Zugriff am: 10. November 2021).

[26] *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten: Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*, 13501-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2016.

[27] *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, 4102-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 1977.

[28] *National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten: Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*, 1996-1-1/NA, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2019.

[29] *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten: Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*, 1996-3, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2010.

[30] S. Baar, *Lohmeyer Baustatik 2: Bemessung und Sicherheitsnachweise,* 13. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.

[31] C.-A. Graubner und B. Purkert, "Nachweis des Feuerwiderstands von Ziegelmauerwerk – Tipps für eine effiziente Bemessung" *Mauerwerk*, Jg. 23, Nr. 5, S. 306–315, 2019, doi: 10.1002/dama.201900010.

[32] *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung: Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1: 2005 + A1:2005/AC:2010*, 1990, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Okt. 2021.

[33] A. Schlundt und U. Meyer, "Bemessung von Ziegelmauerwerk im Brandfall nach DIN EN 1996-1-2/NA und nach allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen", Bonn, Rep. 5/2014, Dez. 2014, doi: 10.1002/dama.201400640. Zugriff am: 28. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2018-10/BSch_04__AMz-Bericht%20005-2014_Bemessung-Brandwand%5B1316%5D.pdf

[34] *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, 4102-4, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mrz. 1994.

[35] *Mauerwerk: Teil 1: Berechnung und Ausführung*, 1053-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Nov. 1996.

[36] Kapl, "c. Pr-17-2.061-De", Prüfanstalt veseli Nad Luznici, Prag, Prüfbericht, Jun. 2017.

[37] M. Junknat und J. Peitzmeier, "PB 3.2/16-292-1", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Mrz. 2017.

[38] M. Junknat und J. Peitzmeier, "PB 3.2/16-181-1", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Sep. 2016.

[39] M. Junknat und J. Peitzmeier, "PB 3.2/17-031-1", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Jun. 2017.

[40] Weingarten, "(2100/860/15)-Wein", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jan. 2016.

[41] Mittmann, "(3436-507-14)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Sep. 2014.

[42] Mittmann, "(3297/050/09)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jul. 2010.

[43] Mittmann, "(3797-073-12)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Apr. 2012.

[44] Mittmann, "(3311/496/12)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Feb. 2013.

[45] Mittmann, "(3419/685/11)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Dez. 2011.

[46] Mittmann, "(3752/833/14)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Aug. 2014.

[47] Mittmann, "(3376/813/11)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jul. 2011.

[48] E. Brehm und C.-A. Graubner, "JCSS probabilistic model code: Part3: Resistance models", Apr. 2011. Zugriff am: 12. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/PMC-3-08-MASONRY-PROPERTIES.pdf

[49] Mittmann, "(3768/953/12)-TM", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, Prüfbericht, Jan. 2014.

[50] S. Hauswaldt, "PB 3.2/14-169-1", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Jul. 2014.

[51] P. Kircheis und S. Hauswaldt, "PB 3.2/14-169-2", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Okt. 2014.

[52] I. Tomelleri, "Entwicklung und Entwurf kleinmaßstäblicher Ersatzprüfungen für Mauerwerk aus wärmedämmenden Hochlochziegeln im Brandfall" Studienarbeit, Massivbau und Baukonstruktion, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2020.

[53] Mittmann, "(3419/685/11)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Dez. 2011.

[54] Mittmann, "(3311/496/12)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Feb. 2013.

[55] Mittmann, "(3525-5226)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Nov. 2006.

[56] Mittmann, "(3197/6895)-TM", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jan. 2006.

[57] Aeissen, "3930/7061 -PK-", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jan. 2002.

[58] Mittmann, "(3001/106/12)-TM", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, Prüfbericht, Mai. 2013.

[59] *Putz: Leichtputze Ausführung*, 18550-4, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Aug. 1993.

[60] *Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen: Teil2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2:2016-09 für Innenputze*, 18550-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jan. 2018.

[61] *Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel: Teil 1: Begriffe und Anforderungen*, 13279-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Nov. 2008.

[62] *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau: Teil 1: Putzmörtel*, 998-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Feb. 2017.

[63] J. Peitzmeier und M. Junknat, "PB 3.2/16-302-1 Ä", MFPA Leipzig GmbH, Leipzig, Prüfbericht, Jun. 2017.

[64] Mittmann, "(3713/840/13)-TM", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, Prüfbericht, Sep. 2013.

[65] Mittmann, "(3365/426/14)-TM", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz und Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, Prüfbericht, Aug. 2014.

[66] Kipry, "(2101/399/16)-Kip", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Okt. 2016.

[67] *Erweiterter Anwendungsbereich der Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen: Teil 12: Tragende Mauerwerkswände*, 15080-12, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jan. 2011.

[68] *Prüfverfahren für Mauersteine: Teil1: Bestimmung der Druckfestigkeit*, 772-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2016.

[69] *Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung - bezeichnet als ThermoPlan MZ 70 - im Dünnbettverfahren mit gedeckelter Lagerfuge*, Z-17.1-1084, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Jan. 2020.

[70] *Mauerwerk aus UNIPOR W07 CORISO Planziegeln im Dünnbettverfahren mit gedeckelter Lagerfuge*, Z-17.1-1056, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Nov. 2020.

[71] *Mauerwerk aus UNIPOR W07 SILVACOR Planziegeln im Dünnbettverfahren mit gedeckelter Lagerfuge*, Z-17.1-1162, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Jul. 2022.

[72] August Lücking GmbH & Co. KG, "Lücking Produkthandbuch 2021: Produktdatenblatt ThermoPlan MZ70 HLZ B 8-0,55", August Lücking GmbH & Co. KG, 2021.

[73] Ziegelwerk Otto Bergmann gmbH, "Produktdatenblatt UNIPOR-W07 CORISO", Ziegelwerk Otto Bergmann gmbH.

[74] *Mauerziegel: Teil 2: Wärmedämmziegel und Hochlochziegel der Rohdichteklassen ≤ 1,0*, 105-2, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jun. 2002.

[75] *Prüfverfahren für Mauersteine: Teil16: Bestimmung der Maße*, 772-16, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jul. 2011.

[76] *Prüfverfahren für Mauersteine: Teil13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen)*, 772-13, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Sep. 2000.

[77] *Prüfverfahren für Mauersteine: Teil9: Bestimmung des Loch- und Nettovolumens sowie des prozentualen Lochanteils von Mauerziegeln und Kalksandsteinen mittels Sandfüllung*, 772-9, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2005.

[78] *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften*, 12571, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Apr. 2022.

[79] *Prüfverfahren für Mauersteine: Teil20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen*, 772-20, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai. 2005.

[80] *Prüfverfahren für Mauerwerk: Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*, 1052-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 1998.

[81] Franken maxit GmbH & CO., "maxit mur 900 D: Deckelnder Dünnbettmörtel", Franken maxit GmbH & CO., Kasendorf, Dez. 2013.

[82] Baumit GmbH, "MineralporLeichtputz MP 69 Speed: Beschleunigt abbindender Kalk-Zement-Leichtputz Typ II für die manuelle und maschinelle Verarbeitung. Leichtputzmörtel LW und CS II nach DIN EN 998-1.", Baumit GmbH, Bad Hindelang, Mai. 2020.

[83] Baumit GmbH, "Kalkputz Klima KP 36 W: Naturweißer Kalkputz für die manuelle und maschinelle Verarbeitung im Innenbereich. Normalputzmörtel GP und CS II nach DIN EN 998-1.", Baumit GmbH, Bad Hindelang, Mrz. 2020.

[84] *Prüfverfahren für Mörtel und Mauerwerk: Teil 12: Bestimmung der Haftzugfestigkeit zweischen Putz und Untergrund*, 1015-12, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2016.

[85] Franken maxit GmbH & CO., "maxit ip 23 F Kalk-Gips-Maschinenputz", Franken maxit GmbH & CO., Kasendorf, Jan. 2023.

[86] *Prüfverfahren für Mauerwerk: Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit*, 1052-5, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jun. 2005.

[87] J. Bošnjak, S. Gambarelli, A. Sharma und A. Mešković, "Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures" *Otto-Graf-Journal*, Jg. 2019, Nr. 18, S. 41–52, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mpa.uni-stuttgart.de/institut/publikationen/otto-graf-journal/new_downloadgallery/04_Bosnjak.pdf

[88] U. Meyer, *Biegezugfestigkeit fxk1 von Ziegelmauerwerk senkrecht zur Lagerfuge*. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2019. Zugriff am: 8. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ziegel.de/sites/default/files/2022-01/AMz-Bericht_05-2019_Biegezugfestigkeit.pdf

[89] N. Oeschler, *Thermische Ausdehnung und Magnetostriktion an Schwere-Fermionen-Systemen* (Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2003) (Berichte aus der Physik). Aachen: Shaker, 2003. Zugriff am: 12. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/thermische-ausdehnung/16544

[90] J. M. Hausmann, *Modellierung und Optimierung faserverstärkter Titanlegierungen* (Dissertation 2003). Berlin: Tenea Verlag für Medien, 2003. Zugriff am: 12. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=sXyr0fyhSfkC&oi=fnd&pg=PA84&dq=techni-scher+und+physikalischer+w%C3%A4rmeausdehnungskoeffizienten&ots=6RFpMhCLAU&sig=AbtQMUnUdwBqbbTphgxRiUl3RS4#v=onepage&q=techni-scher%20und%20physikalischer%20w%C3%A4rmeausdehnungskoeffizienten&f=false

[91] Ziegel.at. „Bemessung Brand: Widerstände nach ÖNORM B 1996-1-2.” https://www.ziegel-technik.at/bemessung-brand (Zugriff am: 12. Mai 2023).

[92] F. R. R. Ayala, "Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures" Doctor thesis, School of Mechanical, Aerosoace and Civil Engineering, Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://core.ac.uk/download/pdf/40024243.pdf

[93] Lange, "(2103/927/22)-FL", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jun. 2023.

[94] M. Kubista, A. Jäger und A. Lehmden, "Einführung mineralwollegefüllter Ziegel in Österreich - Optimierung und Prüfung des Brandverhaltens" *Mauerwerk*, Jg. 17, Nr. 3, S. 149–154, 2013. doi: 10.1002/dama.201300577. [Online]. Verfüg-

bar unter: https://www.academia.edu/4235425/Einf%C3%BChrung_mineralwollegef%C3%BCllter_Ziegel_in_%C3%96sterreich_Optimierung_und_Pr%C3%BCfung_des_Brandverhaltens

[95] S. Russo und F. Sciarretta, "Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties—An overview" *Fire Safety Journal*, Nr. 55, S. 69–86, 2013. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.001. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711212001221

[96] H. Kruse und C. Thiele, "Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 22454 N: Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von monolithischem wärmedämmendem Ziegelmauerwerk durch den Nachweis eines erhöhten Feuerwiderstandes bei teilflächig belasteten Außenwandkonstruktionen", Institut für Ziegelforschung Essen e.V. und Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Berichtszeitraum 01.05.2022 bis 30.10.2024, bisher unveröffentlicht.

[97] Weingarten, "(2100/457/15)-Wein", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Feb. 2016.

[98] T. Gernay, "Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns" *Fire Safety Journal*, Jg. 104, S. 67–78, 2019. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.01.007. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711218303916

[99] P. Thiessen, "Prüfbericht Nr. 211853", MPA Hannover, Hannover, Prüfbericht, Sep. 2021.

[100] *Statistische Auswertung von Daten: Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen (ISO 16269-6:2005)*, 16269-6, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Okt. 2009.

[101] P. Hofbauer, H. Metzger-Schuhäker und B. Wessenberg, *Kompetenz: Mathematik, Band 4 für Höhere Lehranstalten für Humanberufe,* 1. Aufl. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky, 2017. Zugriff am: 16. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hpt.at/verlagsprogramm/schulbuecher/kompetenzmathematik-band-4-fuer-hoehere-lehranstalten-fuer-humanberufe

[102] B. Trinks. „Excel 2010 - Trendlinien im Diagramm." https://www.computerfreun.de/skripten/trendlinien.pdf (Zugriff am: 16. Oktober 2023).

[103] W. Müller. „Kurvenanpassung in EXCEL." https://silo.tips/download/kurvenanpassung-in-excel (Zugriff am: 16. Oktober 2023).

[104] *Mechanical fasteners for use in concrete*, 330232-01-0601, EOTA, Dez. 2019.

[105] Kipry, "(2100/173/15)-Kip", TU Braunschweig, Braunschweig, Prüfbericht, Jun. 2015.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Vergleich der in Deutschland bei dem Neubau von Wohnungen verwendeten Baustoffe (umbauter Raum nach erteilten Baugenehmigungen) [4] 1

Abb. 1.2: Vergleich der in Deutschland bei dem Neubau von Wohnungen im Bereich Mauerwerk verwendeten Baustoffe (umbauter Raum nach erteilten Baugenehmigungen) [4] 2

Abb. 1.3: Struktur der Dissertationsschrift 4

Abb. 2.1: Exemplarische Lochbildstrukturen von wärmedämmenden Hochlochziegeln mit Großkammern (Typ 1) sowie Kleinlochung verfüllt (Typ 2) und unverfüllt (Typ 3) 8

Abb. 2.2: Feuerwiderstandsprüfung mit beispielhafter Anordnung von Thermoelementen an der brandabgewandten Wandseite und Anordnung der Durchbiegungsmessungen für Ziegelmauerwerkswände gemäß DIN EN 1365-1 [5] 15

Abb. 2.3: ETK mit zugehörigem Toleranzbereich nach DIN EN 1363-1 [11] 16

Abb. 3.1: Überproportionale Darstellung der Verformung einer Mauerwerkswand zum Beginn einer Feuerwiderstandsprüfung [52] 26

Abb. 3.2: Materialverhalten und überproportionale Darstellung der Verformung einer Mauerwerkswand bei andauernder Feuerwiderstandsprüfung [52] 27

Abb. 3.3: Exemplarische Verformung einer Mauerwerkswand bei einer Feuerwiderstandsprüfung [53] 28

Abb. 4.1: Rückansicht vom Versuchsaufbau zur Bestimmung der kritischsten Dämmstofffüllung für den Brandfall 35

Abb. 4.2: Temperaturverläufe über den Ziegelquerschnitt während der Feuerwiderstandsprüfung 36

Abb. 4.3: Schadensbilder beider Dreisteinkörper nach dem Brandversuch 37

Abb. 4.4: Steganordnungen und Abmessungen ThermoPlan MZ70 (Längsstege exemplarisch bei Ziegelbreite 365 mm) [69] 39

Abb. 4.5: Steganordnungen und Abmessungen UNIPOR W07 CORISO [70] 40

Abb. 4.6: Versuchsaufbau für Teilflächenbelastungen 51

Abb. 4.7: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit 54

Abb. 4.8: Messergebnisse der Wärmeausdehnung in Längs- und Querrichtung des Großkammerziegels ThermoPlan MZ70 [1] 55

Abb. 4.9: Messergebnisse der Wärmeausdehnung in Längs- und Querrichtung des kleingelochten Ziegels UNIPOR W07 CORISO [1] 56

Abb. 4.10: Darstellung der Versuchsdurchführung mit 60 Minuten Brandbeanspruchung....57

Abb. 4.11: Prüfstand für Feuerwiderstandsprüfungen an Kleinprüfkörpern (H x L = 1,5 m x 1,0 m)....58

Abb. 4.12: Graphische Darstellung der Resttragfähigkeiten nach unterschiedlich langen Brandbeanspruchungen....59

Abb. 4.13: Prüfstand für Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden H x L = 3,0 m x 1,0 m....62

Abb. 4.14: Grafische Darstellung der Versuchsergebnisse der kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C....67

Abb. 4.15: Prüfstand der RPTU für Feuerwiderstandsprüfungen an Mauerwerkswänden H x L = 3,0 m x 3,0 m....68

Abb. 5.1: Überproportionale Darstellung der horizontalen Verformungen einer Mauerwerkswand zum Beginn einer Brandbeanspruchung....75

Abb. 5.2: Überproportionale Darstellung der horizontalen Verformungen einer Mauerwerkswand vor einem Stabilitätsversagen (Knicken) bei einer Brandbeanspruchung....76

Abb. 5.3: Darstellung der vertikalen Verformungen und Prüflast (A8-W07 UV-365mm-280kN)....79

Abb. 5.4: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (A8-W07 UV-365mm-280kN)....79

Abb. 5.5: Darstellung der erhöhten Spannungen und resultierender Rissbildung aufgrund auftretender Verformungen....81

Abb. 5.6: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (D1-MZ70-365mm-200kN/m)....84

Abb. 5.7: Darstellung der horizontalen Verformungen in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe sowie der Prüflast (D2-MZ70-365mm-200kN/m)....84

Abb. 5.8: Darstellung der vertikalen Verformungen und Prüflast (D1-MZ70-365mm-200kN/m)....85

Abb. 5.9: Darstellung des Mittelwerts der vertikalen Verformung unterschiedlich dicker Wände bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi}....86

Abb. 5.10: Darstellung des Mittelwerts der horizontalen Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe unterschiedlich dicker Wände bei gleichem Ausnutzungsfaktor α_{fi}....87

Abb. 5.11: Darstellung des Mittelwerts der vertikalen Verformung unterschiedlich dicker Wände bei gleicher Normalkraftbeanspruchung 88

Abb. 5.12: Darstellung des Mittelwerts der horizontalen Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe unterschiedlich dicker Wände bei gleicher Normalkraftbeanspruchung 89

Abb. 5.13: Gegenüberstellung der Ausnutzungsfaktoren α_{fi} und Feuerwiderstandsdauern unterschiedlich dicker Mauerwerkswände ... 90

Abb. 5.14: Temperaturmessungen in der Mitte des Außensteges der brandzugewandten Wandseite bis zum ersten Lastabfall 93

Abb. 5.15: Mathematische Funktionen zur Auswertung von Feuerwiderstandsprüfungen an Wänden bestehend aus wärmedämmenden Hochlochziegeln 108

Abb. 5.16: Darstellung der Variante 1 der Auswertung 111

Abb. 5.17: Darstellung der Variante 2 der Auswertung 112

Abb. 5.18: Darstellung der gewählten Variante der Auswertung 115

Abb. 5.19: Darstellung des Ausnutzungsfaktors α_{fi} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserien A und B 120

Abb. 5.20: Darstellung des Ausnutzungsgrade γ_{Rm} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserien A und B 121

Abb. 5.21: Darstellung des Ausnutzungsgrades γ_{Rm} mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserie C 124

Abb. 5.22: Darstellung des Ausnutzungsgrades $\gamma_{Rm,Versuch}$ mit zugehörigen Gleichungen der Versuchsserie C 126

Abb. 6.1: Festlegung der Mindestfeuerwiderstandsklassen für wärmedämmende Hochlochziegel 130

Abb. 6.2: Abstände und Verteilungsdichtefunktion 132

Abb. 6.3: Temperaturverteilung für Ziegelmauerwerk mit einer Trockenrohdichte von 1000 kg/m³ bis 2000 kg/m³ [6] 147

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Übersicht Ziegelarten [10] 7

Tab. 2.2: Gebäudeklassen und deren Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit [3] 10

Tab. 2.3: Baustoffklassen nach DIN 4102-1 [21] und entsprechender Euroklasse nach DIN EN 13501-1 [22] 11

Tab. 3.1: Übersicht Prüfberichte 23

Tab. 3.2: Übersicht Prüfberichte mit gleichen Ziegeln 24

Tab. 3.3: Auszug des Beobachtungsprotokolls der Feuerwiderstandsprüfung aus Abb. 3.3 [53] 29

Tab. 3.4: Theoretische Überlegungen in Bezug auf den Feuerwiderstand 33

Tab. 4.1: Produktdaten Großkammer-Hochlochziegel ThermoPlan MZ70 [72] ... 38

Tab. 4.2: Produktdaten kleingelochter Hochlochziegel UNIPOR W07 CORISO [73] 39

Tab. 4.3: Aus Steindruckfestigkeiten resultierende charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten fk für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70 42

Tab. 4.4: Aus Steindruckfestigkeiten resultierende charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten fk für den kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO 43

Tab. 4.5: Ergebnisse der maximalen vertikalen Tragwiderstände $N_{Rm,Versuch}$ der Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) bei 21 °C 44

Tab. 4.6: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit fk 45

Tab. 4.7: Maßgebenden Ziegelabmessungen und charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten fk 46

Tab. 4.8: Produktdaten vom Dünnbettmörtel maxit mur 900 D [81] 47

Tab. 4.9: Produktdaten vom Außenputz Baumit MineralporLeichtputz MP 69 Speed [82] 48

Tab. 4.10: Produktdaten vom Innenputz Baumit Kalkputz Klima KP 36 W [83] 49

Tab. 4.11: Ergebnisse der Teilflächenbelastungen 52

Tab. 4.12: Resttragfähigkeit nach unterschiedlich langer Brandbeanspruchung .. 58

Tab. 4.13: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A 63

Tab. 4.14: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie B 65

Tab. 4.15: Daten der kleinformatigen Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C 66

Tab. 4.16: Daten der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D zur Validierung 69

Tab. 5.1: Vertikale und horizontale Verformungen der Prüfkörper mit einer Höhe von 3,0 m sortiert nach Höhe des Ausnutzungsfaktors α_{fi} 72

Tab. 5.2: Vertikale und horizontale Verformungen der Prüfkörper mit einer Höhe von 3,0 m sortiert nach Höhe der Prüflast 73

Tab. 5.3: Mauerwerkswände gleicher Normalkraftbeanspruchung 88

Tab. 5.4: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie A ... 117

Tab. 5.5: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie B ... 119

Tab. 5.6: Resultierende Ausnutzungsfaktoren α_{fi} gemäß Abb. 5.19 121

Tab. 5.7: Resultierende Ausnutzungsgrade γ_{Rm} gemäß Abb. 5.20 122

Tab. 5.8: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C gemäß γ_{Rm} 123

Tab. 5.9: Resultierende Ausnutzungsgrade γ_{Rm} gemäß Abb. 5.21 125

Tab. 5.10: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie C gemäß $\gamma_{Rm,Versuch}$ 125

Tab. 5.11: Resultierende Ausnutzungsgrade $\gamma_{Rm,Versuch}$ gemäß Abb. 5.22 ... 126

Tab. 5.12: Auswertung der Feuerwiderstandsprüfungen der Versuchsserie D zur Validierung 127

Tab. 6.1: Mindestfeuerwiderstandsklassen 132

Tab. 6.2: Anwendungsbedingungen der Mindestfeuerwiderstandsklassen 134

Tab. 6.3: Zusammenfassung der Ausnutzungsgrade γ_{Rm} und $\gamma_{Rm,Versuch}$ .. 137

Tab. 6.4: Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung gemäß Tab. 6.3 138

Tab. 6.5: Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung aus Versuchsabgleich 0,365 m dicker Wände 139

Tab. 6.6: Gegenüberstellung der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung 139

Tab. 6.7: Abgleich der Mindestfeuerwiderstandsklassen anhand von Wänden H x L = 3,0 m x 1,0 m 143

Tab. 6.8: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern anhand unterschiedlich langer Mauerwerkswände 144

Tab. 6.9: Abgleich der Anpassungsfaktoren zur Lasterhöhung anhand unterschiedlich hoher Mauerwerkswände 145

Tab. 6.10: Annahmen zur ineffektiven Dicke t_{ineff} für verschiedene Ziegeltypen . 148

Anlage A Probekörperzeichnungen

Durch die aufgebrachte Putzstärke von 15 mm und der ziegeltypabhängigen Steganordnungen ergeben sich nachfolgende Abstände für die Thermoelemente im Wandinneren für den Großkammerziegel ThermoPlan MZ70:

TE1: 15 mm (Putz) + 14,9 mm / 2 (halber Außensteg) = 22,45 mm

TE2: 22,45 mm (Wert TE1) + (43,45 mm (Kammer) + 14,9 mm (Außensteg)) = 22,45 + 58,35 = 80,8 mm

Weitere Thermoelemente: TE(x) = TE(x-1) + 58,35 mm

Für den kleingelochten Ziegel UNIPOR W07 CORISO ergeben sich folgende Abstände für die Thermoelemente im Wandinneren:

TE1: 15 mm (Putz) + 12 mm / 2 (halber Außensteg) = 21 mm

TE2: 15 mm (Putz) + 12 mm (Außensteg) + 17,88 mm (Kammer) + 5,2 / 2 (halber Innensteg) = 47,48 mm

TE3: TE2 + 17,88 mm (Kammer) + 5,2 mm (Innensteg) = TE2 + 23,08 mm = 70,56 mm

Weitere Thermoelemente: TE(x) = TE(x-1) + 23,08 mm

Es folgen die Prüfkörperzeichnungen für die durchgeführten Versuche mit den Nennmaßen der verwendeten Ziegel.

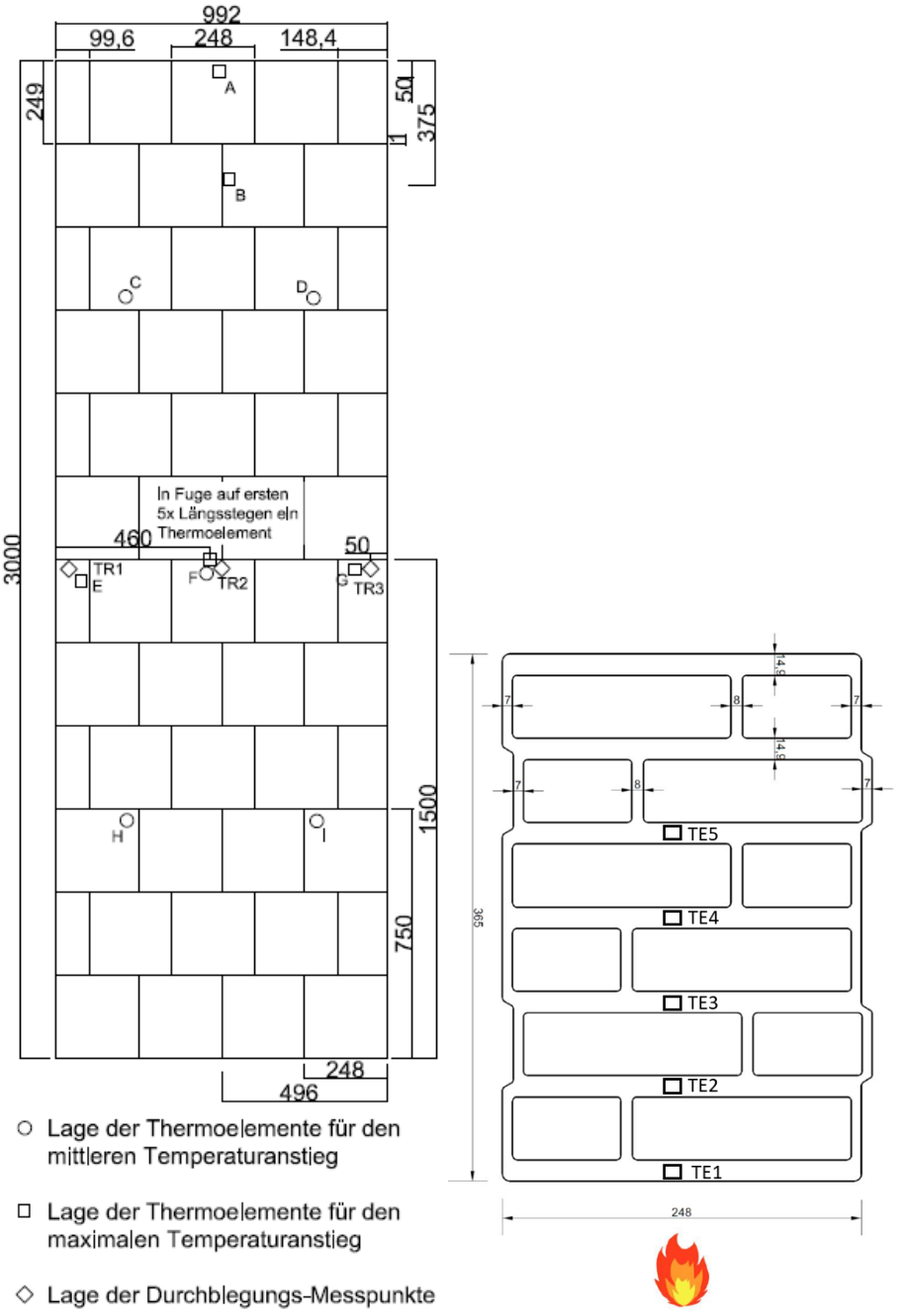


Abb. A.1: Zeichnung des Probekörpers (H x L = 3,0 m x 1,0 m) und Einzelsteines ThermoPlan MZ70 inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfungen

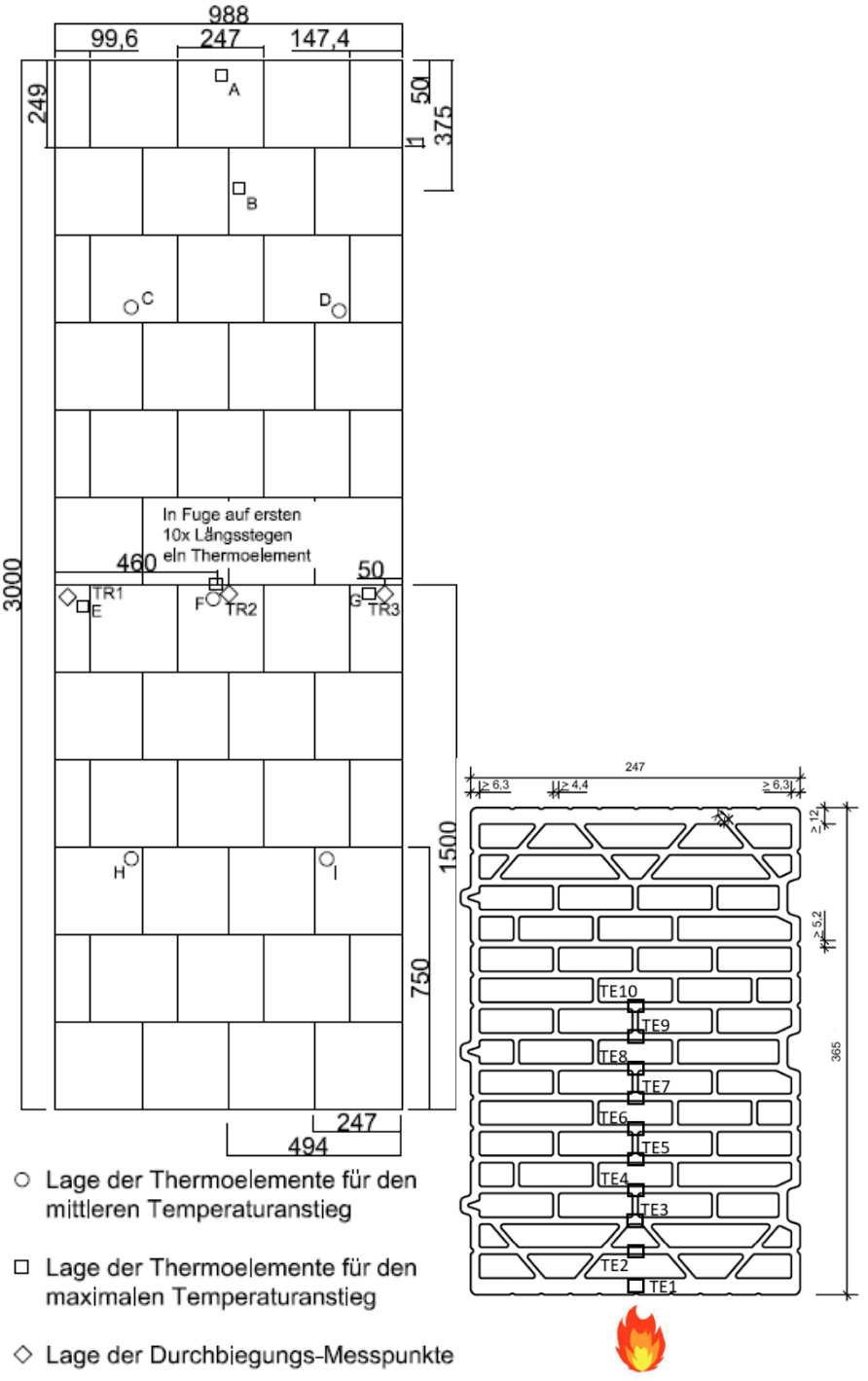


Abb. A.2: Zeichnung des Probekörpers (H x L = 3,0 m x 1,0 m) und Einzelsteines UNIPOR W07 CORISO inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfungen

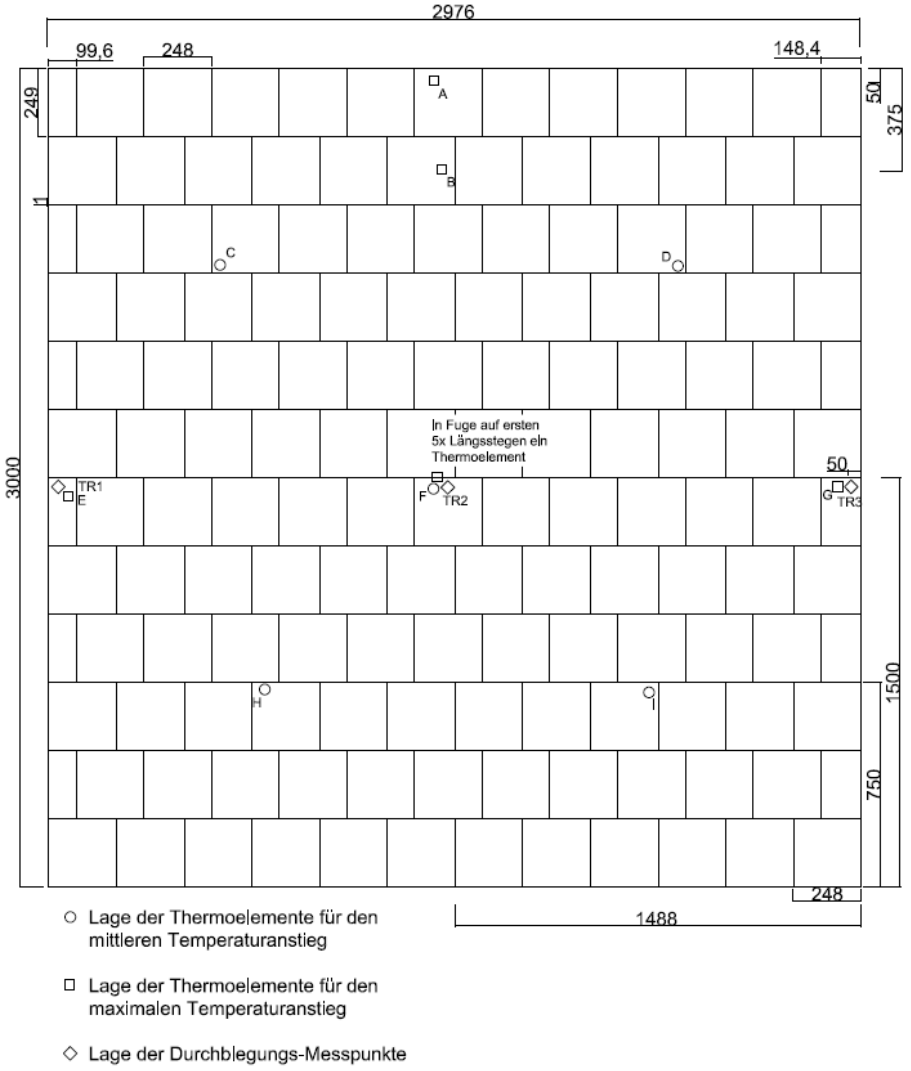


Abb. A.3: Zeichnung des Probekörpers (H x L = 3,0 m x 3,0 m) und Einzelsteines ThermoPlan MZ70 inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m

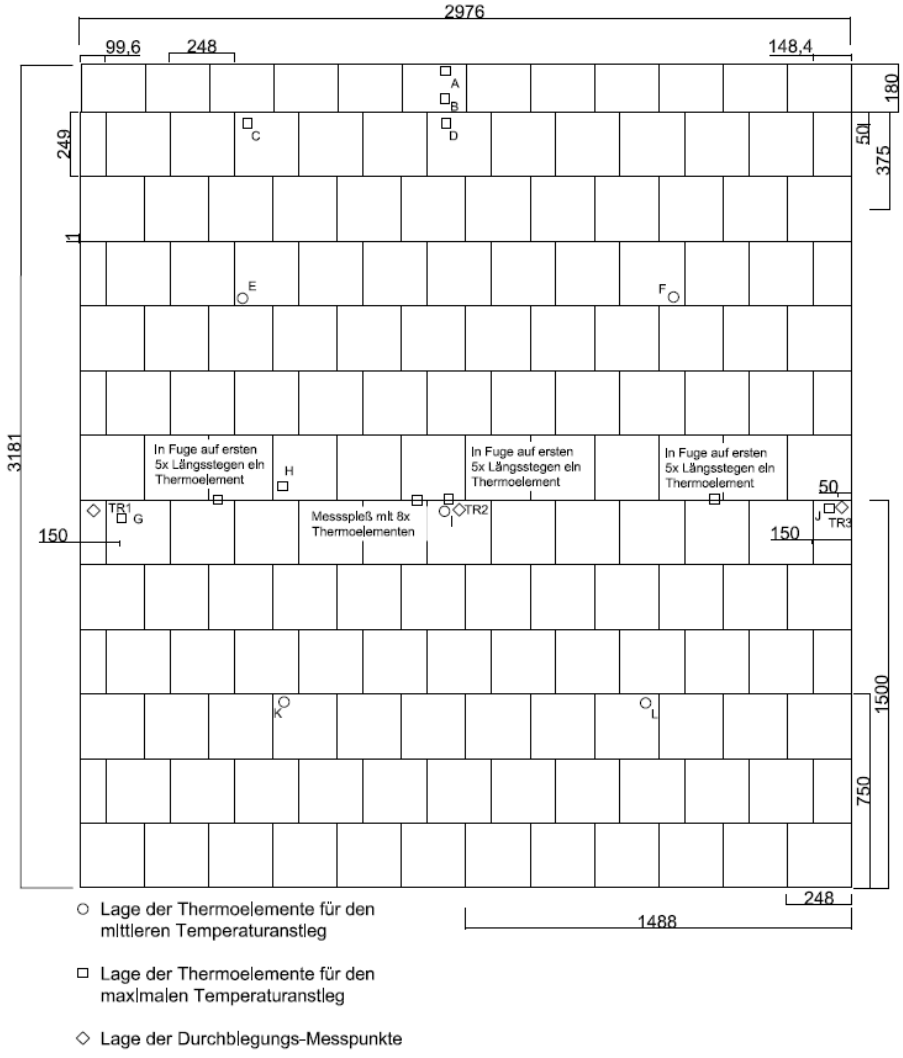


Abb. A.4: Zeichnung des Probekörpers (H x L = 3,0 m x 3,0 m) und Einzelsteines ThermoPlan MZ70 inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m

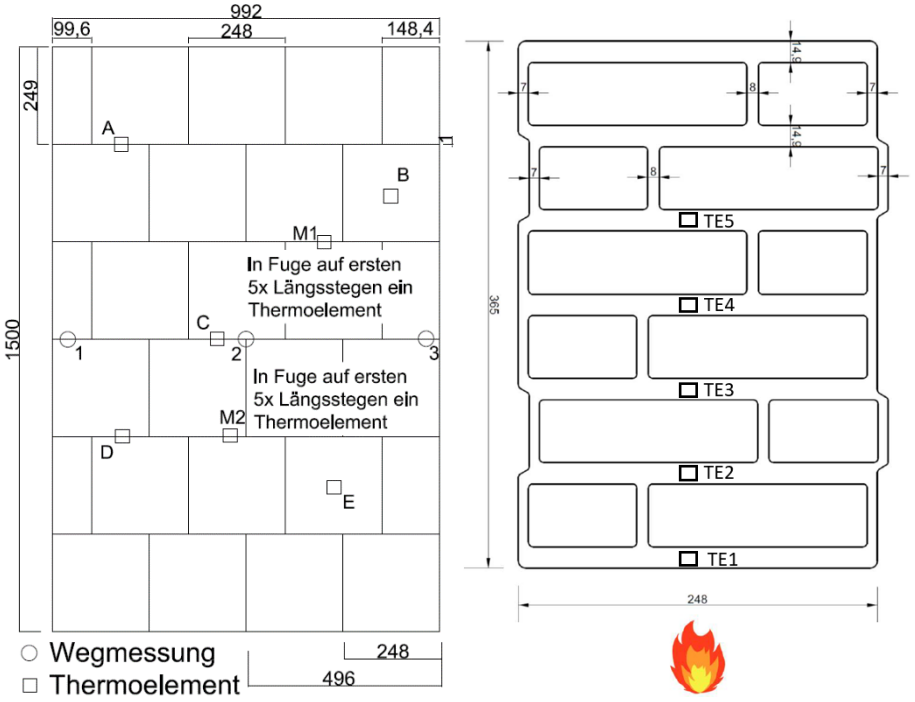


Abb. A.5: Zeichnung des Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) und Einzelsteines ThermoPlan MZ70 inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfungen

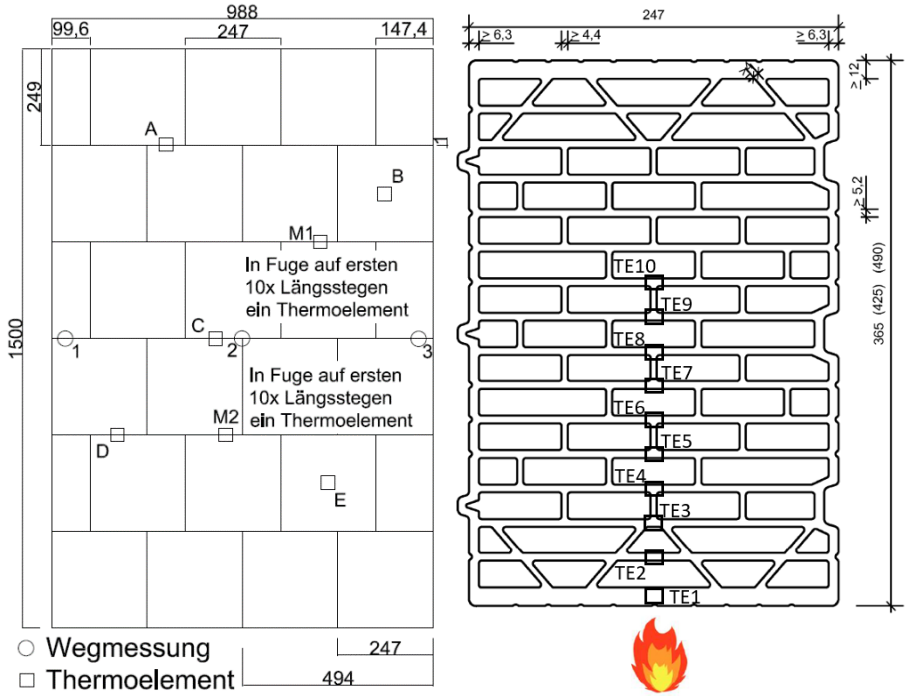


Abb. A.6: Zeichnung des Kleinprüfkörper (H x L = 1,5 m x 1,0 m) und Einzelsteines UNIPOR W07 CORISO inkl. Messtechnikanordnung für Feuerwiderstandsprüfungen

Anlage B Prüfzeugnisse der Ziegel

Prüfzeugnis 002/22/S/3a ThermoPlan MZ 70 unverfüllt mit den Abmessungen 248x240x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/3a

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	15.12.2021
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 22 10 2021 261 P
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking
Prüfungsart:	Regelprüfung

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,55 - 248 x 240 x 249 mm

Proben Nummer	Abmessungen			Masse trocken verfüllt	Ziegel-roh-dichte verfüllt	Roh-dichte des Dämm-stoffes	Masse trocken unver-füllt	Ziegel-roh-dichte unver-füllt	Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe							β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kg/m³	kg	kg/m³	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/31	252	239	249,3	8,259	550	49,2	7,791	519	614	10,2	10,2
1/B/32	252	239	249,0	8,272	552	46,7	7,828	522	724	12,0	12,0
1/B/33	251	240	249,2	8,320	554	51,8	7,827	521	646	10,7	10,7
1/B/34	252	238	249,5	8,157	545	44,7	7,733	517	603	10,1	10,1
1/B/35	251	240	251,4	8,186	541	47,5	7,730	510	593	9,8	9,8
1/B/36	252	240	249,1	8,289	550	50,0	7,811	518	597	9,9	9,9
1/B/37	251	239	249,9	8,271	552	45,5	7,839	523	708	11,8	11,8
1/B/38	251	239	250,1	8,238	549	52,1	7,742	516	750	12,5	12,5
1/B/39	251	240	249,8	8,245	548	42,0	7,844	521	655	10,9	10,9
1/B/40	252	239	249,3	8,262	550	46,1	7,823	521	586	9,7	9,7
Mittelwert:	252	239	249,7	8,250	549	47,6	7,797	519	648	10,8	10,8
Maßspanne:	1	2	2,4							Formfaktor: 1,0	

Anforderungen	Abmessungen				Ziegel-Rohdichte, verfüllt	Rohdichte des Dämmstoffes	Ziegel-Rohdichte, unverfüllt	Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe					
	mm	mm	mm		kg/m³	kg/m³	kg/m³	N/mm²
Nennmaß:	248	240	249,0	Mittelwert:	≤ 535	≤ 51,8	≤ 490	≥ 10,0
Kleinstmaß:	238	230	248,0		≥ 505	≥ 38,3	≥ 475	
Größtmaß:	253	248	250,0	Einzelwert:	≤ 565		≤ 530	≥ 8,0
Maßspanne:	10	10	1,0		≥ 475		≥ 445	
erfüllt:	ja	ja	nein		nein	ja	nein	ja

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/3a Seite: 2

	Kammerreihen	Gesamtlochquerschnitt	Stege			
			Längs	Innenquer		Außenquer
	Anzahl	%	mm	mm	mm	mm
Messwert:	4	63,4	13,1	7,6		8,6
Sollwert:	= 4	≥ 15,0 ≤ 65,0	≥ 13,2	≥ 8,0	≥	≥ 7,0
erfüllt:	ja	ja	nein	nein		ja

	Summe der Querstegdicken	
	mm	mm/m
Messwert:	27	108
Sollwert:		≥ 88 ≤ 97
erfüllt:		nein

Proben Nummer	Gewicht			Scherbenrohdichte	Volumen			Lochanteil
	trocken	nass	unter Wasser		Sand Vs,u	Brutto Vg, u	Netto Vn, u	
	g	g	g	kg/m³	ml	ml	ml	%
1/B/31	7791	9820	4560	1481	9501	15015	5513	63,3
1/B/32	7828	9810	4560	1491	9494	14997	5503	63,3
1/B/33	7827	9840	4570	1485	9496	15012	5516	63,3
1/B/34					9510	14964	5454	63,6
1/B/35					9571	15144	5573	63,2
1/B/36					9547	15066	5519	63,4
1/B/37					9539	14991	5452	63,6
1/B/38					9564	15003	5439	63,7
1/B/39					9505	15048	5543	63,2
1/B/40					9535	15015	5480	63,5
Mittelwert:	7815	9823	4563	1486	9526	15025	5499	63,4
Anforderung:				≤ 1390				
erfüllt:				nein				

Der prozentuale Lochanteil wird nach DIN EN 772 – 9 durch Sandfüllung ermittelt.

Proben Nummer	Scherbenrohdichte	Volumen	Masse		Bezugsfeuchtegehalt	
			feucht 23°C / 80%r.F.	nach der Trocknung	Masse bezogen	Volumen bezogen
	[kg/m³]	[dm³]	[g]	[g]	$U_{m,80}$ [%]	$U_{v,80}$ [%]
1/B/40 a		0,499	744,0	740,7	0,44	0,66
1/B/40 b		0,701	1049,1	1041,8	0,70	1,03
1/B/40 c	1486	0,916	1365,0	1360,8	0,31	0,46
1/B/40 d		0,808	1207,2	1199,9	0,60	0,90
1/B/40 e		0,485	723,4	720,1	0,46	0,68
Mittelwert:					0,50	0,75
Anforderung:					≤ 0,5	
erfüllt:					ja	

Das Probenvolumen (Scherbenvolumen) wird aus dem Quotienten von Trockenmasse und Scherbenrohdichte ermittelt.

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/3a Seite: 3

Proben Nummer	Ebenheit						
	oben		unten		Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	mm		
1/B/31	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/33	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja

Proben Nummer	Parallelität						
	Ecke				Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	mm		
1/B/31	249,5	249,3	249,2	249,1	0,4	≤ 1,0	ja
1/B/32	249,3	249,2	249,2	249,3	0,1	≤ 1,0	ja
1/B/33	249,1	249,2	249,5	249,2	0,4	≤ 1,0	ja

Gesamtwertung:

Die untersuchten Ziegel haben die Prüfung gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z – 17.1 - 1084 des DIBT, Berlin nicht bestanden.

Sie erfüllen nicht die Forderungen an:

ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,55 - 248 x 240 x 249 mm.

Aufgrund der in Wandlängsrichtung durchlaufenden Innenstege handelt es sich um Ziegel, die in den Erdbebenzonen 2 und 3 verwendet werden dürfen.

Die Kammern sind vollständig verfüllt.

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 30.05.2022 gültig.

Die werkseigene Produktionskontrolle wird normgerecht durchgeführt.

Essen, den 23.03.2022
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Dieser Prüfbericht umfasst 3 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle gebunden

QsM
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Prüfzeugnis 002/22/S/3b Druckfestigkeit ThermoPlan MZ 70 verfüllt mit den Abmessungen 248x240x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/3b

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	15.12.2021
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 22 10 2021 261 P
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,55 - 248 x 240 x 249 mm

Druckfestigkeit mit Füllung in den Ziegeln:

Proben Nummer	Abmessungen			Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe		β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/101	249	240	249	626	10,5	10,5
1/B/102	249	240	250	668	11,2	11,2
1/B/103	247	240	249	655	11,0	11,0
1/B/104	248	241	249	634	10,6	10,6
1/B/105	249	239	248	590	9,9	9,9
1/B/106	247	240	249	683	11,5	11,5
1/B/107	248	241	249	497	8,3	8,3
1/B/108	249	240	248	686	11,5	11,5
1/B/109	249	238	249	793	13,4	13,4
1/B/110	250	240	249	689	11,5	11,5
Mittelwert:	249	240	248,9	652	10,9	10,9
Maßspanne:	3	3	2,0	Formfaktor:		1,0

Anforderungen	Abmessungen				Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe		
	mm	mm	mm		N/mm²
Nennmaß:	248	240	249,0	Mittelwert:	≥ 10,0
Kleinstmaß:	238	230	248,0		
Größtmaß:	253	248	250,0	Einzelwert:	≥ 8,0
Maßspanne:	10	10	1,0		
erfüllt:	ja	ja	nein		ja

Prüfzeugnis 002/22/S/2 ThermoPlan MZ 70 unverfüllt mit den Abmessungen 248x365x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/2

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	10.03.2022
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 08 10 2021 A 262
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking
Prüfungsart:	Regelprüfung

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,60 - 248 x 365 x 249 mm

Proben Nummer	Abmessungen			Masse trocken verfüllt	Ziegel-roh-dichte verfüllt	Roh-dichte des Dämm-stoffes	Masse trocken unver-füllt	Ziegel-roh-dichte unver-füllt	Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe							β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kg/m³	kg	kg/m³	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/11	252	365	249,3	13,605	593	45,7	12,965	565	1202	13,1	13,1
1/B/12	253	364	249,4	13,559	590	43,5	12,949	564	1201	13,0	13,0
1/B/13	253	364	250,0	13,551	589	44,0	12,932	562	1323	14,4	14,4
1/B/14	252	365	249,6	13,682	596	48,0	13,008	567	1310	14,2	14,2
1/B/15	252	364	249,6	13,567	593	45,5	12,930	565	1307	14,2	14,2
1/B/16	252	364	249,5	13,608	595	48,0	12,936	565	1176	12,8	12,8
1/B/17	252	364	249,5	13,682	598	49,8	12,985	567	1260	13,7	13,7
1/B/18	252	363	249,6	13,534	593	41,8	12,950	567	1263	13,8	13,8
1/B/19	252	364	249,6	13,509	590	44,7	12,883	563	1441	15,7	15,7
1/B/20	253	365	250,0	13,623	590	49,3	12,927	560	1263	13,7	13,7
Mittelwert:	252	364	249,6	13,592	593	46,0	12,947	564	1275	13,9	13,9
Maßspanne:	1	2	0,7							Formfaktor: 1,0	

Anforderungen	Abmessungen				Ziegel-Rohdichte, verfüllt	Rohdichte des Dämmstoffes	Ziegel-Rohdichte, unverfüllt	Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe					
	mm	mm	mm		kg/m³	kg/m³	kg/m³	N/mm²
Nennmaß:	248	365	249,0	Mittelwert:	≤ 570	≤ 51,8	≤ 540	≥ 10,0
Kleinstmaß:	238	355	248,0		≥ 555	≥ 38,3	≥ 525	
Größtmaß:	253	373	250,0	Einzelwert:	≤ 600		≤ 570	≥ 8,0
Maßspanne:	10	12	1,0		≥ 525		≥ 495	
erfüllt:	ja	ja	ja		nein	ja	nein	ja

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/2 Seite: 2

	Kammerreihen	Gesamtlochquerschnitt	Stege			
			Längs	Innenquer		Außenquer
	Anzahl	%	mm	mm	mm	mm
Messwert:	6	61,1	15,3	10,3		12,6
Sollwert:	= 6	≥ 15,0 ≤ 64,0	≥ 14,9	≥ 8,0	≥	≥ 7,0
erfüllt:	ja	ja	ja	ja		ja

	Summe der Querstegdicken	
	mm	mm/m
Messwert:	33	132
Sollwert:		≥ 88 ≤ 97
erfüllt:		nein

Proben Nummer	Gewicht			Scherbenrohdichte	Volumen			Lochanteil
	trocken	nass	unter Wasser		Sand Vs,u	Brutto Vg, u	Netto Vn, u	
	g	g	g	kg/m³	ml	ml	ml	%
1/B/11	12965	16250	7790	1533	14085	22931	8846	61,4
1/B/12	12949	16230	7720	1522	14051	22968	8917	61,2
1/B/13	12932	16200	7740	1529	13994	23023	9029	60,8
1/B/14					14007	22958	8951	61,0
1/B/15					13934	22895	8961	60,9
1/B/16					13964	22886	8922	61,0
1/B/17					14022	22886	8864	61,3
1/B/18					13985	22832	8847	61,3
1/B/19					14067	22895	8828	61,4
1/B/20					14073	23086	9013	61,0
Mittelwert:	12949	16227	7750	1528	14018	22936	8918	61,1
Anforderung:				≤ 1460				
erfüllt:				nein				

Der prozentuale Lochanteil wird nach DIN EN 772 – 9 durch Sandfüllung ermittelt.

Proben Nummer	Scherbenrohdichte	Volumen	Masse		Bezugsfeuchtegehalt	
			feucht 23°C / 80%r.F.	nach der Trocknung	Masse bezogen	Volumen bezogen
	[kg/m³]	[dm³]	[g]	[g]	$U_{m,80}$ [%]	$U_{v,80}$ [%]
1/B/40 a		0,499	744,0	740,7	0,44	0,66
1/B/40 b		0,701	1049,1	1041,8	0,70	1,03
1/B/40 c	1486	0,916	1365,0	1360,8	0,31	0,46
1/B/40 d		0,808	1207,2	1199,9	0,60	0,90
1/B/40 e		0,485	723,4	720,1	0,46	0,68
Mittelwert:					0,50	0,75
Anforderung:					≤ 0,5	
erfüllt:					ja	

Die hier angegebene Bezugsfeuchte wurde aus dem Prüfzeugnis 002/22/S/3 genommen und gilt für alle Ziegel der Rohdichteklasse 0,60.

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/2 Seite: 3

Proben Nummer	Ebenheit						
	oben		unten		Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	mm		
1/B/11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja

Proben Nummer	Parallelität						
	Ecke				Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	mm		
1/B/11	249,6	249,4	249,4	249,3	0,3	≤ 1,0	ja
1/B/12	249,6	249,8	249,4	249,5	0,4	≤ 1,0	ja
1/B/13	249,2	249,3	249,5	249,6	0,4	≤ 1,0	ja

Gesamtwertung:

Die untersuchten Ziegel haben die Prüfung gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z – 17.1 - 1084 des DIBT, Berlin nicht bestanden.

Sie erfüllen nicht die Forderungen an:

ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,60 - 248 x 365 x 249 mm.

Aufgrund der in Wandlängsrichtung durchlaufenden Innenstege handelt es sich um Ziegel, die in den Erdbebenzonen 2 und 3 verwendet werden dürfen.

Die Kammern sind vollständig verfüllt.

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 30.05.2022 gültig.

Die werkseigene Produktionskontrolle wird normgerecht durchgeführt.

Essen, den 28.03.2022
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Dieser Prüfbericht umfasst 3 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM

Am Zehnthof 197
45307 Essen

gebunden

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Prüfzeugnis 002/22/S/2a Druckfestigkeit ThermoPlan MZ 70 verfüllt mit den Abmessungen 248x365x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/2a

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung bezüglich der Druckfestigkeit, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	10.03.2022
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 08 10 2021 A 262
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking
Prüfungsart:	Regelprüfung

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,60 - 248 x 365 x 249 mm

Proben Nummer	Abmessungen		Druckkraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite		β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/21	251	363	1288	14,1	14,1
1/B/22	252	363	1250	13,7	13,7
1/B/23	251	364	1220	13,4	13,4
1/B/24	252	364	1292	14,1	14,1
1/B/25	252	365	1116	12,1	12,1
1/B/26	251	365	1196	13,1	13,1
1/B/27	252	366	1285	13,9	13,9
1/B/28	252	365	1180	12,8	12,8
1/B/29	251	365	1257	13,7	13,7
1/B/30	252	363	1392	15,2	15,2
Mittelwert:	252	364	1248	13,6	13,6
Maßspanne:	1	3		Formfaktor: 1,0	

Anforderungen	Druckfestigkeit β_{SZ}
	N/mm²
Mittelwert:	≥ 10,0
Einzelwert:	≥ 8,0
Erfüllt:	ja

Essen, den 12.12.2022
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M.R uppik)

Dieser Prüfbericht umfasst 4 Seite.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM Am Zehnthof 197 45307 Essen gebunden

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Prüfzeugnis 002/22/S/4 ThermoPlan MZ 70 unverfüllt mit den Abmessungen 248x490x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/4

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	15.12.2021
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 7-09 2020 A 264
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking
Prüfungsart:	Regelprüfung

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,60 - 248 x 490 x 249 mm

Proben Nummer	Abmessungen			Masse trocken verfüllt	Ziegel-roh-dichte verfüllt	Roh-dichte des Dämm-stoffes	Masse trocken unver-füllt	Ziegel-roh-dichte unver-füllt	Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe							β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kg/m³	kg	kg/m³	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/51	253	495	249,2	18,079	579	47,6	17,154	550	1228	9,8	9,8
1/B/52	253	497	249,2	18,151	579	49,4	17,187	549	1224	9,7	9,7
1/B/53	253	498	250,0	17,862	567	36,4	17,147	544	1230	9,8	9,8
1/B/54	254	496	249,4	18,338	584	45,6	17,445	555	1348	10,7	10,7
1/B/55	254	496	249,5	18,284	582	45,5	17,393	553	1235	9,8	9,8
1/B/56	253	497	249,2	18,150	579	45,2	17,268	551	1373	10,9	10,9
1/B/57	253	498	249,2	17,948	572	46,5	17,039	543	1270	10,1	10,1
1/B/58	253	497	249,5	18,209	580	52,2	17,189	548	1231	9,8	9,8
1/B/59	253	496	250,2	18,086	576	46,0	17,186	547	1201	9,6	9,6
1/B/60	253	496	250,5	18,003	573	43,9	17,143	545	1125	9,0	9,0
Mittelwert:	253	497	249,6	18,111	577	45,8	17,215	549	1247	9,9	9,9
Maßspanne:	1	3	1,3							Formfaktor: 1,0	

Anforderungen	Abmessungen				Ziegel-Rohdichte, verfüllt	Rohdichte des Dämmstoffes	Ziegel-Rohdichte, unverfüllt	Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe					
	mm	mm	mm		kg/m³	kg/m³	kg/m³	N/mm²
Nennmaß:	248	490	249,0	Mittelwert:	≤ 570	≤ 51,8	≤ 540	≥ 10,0
Kleinstmaß:	238	480	248,0		≥ 555	≥ 38,3	≥ 525	
Größtmaß:	253	498	250,0	Einzelwert:	≤ 600		≤ 570	≥ 8,0
Maßspanne:	10	12	1,0		≥ 525		≥ 495	
erfüllt:	nein	ja	nein		nein	ja	nein	nein

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/4 Seite: 2

	Kammerreihen	Gesamtlochquerschnitt	Stege			
			Längs	Innenquer		Außenquer
	Anzahl	%	mm	mm	mm	mm
Messwert:	8	62,3	17,2	8,5		9,5
Sollwert:	= 8	≥ 15,0 ≤ 64,0	≥ 15,8	≥ 8,0	≥	≥ 7,0
erfüllt:	ja	ja	ja	ja		ja

	Summe der Querstegdicken	
	mm	mm/m
Messwert:	27	106
Sollwert:		≥ 88 ≤ 97
erfüllt:		nein

Proben Nummer	Gewicht			Scherbenrohdichte	Volumen			Lochanteil
	trocken	nass	unter Wasser		Sand Vs,u	Brutto Vg, u	Netto Vn, u	
	g	g	g	kg/m³	ml	ml	ml	%
1/B/51	17154	21620	10100	1489	19518	31209	11691	62,5
1/B/52	17187	21530	10160	1512	19517	31335	11818	62,3
1/B/53	17147	21500	10150	1511	19585	31499	11913	62,2
1/B/54					19540	31420	11880	62,2
1/B/55					19564	31433	11869	62,2
1/B/56					19541	31335	11793	62,4
1/B/57					19513	31398	11885	62,1
1/B/58					19546	31372	11827	62,3
1/B/59					19576	31397	11822	62,3
1/B/60					19556	31435	11879	62,2
Mittelwert:	17163	21550	10137	1504	19546	31383	11838	62,3
Anforderung:				≤ 1460				
erfüllt:				nein				

Der prozentuale Lochanteil wird nach DIN EN 772 – 9 durch Sandfüllung ermittelt.

Proben Nummer	Scherbenrohdichte	Volumen	Masse		Bezugsfeuchtegehalt	
			feucht 23°C / 80%r.F.	nach der Trocknung	Masse bezogen	Volumen bezogen
	[kg/m³]	[dm³]	[g]	[g]	$U_{m,80}$ [%]	$U_{v,80}$ [%]
1/B/40 a		0,499	744,0	740,7	0,44	0,66
1/B/40 b		0,701	1049,1	1041,8	0,70	1,03
1/B/40 c	1486	0,916	1365,0	1360,8	0,31	0,46
1/B/40 d		0,808	1207,2	1199,9	0,60	0,90
1/B/40 e		0,485	723,4	720,1	0,46	0,68
Mittelwert:					0,50	0,75
Anforderung:					≤ 0,5	
erfüllt:					ja	

Die hier angegebene Bezugsfeuchte wurde aus dem Prüfzeugnis 002/22/S/3 genommen und gilt für alle Ziegel der Rohdichteklasse 0,60.

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/4 Seite: 3

Proben Nummer	Ebenheit						
	oben		unten		Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	mm		
1/B/51	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/52	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/53	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja

Proben Nummer	Parallelität						
	Ecke				Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	mm		
1/B/51	249,6	249,5	249,0	249,0	0,6	≤ 1,0	ja
1/B/52	249,3	249,2	249,1	249,0	0,3	≤ 1,0	ja
1/B/53	249,3	249,1	249,2	249,2	0,2	≤ 1,0	ja

Gesamtwertung:

Die untersuchten Ziegel haben die Prüfung gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z – 17.1 - 1084 des DIBT, Berlin nicht bestanden.

Sie erfüllen nicht die Forderungen an:

ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,60 - 248 x 490 x 249 mm.

Aufgrund der in Wandlängsrichtung durchlaufenden Innenstege handelt es sich um Ziegel, die in den Erdbebenzonen 2 und 3 verwendet werden dürfen.

Die Kammern sind vollständig verfüllt.

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 30.05.2022 gültig.

Die werkseigene Produktionskontrolle wird normgerecht durchgeführt.

Essen, den 23.03.2022
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

Dieser Prüfbericht umfasst 3 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM

Am Zehnthof 197
45307 Essen

gebunden

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Prüfzeugnis 002/22/S/4b Druckfestigkeit ThermoPlan MZ 70 verfüllt mit den Abmessungen 248x490x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/4b

Antragsteller:

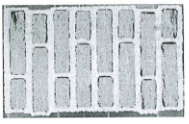
Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1084 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	30.11.2021
Probeneingang:	15.12.2021
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	AUG LÜCKING 7-09 2020 A 264
Projekt Nr.:	21484N
Lochung:	Rechteck
Hersteller:	Lücking

Bezeichnung: ThermoPlan MZ 70
HLz - 8 - 0,55 - 248 x 490 x 249 mm



Druckfestigkeit mit Füllung in den Ziegeln:

Proben Nummer	Abmessungen			Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe		β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/101	253	496	249	1342	10,7	10,7
1/B/102	254	499	249	1240	9,8	9,8
1/B/103	253	497	249	1375	10,9	10,9
1/B/104	254	495	249	1303	10,4	10,4
1/B/105	253	496	249	1359	10,8	10,8
1/B/106	254	497	249	1232	9,8	9,8
1/B/107	253	497	249	1094	8,7	8,7
1/B/108	253	499	249	1219	9,7	9,7
1/B/109	254	496	249	1229	9,8	9,8
1/B/110	253	498	249	1209	9,6	9,6
Mittelwert:	253	497	249	1260	10,0	10,0
Maßspanne:	1	4	0	Formfaktor:		1,0

Anforderungen	Abmessungen				Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe		
	mm	mm	mm		N/mm²
Nennmaß:	248	490	249,0	Mittelwert:	≥ 10,0
Kleinstmaß:	238	480	248,0		
Größtmaß:	253	498	250,0	Einzelwert:	≥ 8,0
Maßspanne:	10	12	1,0		
erfüllt:	nein	ja	ja		ja

Prüfzeugnis 002/22/S/5b Druckfestigkeiten UNIPOR W07 CORISO verfüllt und unverfüllt mit den Abmessungen 247x365x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

PRÜF-, ÜBERWACHUNGS- UND ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Telefon 0201/5 92 13-0
Telefax 0201/5 92 13-20

Prüfzeugnis Nr. 002/22/S/5b

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.1 – 1056 des DIBT, Berlin.

Probenahme:	18.02.2022
Probeneingang:	25.04.2022
Probenehmer:	Antragsteller
Entnahmeort:	Lagerplatz
Kennzeichnung:	UNIPOR 49 BERGMANN STEINHEIM
Lochung:	Rechteck
Projektnr.:	21484N
Hersteller:	Otto Bergmann Steinheim

Bezeichnung: UNIPOR-W07 CORISO Planziegel
HLz - 6 - 0,65 - 247 x 365 x 249 mm

Druckfestigkeit mit Füllung in den Ziegeln:

Proben Nummer	Abmessungen			Druckkraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe		β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/123	245	362	249	944	10,6	10,6
1/B/124	244	364	249	837	9,4	9,4
1/B/125	245	363	250	861	9,7	9,7
1/B/74	244	361	248,9	765	8,7	8,7
1/B/75	244	362	249,1	833	9,4	9,4
1/B/76	244	361	248,8	970	11,0	11,0
1/B/77	245	362	248,5	769	8,7	8,7
1/B/78	243	360	248,9	839	9,6	9,6
1/B/79	244	361	248,9	792	9,0	9,0
1/B/80	244	361	248,7	876	9,9	9,9
Mittelwert:	244	362	249,0	849	9,6	9,6
Maßspanne:	1	3	1,2	Formfaktor:		1,0

Anforderungen	Abmessungen				Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe		
	mm	mm	mm		N/mm²
Nennmaß:	247	365	249,0	Mittelwert:	≥ 7,5
Kleinstmaß:	237	355	248,0		
Größtmaß:	252	373	250,0	Einzelwert:	≥ 6,0
Maßspanne:	10	12	1,0		
erfüllt:	ja	ja	ja		ja

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/5b Seite: 2

Druckfestigkeit ohne Füllung in den Ziegeln:

Proben Nummer	Abmessungen			Druck-kraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe		β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kN	N/mm²	N/mm²
1/B/71	244	361	248,6	680	7,7	7,7
1/B/72	245	362	248,8	802	9,0	9,0
1/B/73	244	362	248,9	956	10,8	10,8
1/B/121	244	364	249	777	8,7	8,7
1/B/122	244	361	249	766	8,7	8,7
1/B/126	245	360	249	812	9,2	9,2
1/B/127	244	362	249	770	8,7	8,7
1/B/128	244	362	249	807	9,1	9,1
1/B/129	244	363	250	806	9,1	9,1
1/B/130	244	362	249	795	9,0	9,0
Mittelwert:	244	362	249,0	797	9,0	9,0
Maßspanne:	1	4	0,4	Formfaktor:		1,0

Anforderungen	Abmessungen				Druckfestigkeit
	Länge	Breite	Höhe		β_{SZ}
	mm	mm	mm		N/mm²
Nennmaß:	247	365	249,0	Mittelwert:	≥ 7,5
Kleinstmaß:	237	355	248,0		
Größtmaß:	252	373	250,0	Einzelwert:	≥ 6,0
Maßspanne:	10	12	1,0		
erfüllt:	ja	ja	ja		ja

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 15.04.2025 gültig.

Essen, den 23.02.2023
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

Dieser Prüfbericht umfasst 2 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM Am Zehnthof 197 45307 Essen gebunden

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Prüfzeugnis 002/22/S/5a Normeigenschaften aus dem Prüfzeugnis UNIPOR W07 CO-RISO (1/B/71-1/B/73 unverfüllt, rest verfüllt) mit den Abmessungen 247x365x249 mm

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/5a Seite: 2

	Gesamtloch-querschnitt	Stege				
		Außen-längs	Außen-quer	Innen-längs	Innen-quer	Innen-diagonal
	%	mm	mm	mm	mm	mm
Messwert:	62,1	9,2	6,6	6,3	5,4	5,1
Sollwert:	≥ 15,0 ≤ 65,0	≥ 12,0	≥ 6,3	≥ 5,2	≥ 4,4	≥ 4,0
erfüllt:	ja	nein	ja	ja	ja	ja

	Summe der Querstegdicken		Lochreihen	Löcher		Einbindetiefe der Feder
				Einzelquerschnitt	Lochweite	
	mm	mm/m	Anzahl	cm²	mm	mm
Messwert:	31	128	15	14,8	18	8
Sollwert:		≥ 105 ≤ 115	= 15	≤ 16,0		≥ 7
erfüllt:		nein	ja	ja		ja

Proben Nummer	Gewicht			Scherben-rohdichte	Volumen			Lochanteil
	trocken	nass	unter Wasser		Sand Vs,u	Brutto Vg, u	Netto Vn, u	
	g	g	g	kg/m³	ml	ml	ml	%
1/B/71	12014	15130	7150	1506	13544	21898	8354	61,8
1/B/72	12048	15160	7200	1514	13750	22066	8316	62,3
1/B/73	12012	15190	7240	1511	13686	21985	8298	62,3
1/B/74								
1/B/75								
1/B/76								
1/B/77								
1/B/78								
1/B/79								
1/B/80								
Mittelwert:	12025	15160	7197	1510	13660	21983	8323	62,1
Anforderung:				≤				
erfüllt:								

Der prozentuale Lochanteil wird nach DIN EN 772 – 9 durch Sandfüllung ermittelt.

Proben Nummer	Scherben-rohdichte	Volumen	Masse		Bezugsfeuchtegehalt	
			feucht 23°C / 80%r.F.	nach der Trocknung	Masse bezogen	Volumen bezogen
	[kg/m³]	[dm³]	[g]	[g]	Um,80 [%]	Uv,80 [%]
1/B/80 a		0,467	706,4	704,7	0,24	0,36
1/B/80 b		0,441	666,9	665,3	0,24	0,36
1/B/80 c	1510	0,328	496,8	495,5	0,26	0,40
1/B/80 d		0,190	287,9	286,6	0,45	0,68
1/B/80 e		0,283	428,9	427,4	0,35	0,53
Mittelwert:					0,31	0,47
Anforderung:					≤ 0,5	
erfüllt:					ja	

Das Probenvolumen (Scherbenvolumen) wird aus dem Quotienten von Trockenmasse und Scherbenrohdichte ermittelt.

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 002/22/S/5a Seite: 3

Proben Nummer	Ebenheit						
	oben		unten		Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	mm		
1/B/71	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/72	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/B/73	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja

Proben Nummer	Parallelität						
	Ecke				Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	mm		
1/B/71	249,0	248,9	248,9	248,7	0,3	≤ 1,0	ja
1/B/72	248,9	248,8	249,0	249,1	0,3	≤ 1,0	ja
1/B/73	248,8	249,1	249,1	248,9	0,3	≤ 1,0	ja

Gesamtwertung:

Die untersuchten Ziegel haben die Prüfung gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z – 17.1 - 1056 des DIBT, Berlin nicht bestanden.

Sie erfüllen nicht die Forderungen an:

UNIPOR-W07 CORISO Planziegel
HLz - 6 - 0,65 - 247 x 365 x 249 mm

Aufgrund der in Wandlängsrichtung durchlaufenden Innenstege handelt es sich um Ziegel, die in den Erdbebenzonen 2 und 3 verwendet werden dürfen.

Die Dämmung hat die Lochung vollständig ausgefüllt.

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 15.04.2025 gültig.

Essen, den 01.06.2022
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Dieser Prüfbericht umfasst 3 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM gebunden

Am Zehnthof 197
45307 Essen

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Prüfzeugnis 004/23/S/1 UNIPOR WS09 CORISO PLUS mit den Abmessungen 247x365x249 mm

Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Am Zehnthof 197
45307 Essen

Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle

Telefon 0201/59213-0
Telefax 0201/59213-20

Prüfzeugnis Nr. 004/23/S/1

Antragsteller:

Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Inhalt des Antrages:

Untersuchung von Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, Scherbenfarbe rot, gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z 17.21 – 1253 des DIBT, Berlin.

Probenahme: 15.03.2023
Probeneingang: 15.03.2023
Probenehmer: Antragsteller
Entnahmeort: Lagerplatz
Kennzeichnung: R 10-12-22 Leipfinger-Bader Z-17-21 - 1253 - 0,80/12 Werk2
Lochung: Rechteck
Projektnr.: AIF 22454
Werk: Leipfinger Bader

Bezeichnung: Planhochlochziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS
HLz - 8 - 0,80 - 247 x 365 x 249 mm

Proben Nummer	Abmessungen			Masse trocken verfüllt	Ziegel-Rohdichte verfüllt	Rohdichte des Dämmstoffes	Masse trocken unverfüllt	Ziegel-Rohdichte unverfüllt	Druckkraft	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe							β_{PR}	β_{ST}
	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kg/m³	kg	kg/m³	kN	N/mm²	N/mm²
1/C/1	249	367	249,3	17,759	780	89	16,745	735	889	9,7	9,7
1/C/2	249	366	249,2	17,865	787	94	16,797	740	929	10,2	10,2
1/C/3	249	367	249,2	17,902	786	100	16,759	736	894	9,8	9,8
1/C/4	249	366	249,1	17,788	784				974	10,7	10,7
1/C/5	249	366	249,2	17,748	781				875	9,6	9,6
1/C/6	249	367	249,2	18,658	819				873	9,6	9,6
1/C/7	250	366	249,1	17,951	788				912	10,0	10,0
1/C/8	249	367	249,2	17,830	783				945	10,3	10,3
1/C/9	249	366	249,1	17,779	783				880	9,7	9,7
1/C/10	249	367	249,3	18,143	796				954	10,4	10,4
Mittelwert:	249	367	249,2	17,942	789	94	16,767	737	913	10,0	10,0
Maßspanne:	0	1	0,2							Formfaktor: 1,0	

Anforderungen	Abmessungen				Ziegel-Rohdichte, verfüllt	Rohdichte des Dämmstoffes	Ziegel-Rohdichte, unverfüllt	Druckfestigkeit β_{SZ}
	Länge	Breite	Höhe					
	mm	mm	mm		kg/m³	kg/m³	kg/m³	N/mm²
Nennmaß:	247	365	249,0	Mittelwert:	≤ 790	≤ 130	≤ 725	≥ 10,0
Kleinstmaß:	237	355	248,0		≥ 750	≥ 70	≥ 700	
Größtmaß:	252	373	250,0	Einzelwert:	≤ 820		≤ 755	≥ 8,0
Maßspanne:	10	12	1,0		≥ 720		≥ 670	
erfüllt:	ja	ja	ja		ja	ja	nein	ja

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 004/23/S/1 Seite: 2

	Gesamtloch-querschnitt	Stege				
		Außen-längs	Außen-quer	Innen-längs	Innen-quer	Innen-diagonal
	%	mm	mm	mm	mm	mm
Messwert:	50,2	14,2	10,2	6,5	5,3	5,1
Sollwert:	≥ 15,0 ≤ 51,0	≥ 14,2	≥ 9,0	≥ 6,2	≥ 5,0	≥ 4,6
erfüllt:	ja	ja	ja	ja	ja	ja

	Summe der Querstegdicken (mit 3 Innenquerstegen)		Summe der Querstegdicken (mit 4 Innenquerstegen)		Loch-reihen	Löcher		Einbindetiefe der Feder
						Einzel-querschnitt	Lochweite	
	mm	mm/m	mm	mm/m	Anzahl	cm^2	mm	mm
Messwert:	35	142	41	163	19	6,9	13	7
Sollwert:		≥ 135 ≤ 145		≥ 135 ≤ 165	= 19	≤ 7,0		≥ 7
erfüllt:		ja		ja	ja	ja		ja

Proben Nummer	Gewicht			Scherben-rohdichte	Volumen			Lochanteil
	trocken	nass	unter Wasser		Sand Vs,u	Brutto Vg, u	Netto Vn, u	
	g	g	g	kg/m^3	ml	ml	ml	%
1/C/1	16745	20410	9560	1543	11462	22782	11320	50,3
1/C/2	16797	20450	9610	1550	11400	22711	11311	50,2
1/C/3	16759	20410	9580	1547	11403	22773	11370	50,1
1/C/4								
1/C/5								
1/C/6								
1/C/7								
1/C/8								
1/C/9								
1/C/10								
Mittelwert:	16767	20423	9583	1547	11422	22755	11333	50,2
Anforderung:				≤ 1500				
erfüllt:				nein				

Der prozentuale Lochanteil wird nach DIN EN 772 – 9 durch Sandfüllung ermittelt.

QsM Gesellschaft für Qualitätssicherung und Materialprüfung mbH

Prüfzeugnis – Nr. 004/23/S/1 Seite: 3

Proben Nummer	Ebenheit						
	oben		unten		Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	mm		
1/C/1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/C/2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja
1/C/3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 1,0	ja

Proben Nummer	Parallelität						
	Ecke				Größtwert	Anforderung	Anforderung erfüllt
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	mm		
1/C/1	249,3	249,2	249,3	249,3	0,1	≤ 1,0	ja
1/C/2	249,3	249,4	249,4	249,2	0,2	≤ 1,0	ja
1/C/3	249,4	249,2	249,4	249,3	0,2	≤ 1,0	ja

Gesamtwertung:

Die untersuchten Ziegel haben die Prüfung gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z – 17.21 - 1253 des DIBT, Berlin nicht bestanden.

Sie erfüllen nicht die Forderungen an:

Planhochlochziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS
HLz - 8 - 0,80 - 247 x 365 x 249 mm

Die Dämmung hat die Lochung vollständig ausgefüllt.

Feststellung:

Aufgrund der in Wandlängsrichtung durchlaufenden Innenstege handelt es sich um Ziegel, die in den Erdbebenzonen 2 und 3 verwendet werden dürfen.

Die hier angewendete „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung" ist bis zum 01.02.2027 gültig.

Essen, den 31.03.2023
TV/Pc

Der Geschäftsführer

(Dipl.-Ing. M. Ruppik)

Der Prüfstellenleiter

(M. Sc. T. Vicktorius)

Dieser Prüfbericht umfasst 3 Seiten.
Eine auszugsweise oder gekürzte Wiedergabe ist nicht gestattet bzw. an die Genehmigung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle QsM,
Am Zehnthof 197
45307 Essen
gebunden

Anlage C Prüfergebnisse der Mörtel- und Putzprismen

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Außen- und Innenputz. Die Probenherstellung sowie die anschließende Prüfung fanden an der RPTU statt.

Tab. C.1: Prüfergebnisse Innenputz KP 36 W Probe 1 RPTU

Name: KP 36 W		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 24.03.22		Prüftag: 27.04.22		Alter: 34 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	384,0	147,5	43,5	39,9	428	0,93	3415	2,13
2	388,4	155,5	43,5	39,8	407	0,89	3535	2,21
3	415,6	159,6	44,1	40,1	402	0,85	3300	2,06
					Mittelwert:	0,89	Mittelwert:	2,14

Tab. C.2: Prüfergebnisse Innenputz KP 36 W Probe 2 RPTU

Name: KP 36 W		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 24.03.22		Prüftag: 14.06.22		Alter: 83 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	368,3	160,3	42,9	39,8	673	1,49	5795	3,62
2	362,5	159,7	42,7	39,7	632	1,41	5850	3,66
3	343,5	152,9	43,4	39,8	717	1,56	5895	3,68
					Mittelwert:	1,49	Mittelwert:	3,65

Tab. C.3: Prüfergebnisse Außenputz MP 69 Probe 1 RPTU

Name: MP 69		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 24.03.22		Prüftag: 27.04.22		Alter: 34 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	336,3	160,2	40,1	39,9	736	1,73	7240	4,53
2	356,9	160,7	40,3	39,8	634	1,49	7845	4,90
3	340,6	158,7	40,0	39,7	589	1,40	7225	4,52
					Mittelwert:	1,54	Mittelwert:	4,65

Tab. C.4: Prüfergebnisse Außenputz MP 69 Probe 2 RPTU

Name: MP 69		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 24.03.22		Prüftag: 14.06.22		Alter: 83 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	296,9	151,0	40,0	39,7	858	2,04	11195	7,00
2	320,6	160,4	40,0	39,8	837	1,98	10110	6,32
3	314,3	160,2	40,0	39,8	879	2,08	10720	6,70
					Mittelwert:	2,03	Mittelwert:	6,67

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Außen- und Innenputz. Die Probenherstellung sowie die anschließende Prüfung fanden am IZF statt.

Tab. C.5: Prüfergebnisse Innenputz KP 36 W Probe 1 IZF

Name: KP 36 W		Prüfer: Huckauf		Herstelltag: 11.08.22		Prüftag: 26.09.22		Alter: 46 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	40,0	40,0	347	0,81	3912	2,44
2	-	160,0	40,0	40,0	389	0,91	4217	2,64
3	-	160,0	40,0	40,0	346	0,81	4377	2,74
					Mittelwert:	0,85	Mittelwert:	2,61

Tab. C.6: Prüfergebnisse Außenputz MP 69 Probe 1 IZF

Name: MP 69		Prüfer: Huckauf		Herstelltag: 11.08.22		Prüftag: 26.09.22		Alter: 46 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	40,0	40,0	740	1,73	8617	5,39
2	-	160,0	40,0	40,0	799	1,87	7407	4,63
3	-	160,0	40,0	40,0	765	1,79	8266	5,17
					Mittelwert:	1,80	Mittelwert:	5,06

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Dünnbettmörtel maxit mur 900 D für jede Wand, welche an der RPTU hergestellt und geprüft wurde.

Tab. C.7: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A4-W07 V-365mm-509kN

Name: W07 V W3		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 16.02.22		Prüftag: 27.04.22		Alter: 70 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	281,0	160,5	42,0	39,9	1096	2,46	20885	13,05
2	289,2	160,6	41,6	39,9	1251	2,83	19360	12,10
3	271,3	160,2	39,4	39,9	787	1,88	19250	12,03
					Mittelwert:	2,39	Mittelwert:	12,39

Tab. C.8: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A5-W07 V-365mm-375kN

Name: W07 V W1		Prüfer: Mejder		Herstelltag: 16.02.22		Prüftag: 09.05.22		Alter: 82 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	283,6	159,9	41,1	39,9	1212	2,78	20745	12,97
2	288,4	160,5	42,1	39,9	1043	2,33	19940	13,10
3	275,7	160,3	40,4	39,7	1151	2,71	19405	12,43
					Mittelwert:	2,61	Mittelwert:	12,52

Tab. C.9: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A6-W07 V-365mm-280kN

Name: W07 V W2		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 16.02.22		Prüftag: 16.05.22		Alter: 89 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	283,2	159,9	42,2	39,8	1105	2,48	21400	13,37
2	262,0	160,2	38,8	39,8	1052	2,57	18690	11,68
3	280,1	160,1	41,6	39,9	1085	2,46	20055	12,53
					Mittelwert:	2,50	Mittelwert:	12,53

Tab. C.10: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A2-MZ70-365mm-240kN

Name: MZ70 W2		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 14.02.22		Prüftag: 23.05.22		Alter: 98 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	217,1	140,7	41,0	39,9	944	2,17	14310	8,94
2	245,8	151,7	41,1	39,8	944	2,29	15795	9,69
3	207,1	143,1	41,7	39,9	1055	2,38	13450	9,43
Probekörper deformiert (siehe Masse und Länge)					Mittelwert:	2,28	Mittelwert:	9,07

Tab. C.11: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A3-MZ70-365mm-200kN

Name: MZ70 W1		Prüfer: Quint		Herstelltag: 14.02.22		Prüftag: 02.06.22		Alter: 108 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	239,3	159,7	40,4	39,7	1134	2,67	16490	10,31
2	248,2	158,1	40,8	39,9	818	1,89	17925	11,20
3	209,5	144,9	40,2	39,8	918	2,16	16595	10,37
Probekörper deformiert (siehe Masse und Länge)					Mittelwert:	2,24	Mittelwert:	10,63

Tab. C.12: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A1-MZ70-365mm-375kN

Name: MZ70 W3		Prüfer: Medjer		Herstelltag: 14.02.22		Prüftag: 15.06.22		Alter: 121 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	191,3	145,7	40,0	39,7	1157	2,75	15295	9,56
2	219,9	146,2	40,2	39,7	1262	2,99	15690	9,81
3	213,5	153,6	39,5	39,7	1130	2,72	15995	10,00
Probekörper deformiert (siehe Masse und Länge)					Mittelwert:	2,82	Mittelwert:	9,79

Tab. C.13: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A10-W07 UV NG-365mm-375kN

Name: W07 UV W1		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 15.02.22		Prüftag: 27.06.22		Alter: 132 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	253,4	160,5	40,5	39,8	980	2,29	17255	10,78
2	268,7	160,8	43,3	39,8	1041	2,28	16675	10,42
3	247,5	160,2	39,6	39,8	1206	2,88	16155	10,10
					Mittelwert:	2,48	Mittelwert:	10,43

Tab. C.14: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A11-W07 UV NG-365mm-200kN

Name: W07 UV W2		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 15.02.22		Prüftag: 04.07.22		Alter: 139 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	251,1	160,5	40,9	39,7	1100	2,56	17465	10,24
2	259,1	160,7	42,0	39,7	1153	2,61	17175	10,61
3	255,2	160,5	41,5	39,8	1226	2,80	16990	11,08
					Mittelwert:	2,66	Mittelwert:	10,76

Tab. C.15: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A12-W07 UV NG-365mm-135kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 15.02.22		Prüftag: 08.07.22		Alter: 143 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	238,2	160,1	41,3	39,8	801	1,84	10730	6,70
2	245,2	159,9	40,6	39,8	1000	2,33	16855	10,53
3	245,8	160,1	42,5	39,7	Kaputt	-	15055	9,41
Probekörper waren deformiert bzw. gebrochen					Mittelwert:	2,08	Mittelwert:	8,88

Tab. C.16: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A7-W07 UV-365mm-375kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 27.07.22		Prüftag: 18.11.22		Alter: 114 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	275,4	160,4	40,6	39,8	1341	3,13	26900	16,81
2	274,5	160,5	40,4	39,8	1302	3,05	21950	13,72
3	273,6	161,0	40,8	39,9	1450	3,35	21250	13,28
					Mittelwert:	3,18	Mittelwert:	14,60

Tab. C.17: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A8-W07 UV-365mm-280kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 27.07.22		Prüftag: 29.11.22		Alter: 125 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	280,2	160,0	41,5	40,0	963	2,18	25150	15,72
2	284,5	160,2	41,7	39,9	1126	2,54	26400	16,50
3	272,6	159,8	41,0	39,9	1084	2,49	25350	15,84
					Mittelwert:	2,40	Mittelwert:	16,02

Tab. C.18: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand A9-W07 UV-365mm-200kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Quint		Herstelltag: 27.07.22		Prüftag: 12.12.22		Alter: 138 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	271,1	160,4	39,8	39,7	1532	3,66	22759	14,22
2	266,4	160,3	39,7	39,5	1402	3,40	23309	14,57
3	267,5	160,4	39,8	39,6	1412	3,40	23913	14,95
					Mittelwert:	3,48	Mittelwert:	14,58

Tab. C.19: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B8-W07 UV-175mm-82kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Quint		Herstelltag: 28.07.22		Prüftag: 19.12.22		Alter: 144 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	280,9	160,7	40,0	40,6	1804	4,10	27942	17,46
2	291,8	160,6	40,1	40,7	1752	3,96	25916	16,20
3	277,8	160,9	40,1	40,7	1646	3,72	27712	17,32
					Mittelwert:	3,93	Mittelwert:	16,99

Tab. C.20: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B7-W07 UV-175mm-200kN

Name: W07 UV W3		Prüfer: Quint		Herstelltag: 28.07.22		Prüftag: 06.01.23		Alter: 162 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	280,9	160,8	39,9	40,7	1821	4,13	27183	16,99
2	291,8	160,6	40,0	40,3	1601	3,70	28963	18,10
3	277,8	161,0	39,9	41,2	1508	3,34	28972	18,11
					Mittelwert:	3,72	Mittelwert:	17,73

Tab. C.21: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B1-MZ70-190mm-200kN

Name: MZ70 W1		Prüfer: Quint		Herstelltag: 29.07.22		Prüftag: 13.01.23		Alter: 168 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	280,9	160,3	39,9	40,3	1503	3,48	25932	16,21
2	291,8	160,2	40,0	40,3	1592	3,68	28406	17,75
3	277,8	160,0	40,1	40,4	1225	2,81	26256	16,41
					Mittelwert:	3,32	Mittelwert:	16,79

Tab. C.22: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B2-MZ70-190mm-200kN

Name: MZ70 W2		Prüfer: Mejder		Herstelltag: 29.07.22		Prüftag: 25.01.23		Alter: 180 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	294,1	159,9	40,6	39,8	1545	3,60	26827	16,77
2	288,7	160,3	39,4	39,8	1492	3,59	25427	15,89
3	293,1	160,4	39,8	39,7	1634	3,91	27451	17,16
					Mittelwert:	3,70	Mittelwert:	16,61

Tab. C.23: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B5-W07 V-175mm-200kN

Name: W07 V W1		Prüfer: Oellig		Herstelltag: 01.08.22		Prüftag: 01.02.23		Alter: 184 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	284,7	159,5	41,0	39,9	1225	2,82	25189	15,74
2	274,4	159,4	40,9	39,9	1323	3,05	24003	15,00
3	276,6	159,0	40,9	40,0	1132	2,59	25149	15,72
					Mittelwert:	2,82	Mittelwert:	15,49

Tab. C.24: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B6-W07 V-175mm-154kN

Name: W07 V W2		Prüfer: Mejder		Herstelltag: 01.08.22		Prüftag: 13.02.23		Alter: 196 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	263,1	159,0	40,1	39,6	1648	3,93	24839	15,52
2	269,3	159,1	40,6	39,9	1330	3,09	23849	14,91
3	276,2	158,9	40,6	39,8	1497	3,49	24086	15,05
					Mittelwert:	3,50	Mittelwert:	15,16

Tab. C.25: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B3-MZ70-240mm-200kN

Name: MZ70 240 mm		Prüfer: Quint		Herstelltag: 29.07.22		Prüftag: 24.02.23		Alter: 210 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	280,9	160,6	40,8	40,0	1444	3,26	26092	16,31
2	291,8	160,6	41,0	40,0	1294	2,89	25524	15,95
3	277,8	161,3	41,8	39,9	1298	2,79	27310	17,07
					Mittelwert:	2,98	Mittelwert:	16,44

Tab. C.26: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand B4-MZ70-490mm-375kN

Name: MZ70 490 mm		Prüfer: Mejder		Herstelltag: 11.02.22		Prüftag: 13.03.23		Alter: 395 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	193,9	153,4	38,6	39,7	835,6	2,06	14085	8,80
2	183,5	152,8	39,5	38,9	690,6	1,73	11506	7,195
3	192,6	159,0	39,5	39,8	673,5	1,61	13637	8,52
Probekörper waren deformiert bzw. gebrochen					Mittelwert:	1,80	Mittelwert:	8,17

Tab. C.27: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand D1-MZ70-365mm-200kN/m

Name: MZ70 3x3m		Prüfer: Wilhelm		Herstelltag: 26.07.22		Prüftag: 26.10.22		Alter: 92 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	286,8	160,8	40,3	40,2	1142	2,63	21269	13,29
2	295,4	160,8	41,0	40,3	1236	2,78	17654	11,03
3	289,5	160,1	41,3	40,2	1029	2,31	17832	11,15
					Mittelwert:	2,58	Mittelwert:	11,82

Tab. C.28: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand D2-MZ70-365mm-200kN/m

Name: MZ70 3x3m		Prüfer: Haussmann		Herstelltag: 07.02.23		Prüftag: 26.10.22		Alter: 28 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	235,2	159,5	40,6	40,0	1640	3,68	-	-
2	236,5	159,6	40,6	40,0	2260	5,07	-	-
3	237,1	159,7	40,6	40,0	2100	4,71	-	-
					Mittelwert:	4,50	Mittelwert:	-

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Dünnbettmörtel maxit mur 900 D. Die Probenherstellung sowie die anschließende Prüfung fanden am IZF statt.

Tab. C.29: Prüfergebnisse maxit mur 900 D IZF

Name: maxit mur 900 D		Prüfer: Huckauf		Herstelltag: 11.08.22		Prüftag: 26.09.22		Alter: 46 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	40,0	40,0	787	1,84	22994	14,37
2	-	160,0	40,0	40,0	891	2,09	18257	11,41
3	-	160,0	40,0	40,0	1012	2,37	24277	15,17
					Mittelwert:	2,10	Mittelwert:	13,65

Es folgen die Ergebnisse von den Haftzugfestigkeiten für die Putze von Baumit.

Tab. C.30: Prüfergebnisse Haftzugfestigkeit Außenputz Baumit MP 69 Speed

15 mm Kalk-Zement-Leichtputz (Baumit MP69 Speed)					
Prüfung und Institut	Bruchbild nach DIN EN 1015-12	Bruchlast F_u [N]	Prüffläche ($D = 50\ mm$) [mm²]	Ziegeluntergrund	Haftzugfestigkeit f_u [N/mm²]
1 (IZF)	Kohäsionsbruch	420,7	1963	W07	0,21
2 (IZF)	Kohäsionsbruch	357,3	1963	W07	0,18
3 (IZF)	Kohäsionsbruch	337,6	1963	W07	0,17
4 (IZF)	Kohäsionsbruch	424,2	1963	W07	0,22
5 (IZF)	Kohäsionsbruch	346,9	1963	W07	0,18
6 (IZF)	Kohäsionsbruch	509,7	1963	W07	0,26
7 (IZF)	Kohäsionsbruch	443,3	1963	W07	0,23
8 (RPTU)	Kohäsionsbruch	348,8	1963	W07	0,18
9 (RPTU)	Kohäsionsbruch	301,9	1963	W07	0,15
10 (RPTU)	Kohäsionsbruch	407,4	1963	W07	0,21
11 (RPTU)	Kohäsionsbruch	388,2	1963	W07	0,20
12 (RPTU)	Kohäsionsbruch	303,6	1963	MZ70	0,15
13 (RPTU)	Kohäsionsbruch	400,8	1963	MZ70	0,20
14 (RPTU)	Kohäsionsbruch	336,9	1963	MZ70	0,17
15 (RPTU)	Kohäsionsbruch	406,7	1963	MZ70	0,21

Tab. C.31: Prüfergebnisse Haftzugfestigkeit Innenputz Baumit Kalkputz Klima KP 36 W

15 mm Kalkputz (Baumit Klima KP 36 W)					
Prüfung und Institut	Bruchbild nach DIN EN 1015-12	Bruchlast F_u [N]	Prüffläche ($D = 50\ mm$) [mm²]	Ziegelun-tergrund	Haftzugfes-tigkeit f_u [N/mm²]
1 (IZF)	Kohäsionsbruch	730,1	1963	W07	0,37
2 (IZF)	Kohäsionsbruch	520,8	1963	W07	0,27
3 (IZF)	Adhäsionsbruch	415,9	1963	W07	0,21
4 (IZF)	Kohäsionsbruch	786,2	1963	W07	0,40
5 (IZF)	Kohäsionsbruch	449,7	1963	W07	0,23
6 (IZF)	Kohäsionsbruch	512,0	1963	W07	0,26
7 (IZF)	Adhäsionsbruch	641,6	1963	W07	0,33
8 (IZF)	Kohäsionsbruch	772,6	1963	W07	0,39
9 (RPTU)	Kohäsionsbruch	745,9	1963	W07	0,38
10 (RPTU)	Kohäsionsbruch	809,6	1963	W07	0,41
11 (RPTU)	Kohäsionsbruch	706,4	1963	W07	0,36
12 (RPTU)	Kohäsionsbruch	649,7	1963	W07	0,33
13 (RPTU)	Kohäsionsbruch	745,2	1963	MZ70	0,38
14 (RPTU)	Kohäsionsbruch	789,6	1963	MZ70	0,40
15 (RPTU)	Kohäsionsbruch	688,2	1963	MZ70	0,35
16 (RPTU)	Kohäsionsbruch	784,0	1963	MZ70	0,40

Anlage D Verwendete Messtechnik

Für die durchgeführten Prüfungen an Kleinprüfkörpern mit den Abmessungen von 1,5 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge (Kapitel 4.1.3, 4.3.2 sowie 4.4.3) wurde die Kraft über den Öldruck mittels eines Öldruckwandlers (ToniNORM Powerbox) bestimmt [1]. Die Prüflast bzw. die aufgebrachte Normalkraft wird mittels der ToniTROL I gesteuert. Die vertikale Verformung des Probekörpers wird aus dem Weg der Hydraulikzylinder abgeleitet. Die Messung der horizontalen Verformung erfolgt teilweise über Wegaufnehmer, teilweise über optische Messtechnik. Dabei handelte es sich um das Kamerasystem ARAMIS Adjustable von der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Die Datenaufzeichnung von z. B. gemessenen Temperaturen erfolgt mittels einem Yokogawa 3081 Hybrid Recorder. Für alle in Kaiserslautern durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen wurde die aufgeführte Messtechnik in der nachfolgenden Tabelle verwendet. In Bezug auf die an der MPA BS verwendete Messtechnik für die Feuerwiderstandsprüfung D2-MZ70-365mm-200kN/m liegen keine weiteren Informationen außerhalb des Prüfberichtes [93] vor.

Tab. D.1: Verwendete Messtechnik für Feuerwiderstandsprüfungen in Kaiserslautern

Messinstrument	Hersteller und Bezeichnung	Herstellernummer	Interne Nummer	Messbereich
Kraftmessdose	HBM KMD	F.Nr. 73267	MS 1.3.32	0-1000 kN
Messdatenerfassungssystem Quantum X	HBM MX840 A	0009E5005141	MS 1.1.16	8 Kanäle
Wegaufnehmer (WA) vertikal vorne rechts	HBM W50TS	F.Nr. 41809	MS 1.4.86	0-50 mm
Wegaufnehmer (WA) vertikal hinten rechts	HBM W50TS	F.Nr. 55483	MS 1.4.85	0-50 mm
Wegaufnehmer (WA) vertikal vorne links	HBM W50TS	F.Nr. 1147P02	MS 1.4.81	0-50 mm
Wegaufnehmer (WA) vertikal hinten links	HBM W50TS	F.Nr. 41808	MS 1.4.84	0-50 mm
Wegaufnehmer (TR) horizontal Mitte	TR-0050	-*	MB 3.15.163	0-50 mm
Wegaufnehmer (TR) horizontal links	TR-0050	-*	MB 3.15.165	0-50 mm
Wegaufnehmer (TR) horizontal rechts	TR-0050	-*	MB 3.15.164	0-50 mm
* Der Aufkleber mit der Herstellernummer war nicht mehr vorhanden				

Anlage E Messdaten der Versuchsserie A

Es folgen Informationen und Messdaten zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen an der RPTU mit den Prüfkörpergeometrien 3,0 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m. Die Messstellen für die Verformungs- und Temperaturmessungen sind Anlage A zu entnehmen. Ausgehend von den Überlegungen des Kapitels 6.4 wurde jeweils in den Protokollen vermerkt, wann ein Längssteg 100 °C und 600 °C aufweist.

E.1 A1-MZ70-365mm-375kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (375 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

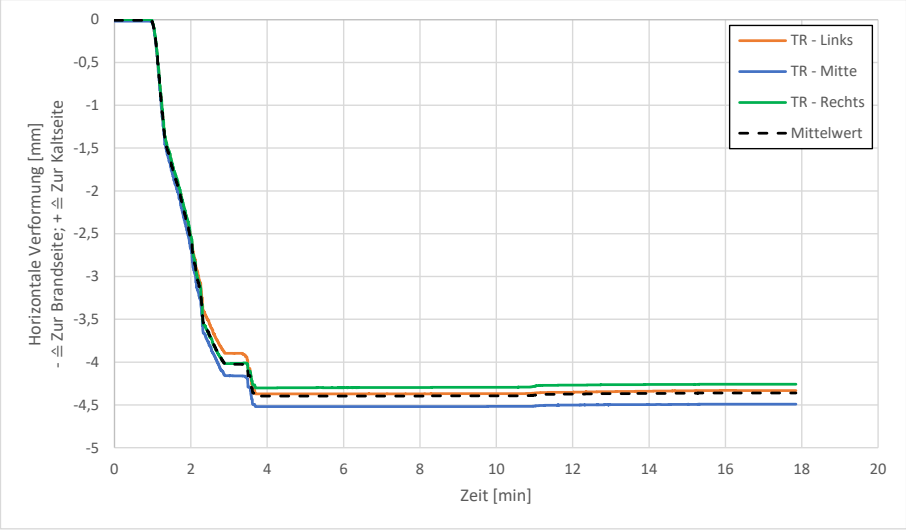


Abb. E.1: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A1-MZ70-365mm-375kN

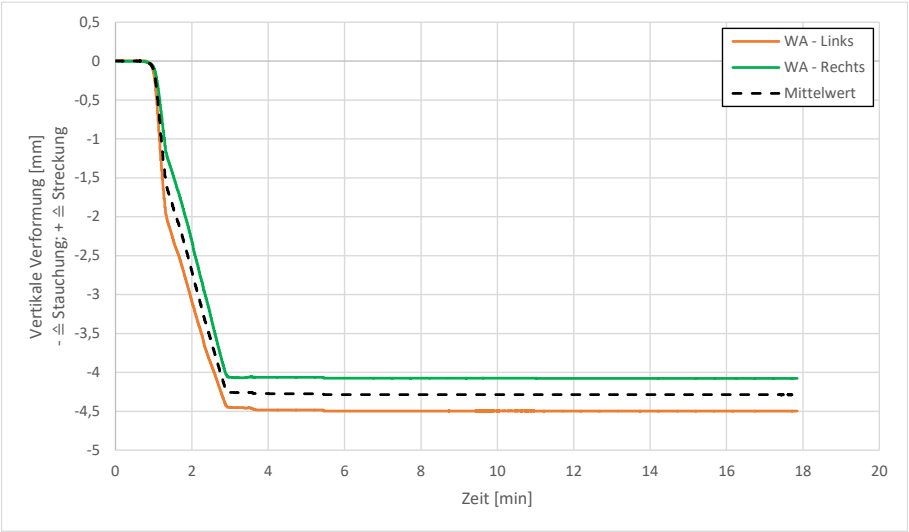


Abb. E.2: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A1-MZ70-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

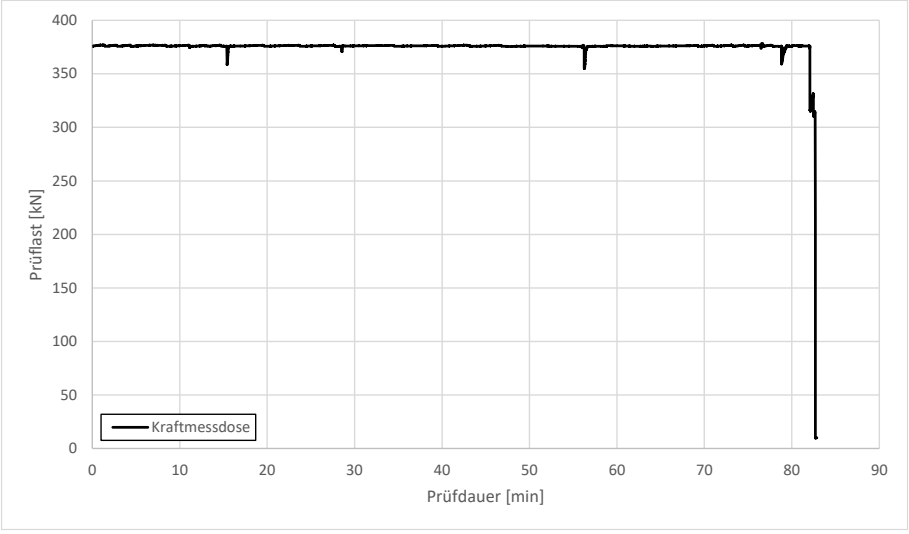


Abb. E.3: Prüflast über die Prüfdauer A1-MZ70-365mm-375kN

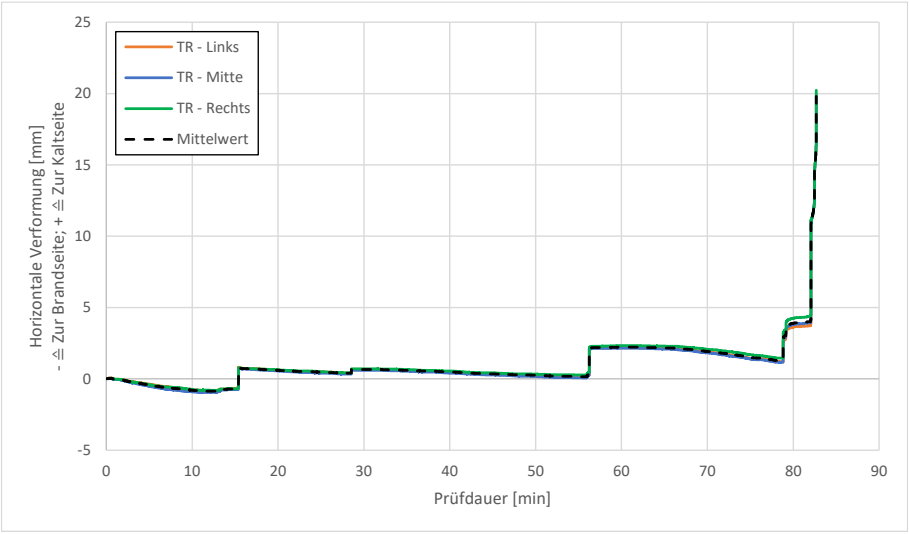


Abb. E.4: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

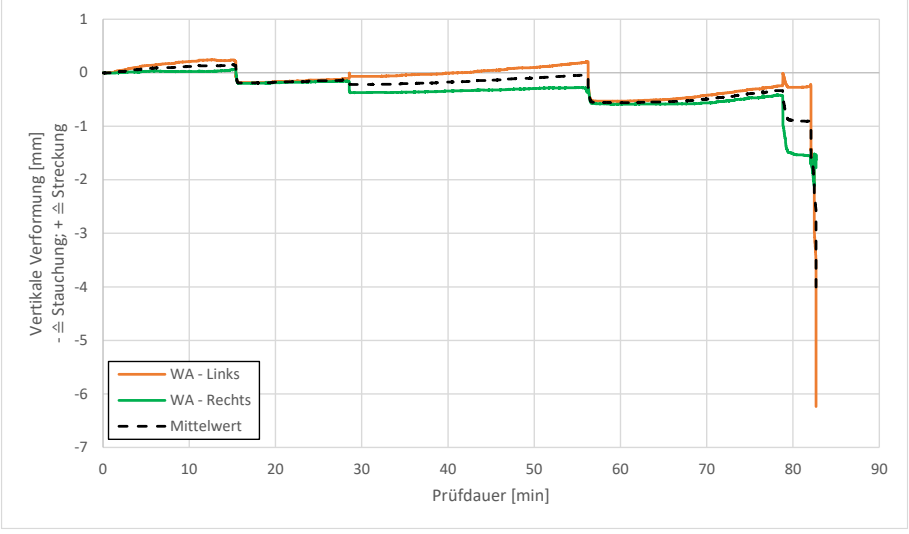


Abb. E.5: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

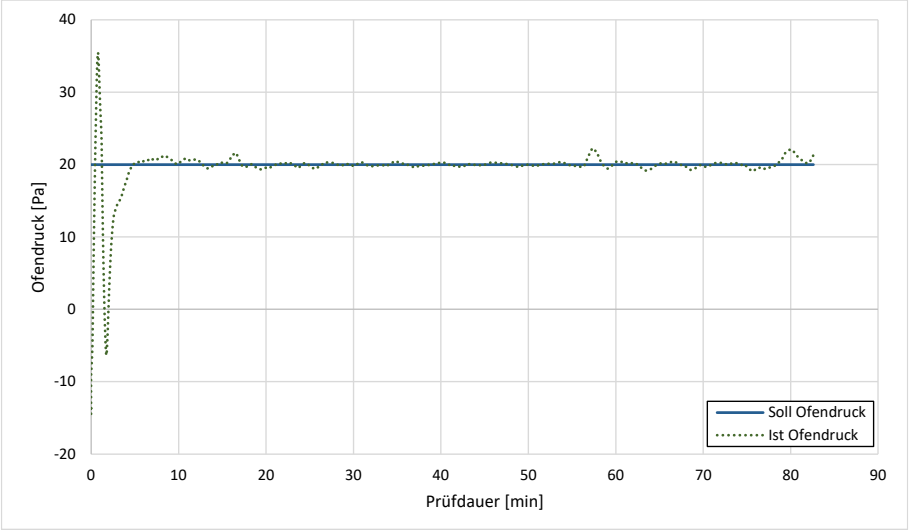


Abb. E.6: Ofendruck während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

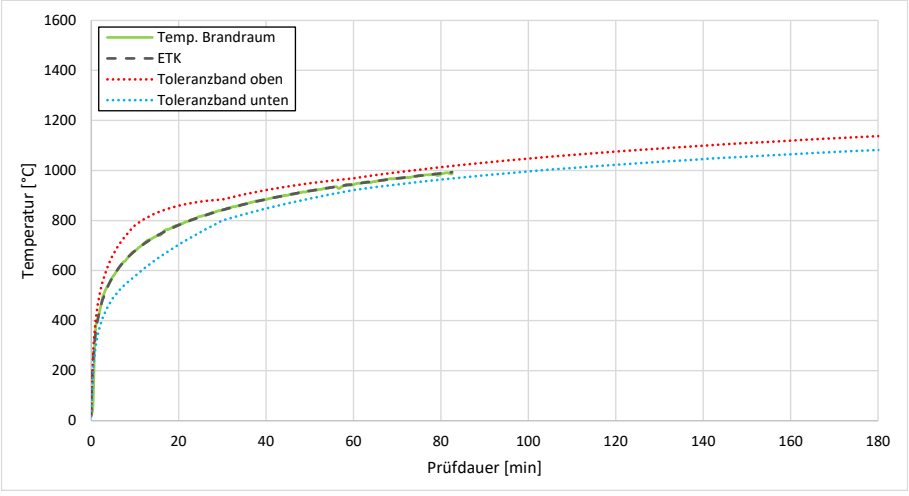


Abb. E.7: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

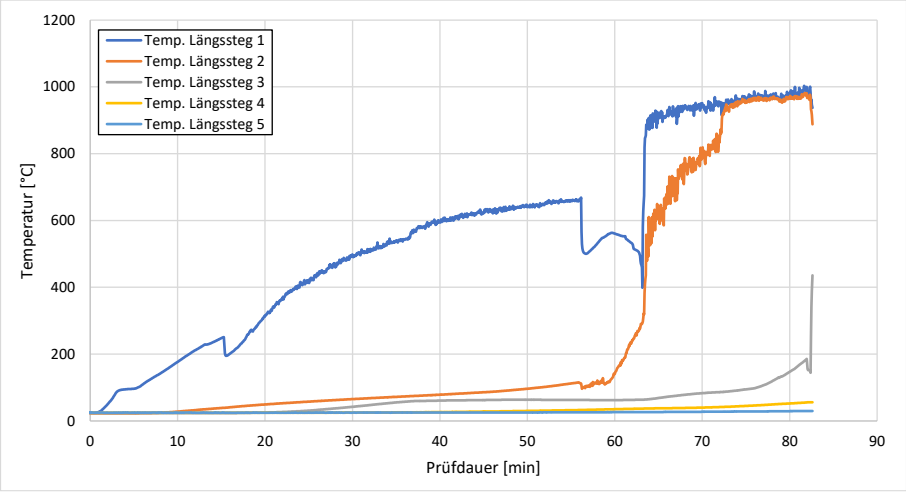


Abb. E.8: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

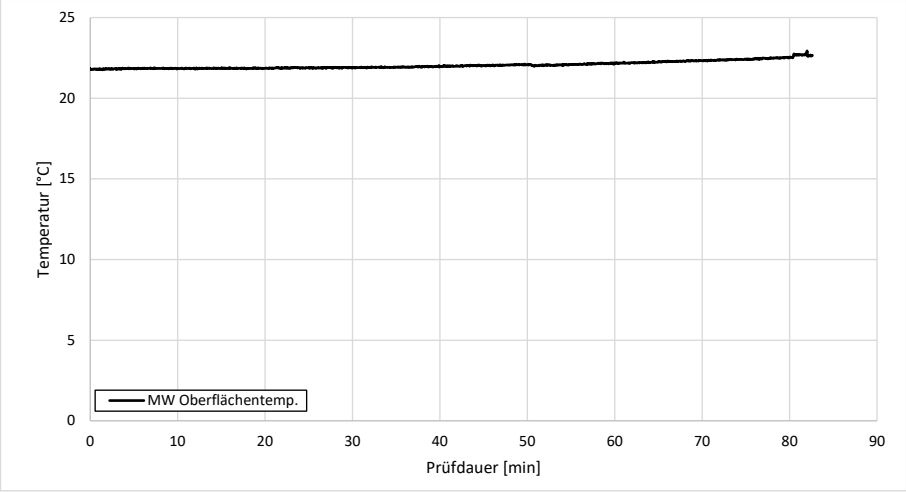


Abb. E.9: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A1-MZ70-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	15.06.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 3	Startzeit:	07:53
Versuchsnr.:	6	Endzeit:	09:16

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
5	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
6	Knackgeräusche
15	Knackgeräusch und Lastabfall um ~17 kN sowie Putzabplatzungen im unterem Wandbereich
28	Lastabfall um ~5 kN
40	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
51	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
56	Starke Putz- und Ziegelabplatzungen nahezu bei kompletter Wand und Lastabfall um ~20 kN
59	Abplatzungen von Putz im oberen Wandbereich
64	Abfall von Ziegelscherben im mittleren Wandbereich und 600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
66	Abfall von Ziegelscherben im unteren Wandbereich
71	Abfall von Ziegelscherben im mittleren Wandbereich
76	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
78	Lastabfall um ~16 kN sowie weitere Abplatzungen von Ziegelscherben und Putz im mittlerem Bereich
82	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

E.2 A2-MZ70-365mm-240kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (240 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

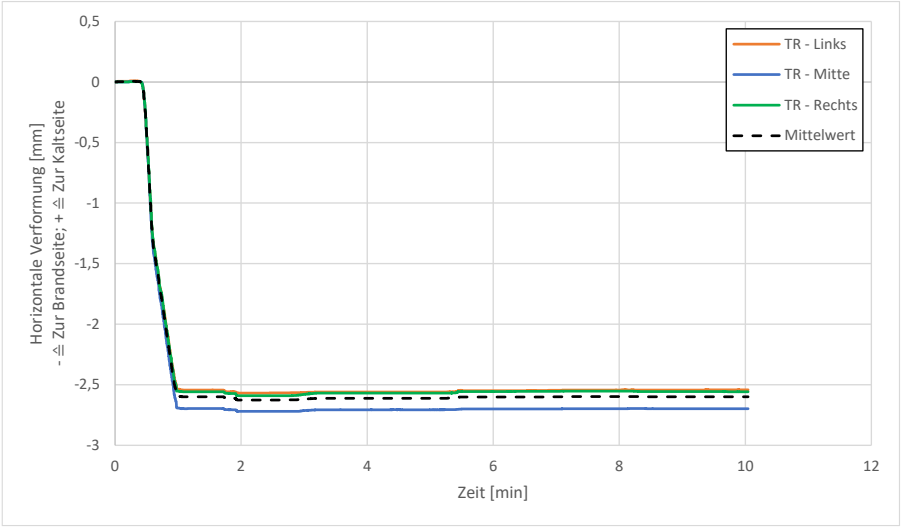


Abb. E.10: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A2-MZ70-365mm-240kN

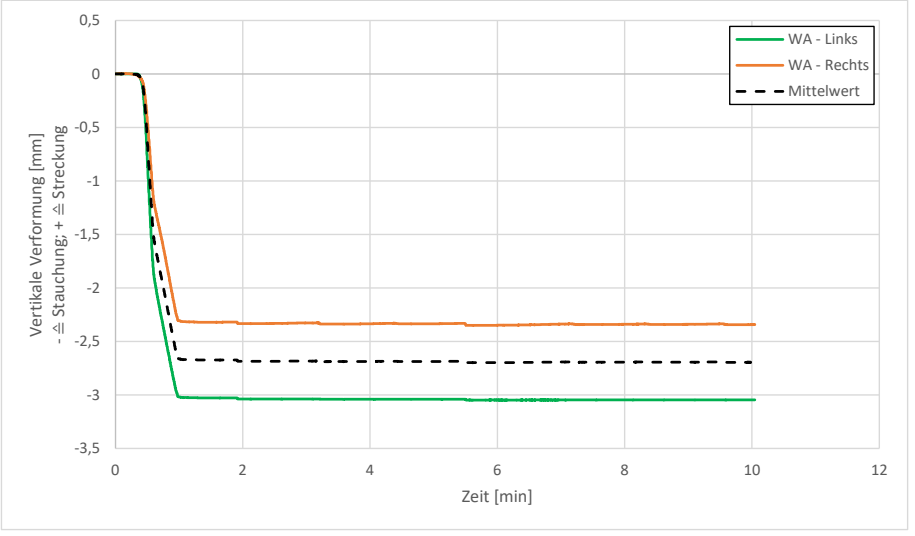


Abb. E.11: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A2-MZ70-365mm-240kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

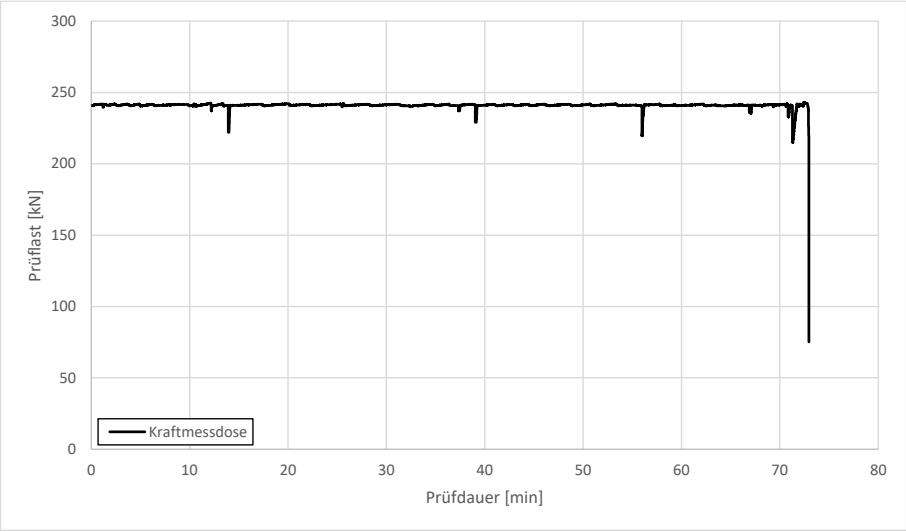


Abb. E.12: Prüflast über die Prüfdauer A2-MZ70-365mm-240kN

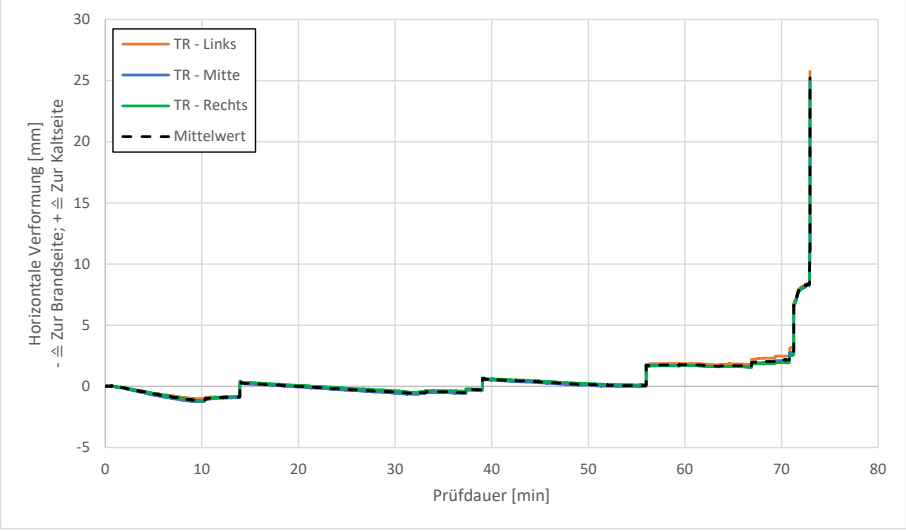


Abb. E.13: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

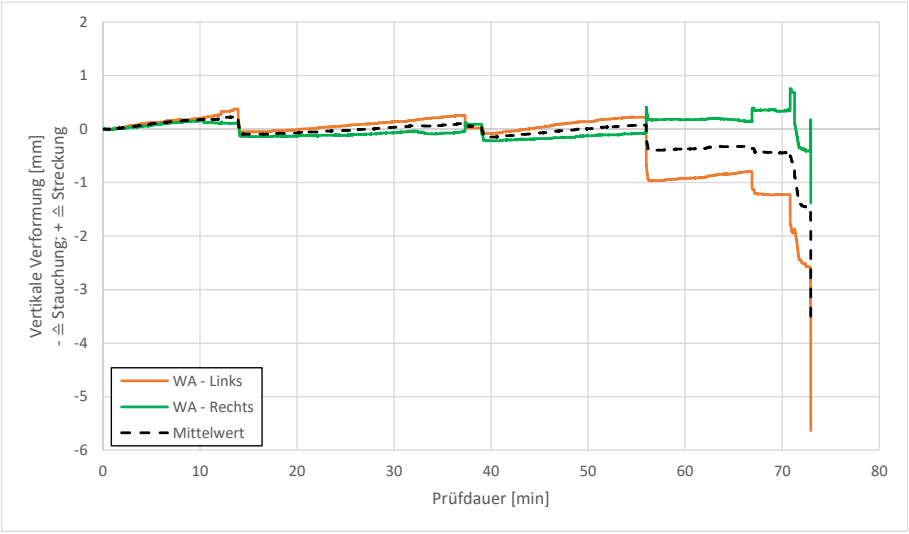


Abb. E.14: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

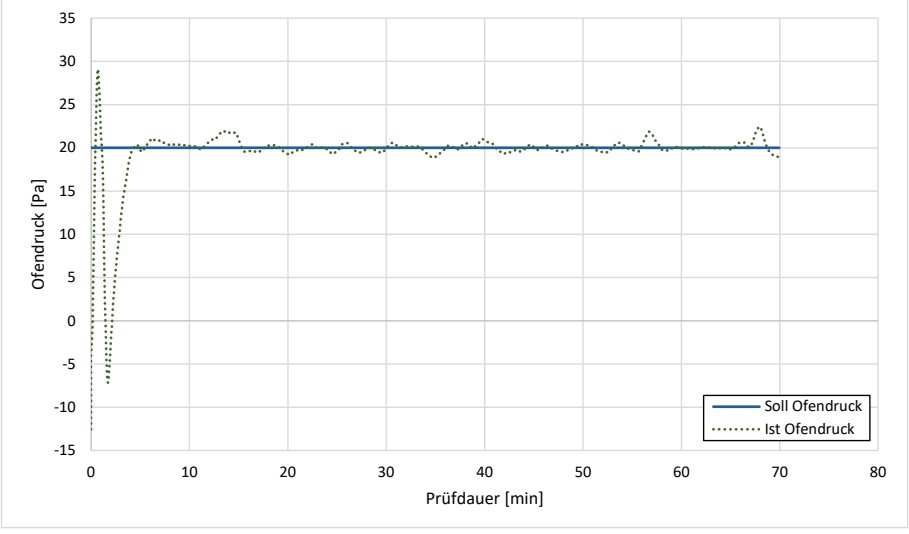


Abb. E.15: Ofendruck während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

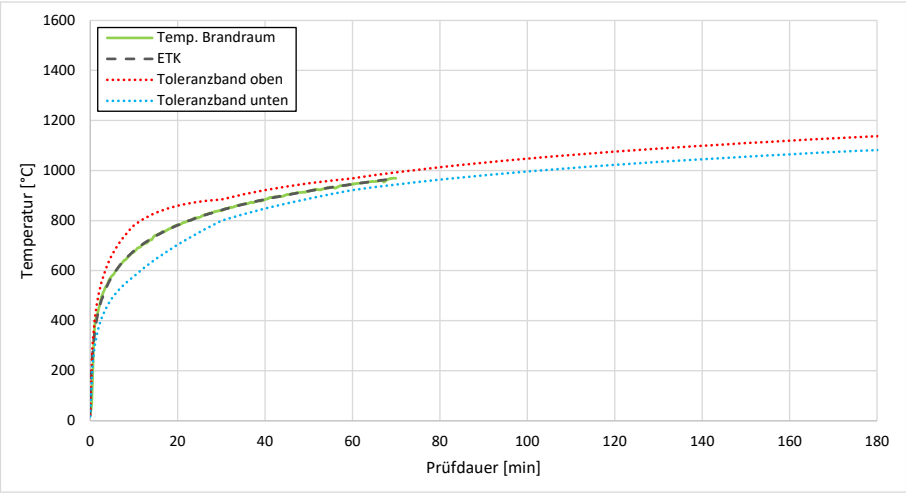


Abb. E.16: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

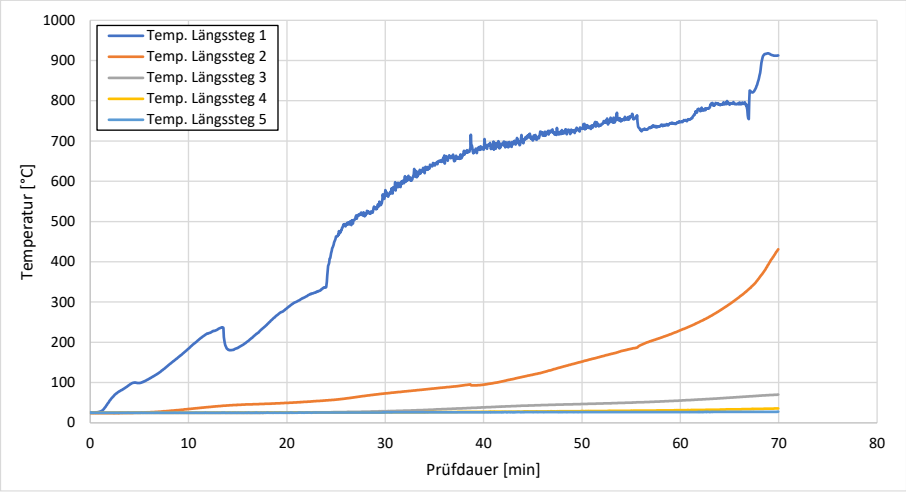


Abb. E.17: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

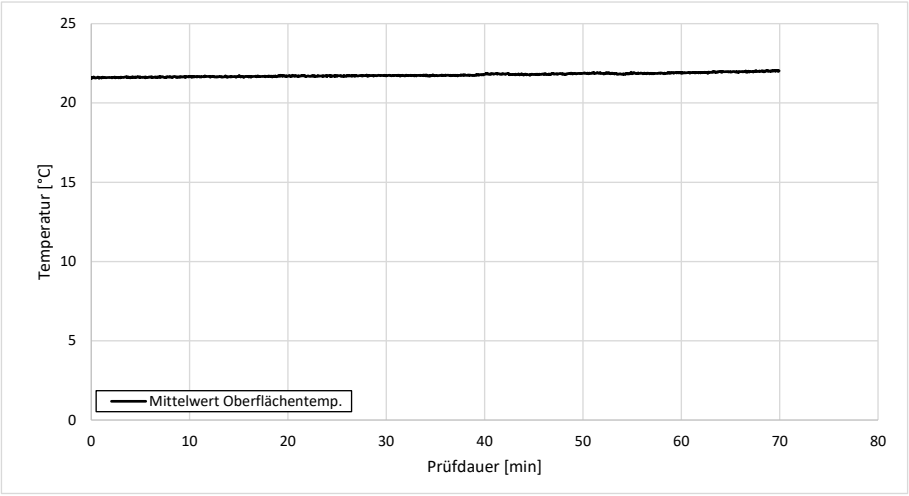


Abb. E.18: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A2-MZ70-365mm-240kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	23.05.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 2	Startzeit:	08:08
Versuchsnr.:	4	Endzeit:	09:15

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (240 kN)
0	Beginn Brandversuch
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
13	Knackgeräusch und Lastabfall um ~18 kN sowie Putzabplatungen im mittleren und oberen Bereich
18	Weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittleren und oberen Bereich
24	Weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittleren und oberen Bereich
29	Putz im oberen Wandbereich abgefallen
32	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
37	Weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittleren und oberen Wandbereich
38	Lastabfall um ~21 kN sowie weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittleren und oberen Bereich
41	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
45	Weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im oberen Bereich
55	Lastabfall um ~21 kN sowie weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittleren und oberen Bereich; Rauchaustritt seitlich von der Wand
62	Weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
66	Weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittleren Wanddrittel
67	Abfall von Putz im unteren Wandbereich
70	Weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittleren Wandbereich
71	Lautes Knackgeräusch und Lastabfall um ~26 kN sowie Abplatzungen von Ziegelscherben; Ebenfalls Riss im Putz auf der Außenseite bei oberster Steinreihe
72	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

E.3 A3-MZ70-365mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

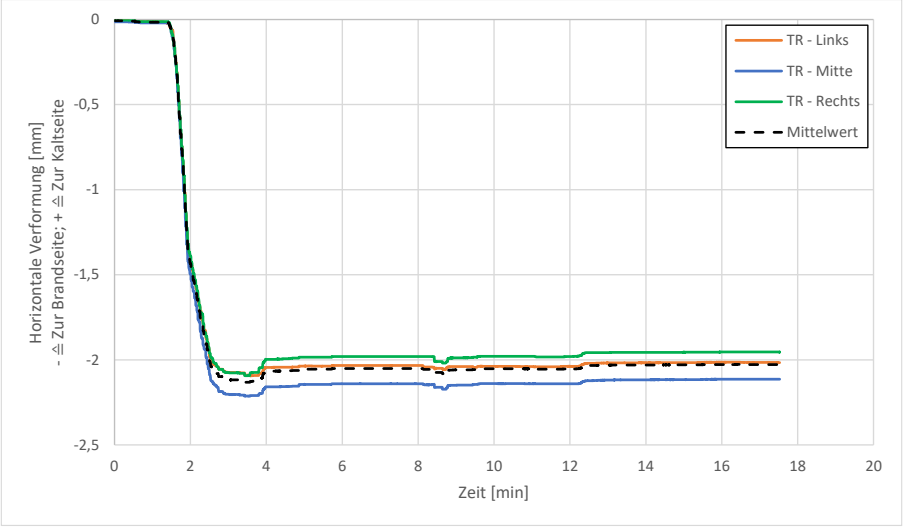


Abb. E.19: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A3-MZ70-365mm-200kN

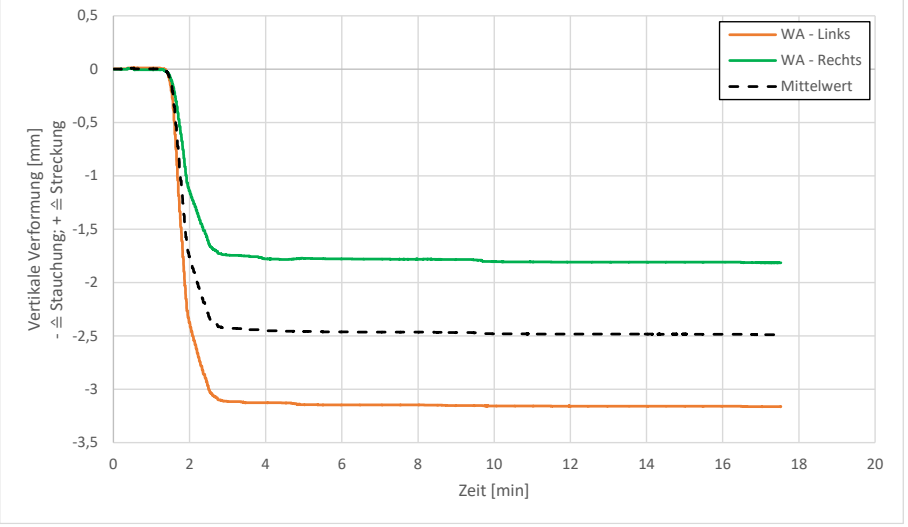


Abb. E.20: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A3-MZ70-365mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

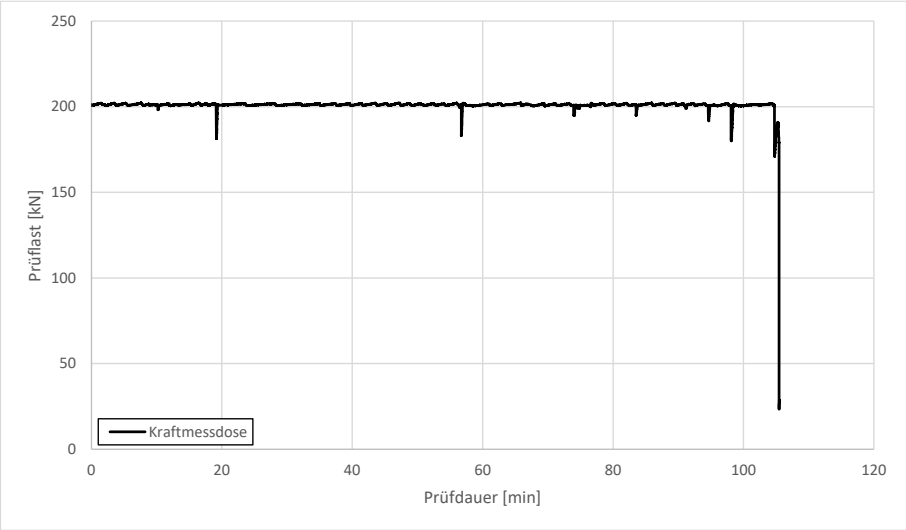


Abb. E.21: Prüflast über die Prüfdauer A3-MZ70-365mm-200kN

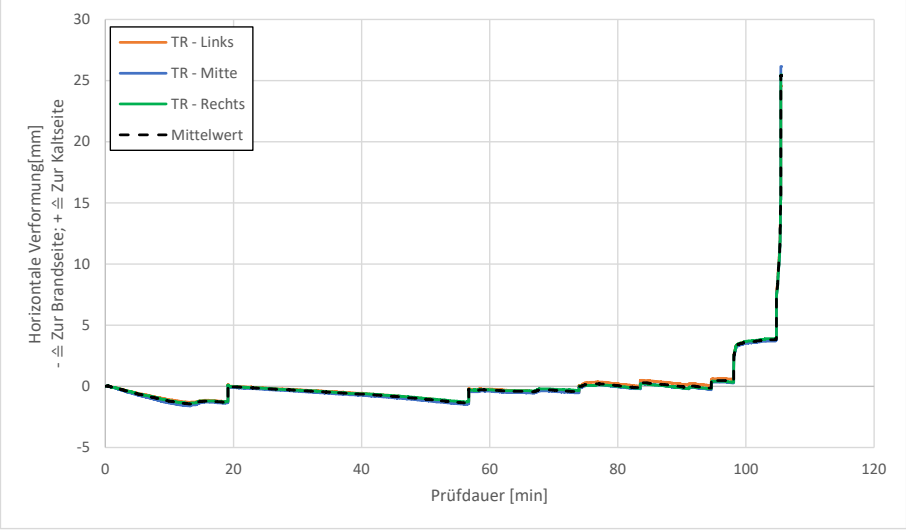


Abb. E.22: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

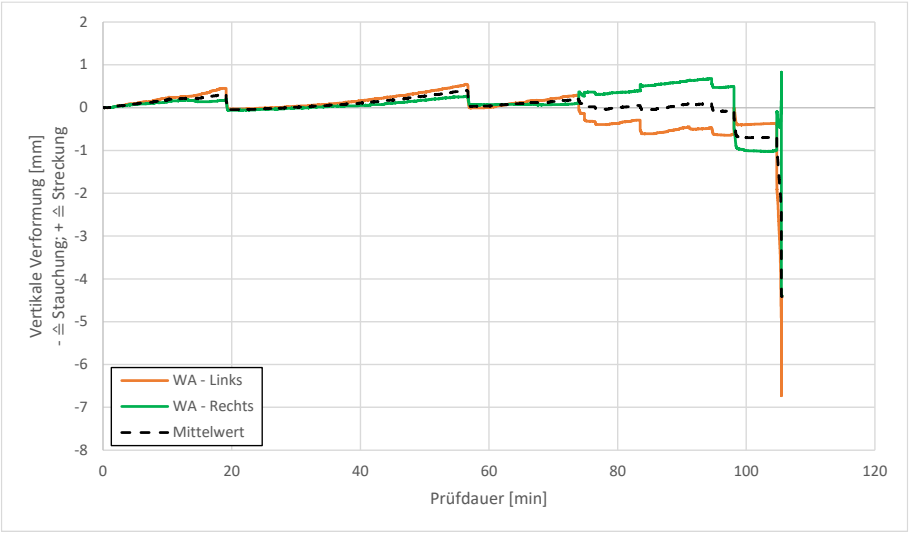


Abb. E.23: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

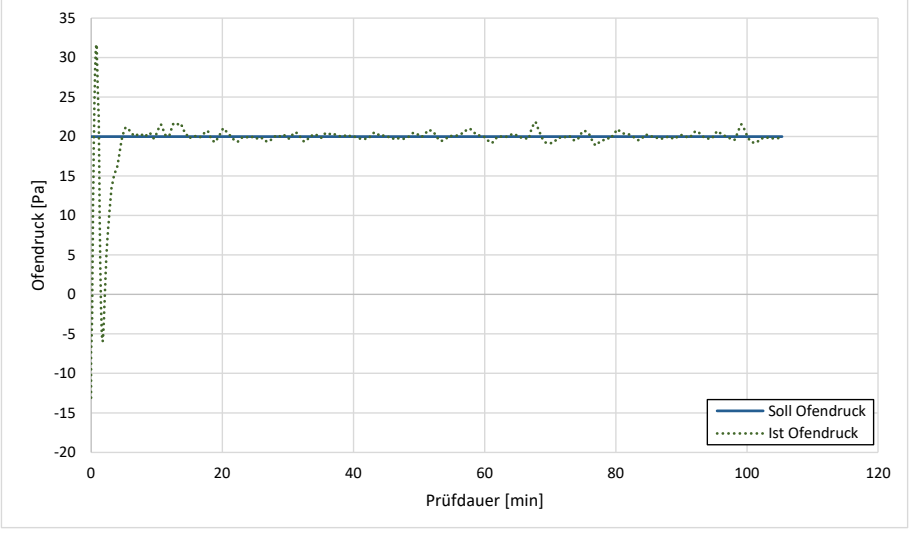


Abb. E.24: Ofendruck während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

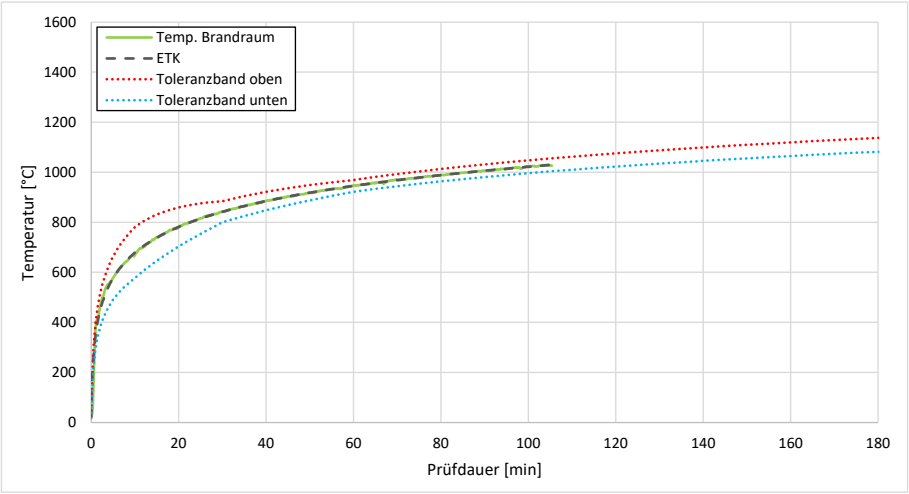


Abb. E.25: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

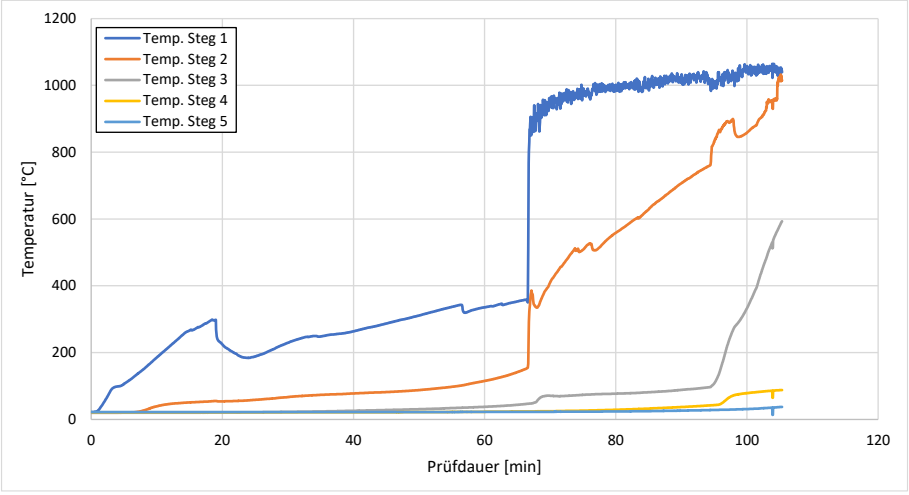


Abb. E.26: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

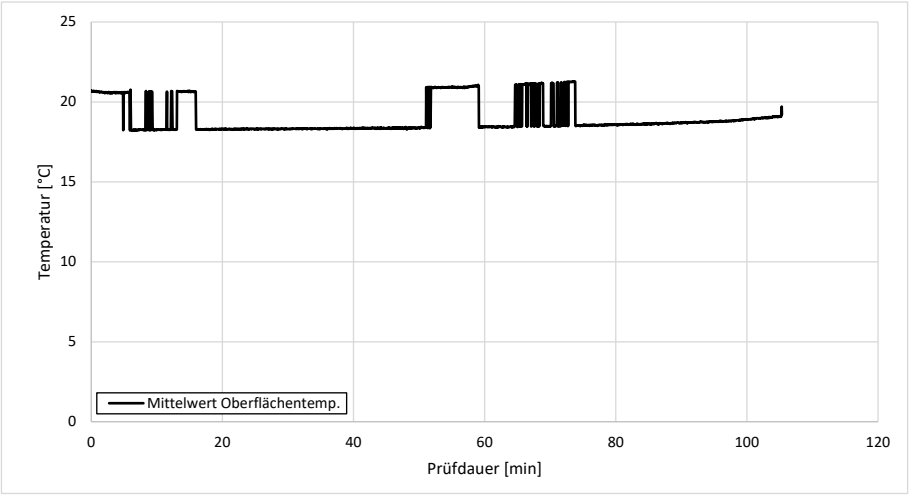


Abb. E.27: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A3-MZ70-365mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	02.06.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 1	Startzeit:	07:55
Versuchsnr.:	5	Endzeit:	09:15

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
13	Knackgeräusche
19	Knackgeräusch und Lastabfall um ~19 kN sowie Putzabplatzungen im oberen Wandbereich
36	Weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im oberen Wandbereich
56	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie Lastabfall um ~17 kN und weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im oberen Wandbereich
66	Putz- und Ziegelabplatzungen im mittlerem Wandbereich
67	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
73	Weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittleren und oberen Wandbereich
83	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte und weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittlerem und oberen Wandbereich
91	Weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittlerem und oberen Wandbereich
95	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte und Lastabfall um ~9 kN sowie weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittlerem und oberen Wandbereich
97	Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im mittlerem und unteren Bereich, seitlich tritt Qualm aus der Wand aus
98	Lastabfall um ~20 kN sowie weitere Abplatzungen von Ziegelscherben und Putz im mittlerem und unteren Wandbereich; Auf der Außenseite horizontaler Riss im Putz bei oberster Steinreihe
104	Lastabfall und weitere Abplatzungen von Ziegelscherben im mittlerem und oberen Wandbereich
105	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

E.4 A4-W07 V-365mm-509kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (509 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

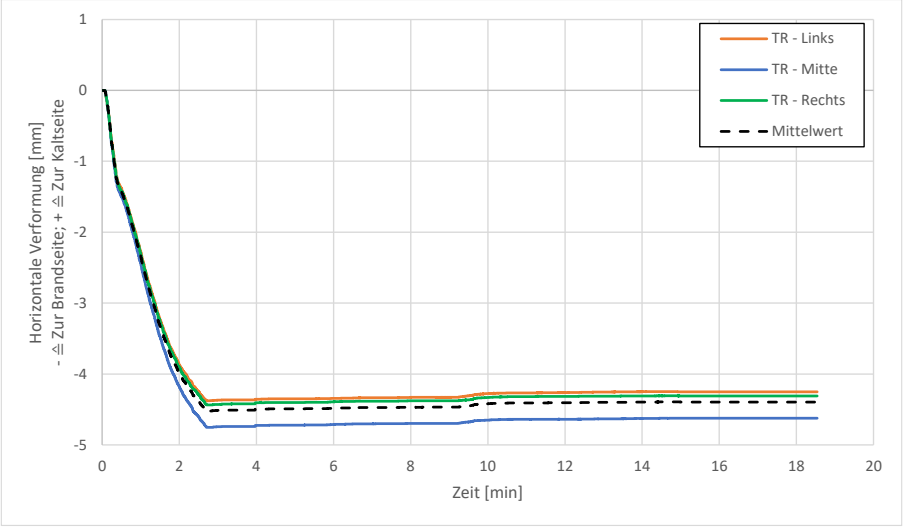


Abb. E.28: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A4-W07 V-365mm-509kN

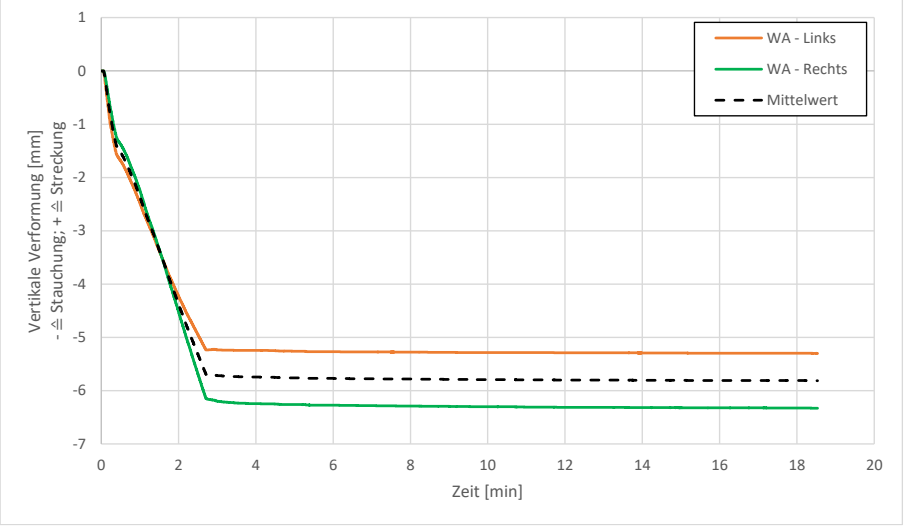


Abb. E.29: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A4-W07 V-365mm-509kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

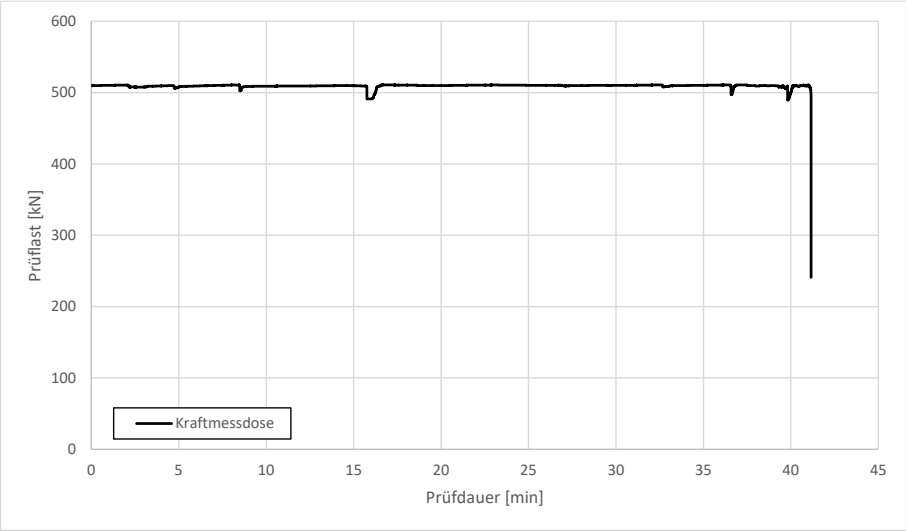


Abb. E.30: Prüflast über die Prüfdauer A4-W07 V-365mm-509kN

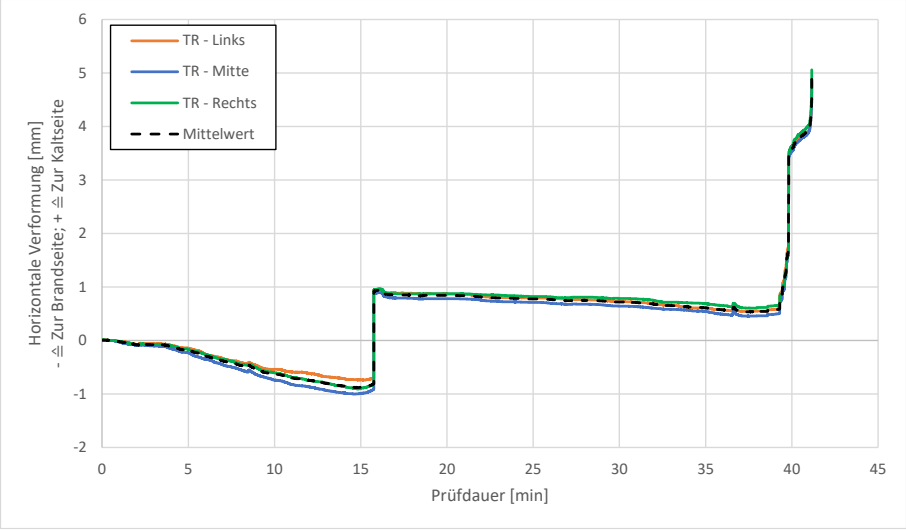


Abb. E.31: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

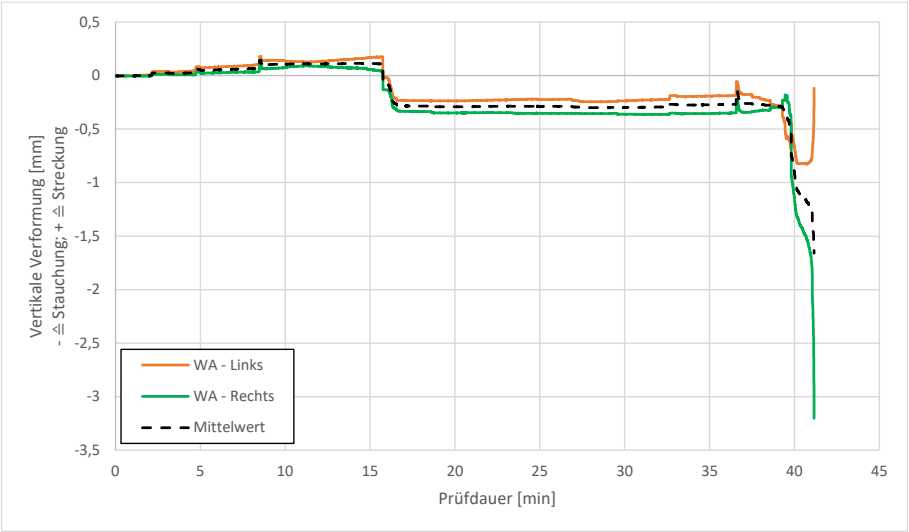


Abb. E.32: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

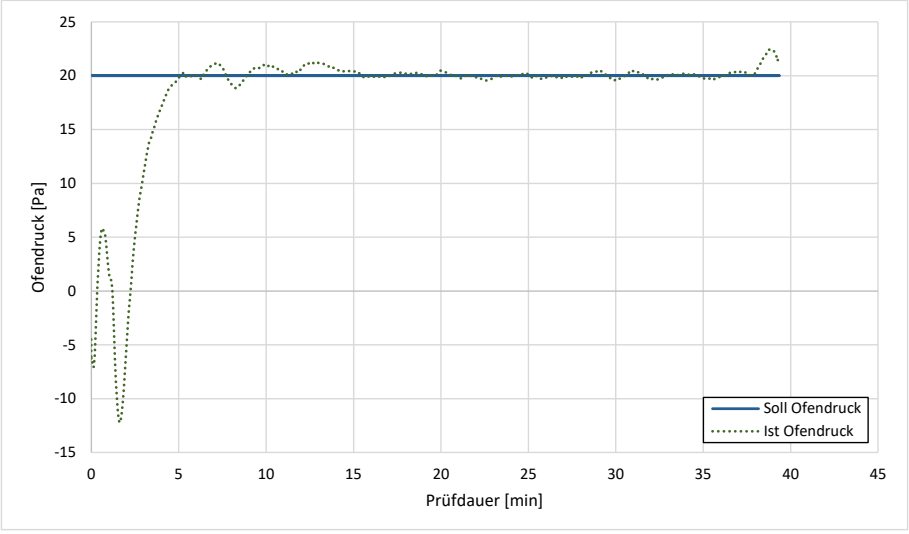


Abb. E.33: Ofendruck während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

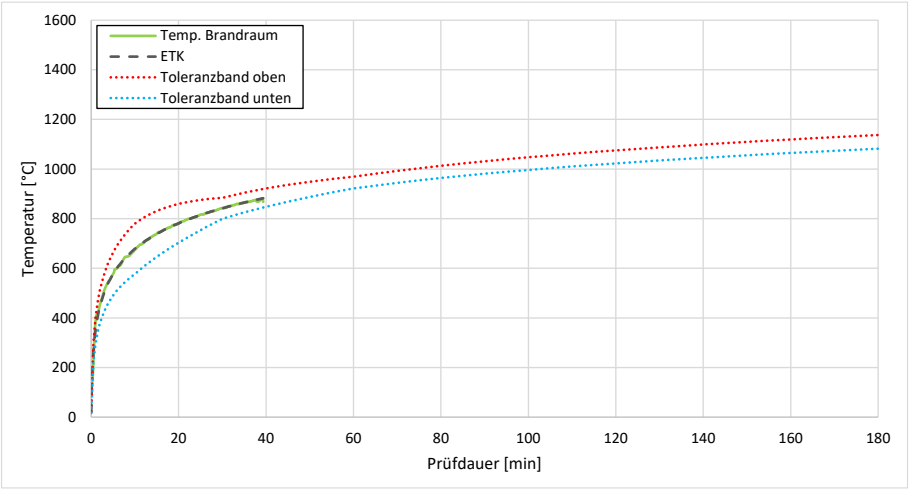


Abb. E.34: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

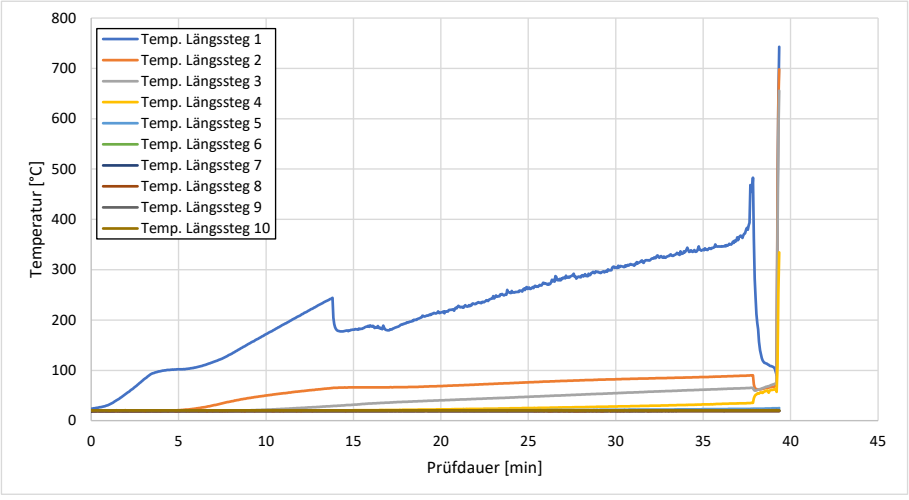


Abb. E.35: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

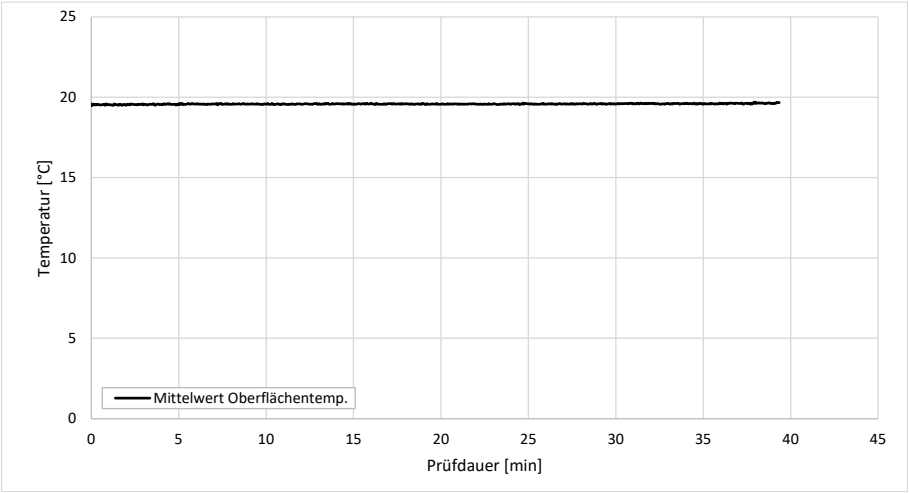


Abb. E.36: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A4-W07 V-365mm-509kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	27.04.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 3	Startzeit:	09:00
Versuchsnr.:	1	Endzeit:	09:39

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (509 kN)
0	Beginn Brandversuch, per Hand zu viel von der Prüflast abgelassen
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
15	Knackgeräusche und Lastabfall um 18 kN
17	Unten links bei der Wand Putzabplatzungen sowie vereinzelt Ziegelscherben
20	Abfall weiterer Ziegelscherben
29	Abfall im unteren Wandbereich von Putz und Ziegelscherben
36	Per Hand zu viel von der Prüflast abgelassen
38	Abfall weiterer Ziegelscherben
39	Weiterer Abfall von Putz und Ziegelscherben bis zur Wandmitte + Lastabfall um 20 kN
39	Kompletter Putzabfall sowie vereinzelter Ziegelscherben über gesamten Wandquerschnitt
39	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

E.5 A5-W07 V-365mm-375kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (375 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben. Die kurz vor der fünften Prüfminute sich einstellenden Verformungen resultieren daraus, dass die Handpumpe für die Belastung bis zu diesem Zeitpunkt nicht richtig geöffnet war.

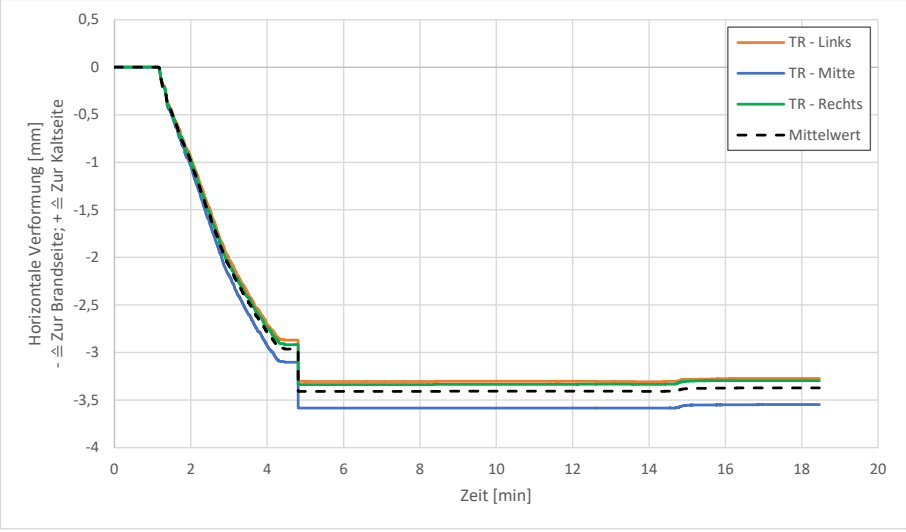


Abb. E.37: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A5-W07 V-365mm-375kN

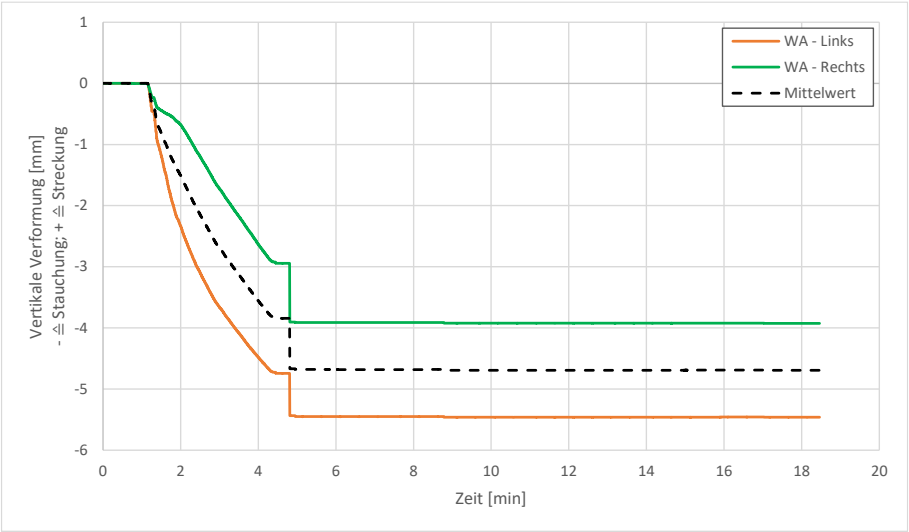


Abb. E.38: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A5-W07 V-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

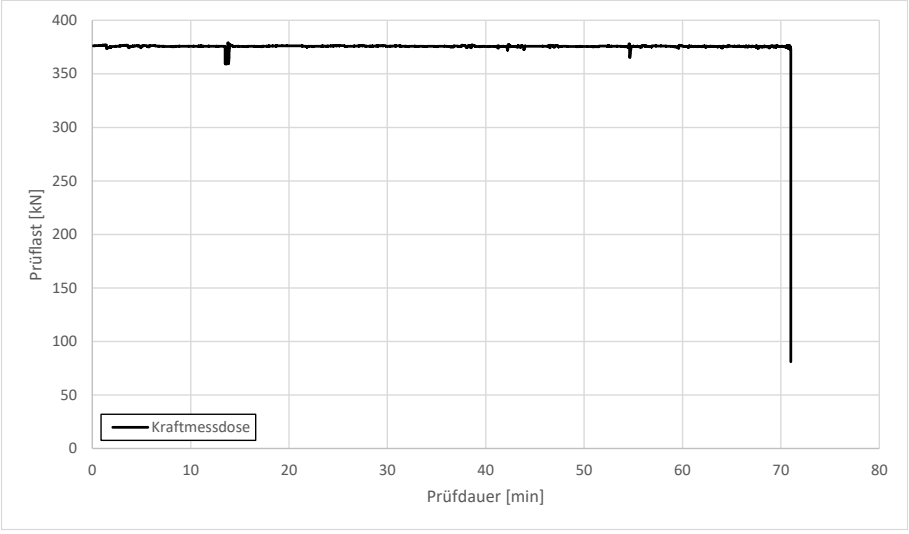


Abb. E.39: Prüflast über die Prüfdauer A5-W07 V-365mm-375kN

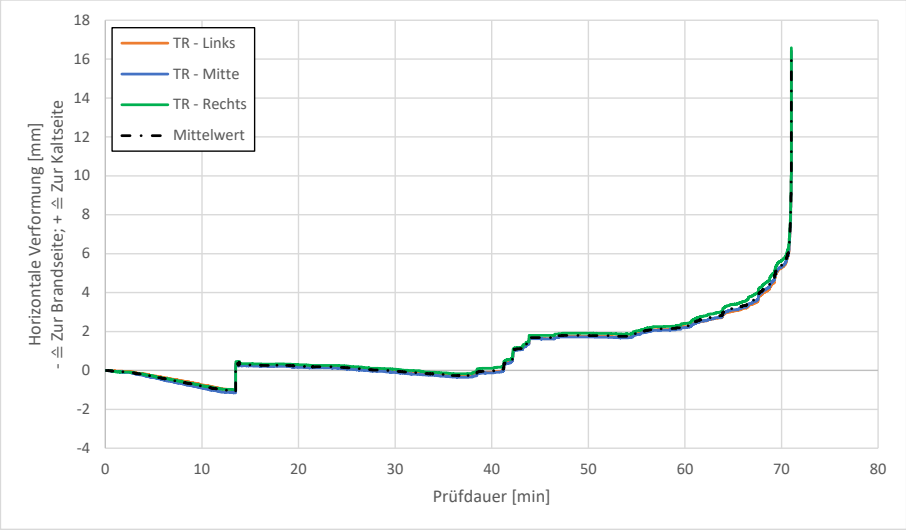


Abb. E.40: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

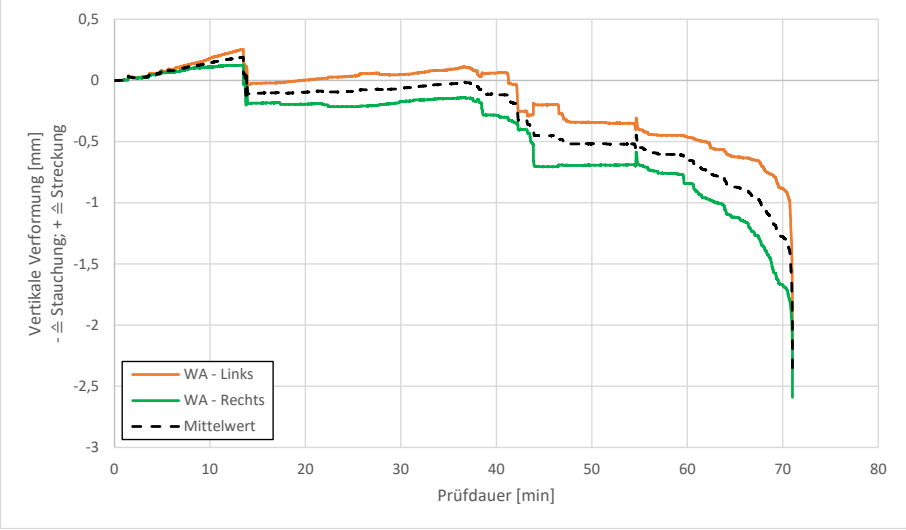


Abb. E.41: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

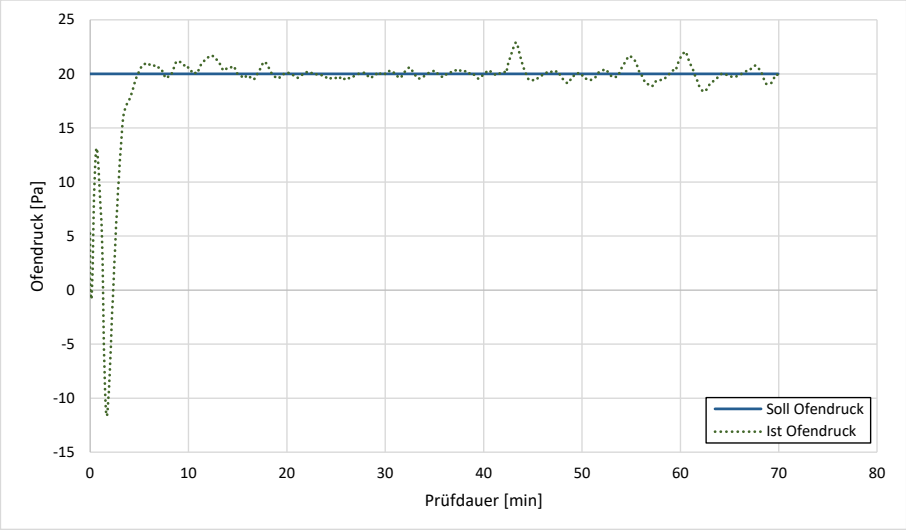


Abb. E.42: Ofendruck während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

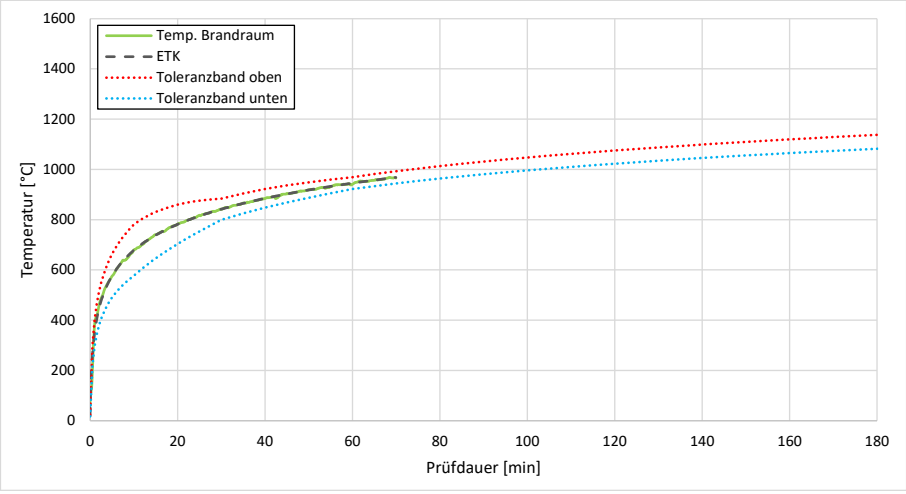


Abb. E.43: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

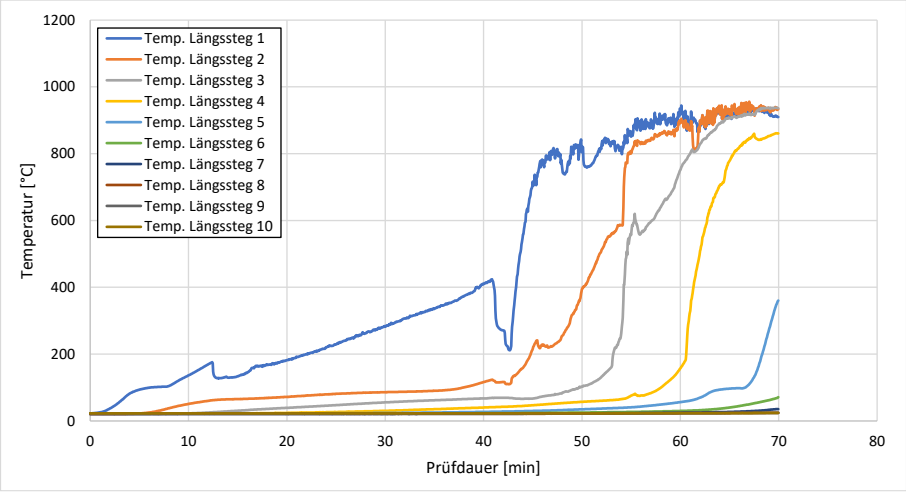


Abb. E.44: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

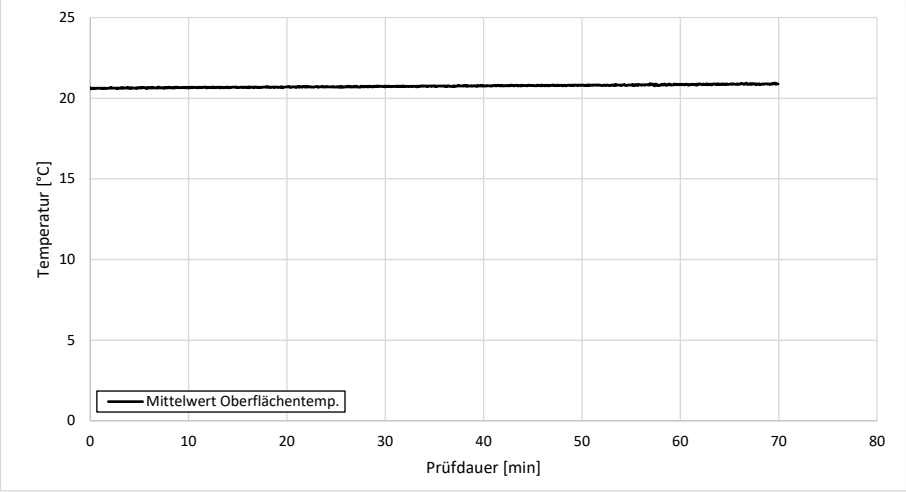


Abb. E.45: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A5-W07 V-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	09.05.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 1	Startzeit:	08:10
Versuchsnr.:	2	Endzeit:	09:20

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
6	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
12	Knackgeräusche und Lastabfall um ~16 kN
17	Unterer Wandbereich Putzabplatzungen sowie vereinzelt Ziegelscherben
38	Richtungsänderung bei Verformung
40	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie Knackgeräusche und stärkerer Richtungsänderung
43	Putzabplatzungen von unten bis Wandmitte sowie schneller Temperaturanstieg bei 1. und 2. Ziegelreihe
44	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
50	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
54	Lastabfall und größere Ziegelabplatzungen unterer Wandteil
54	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie größere Ziegelabplatzungen unterer Wandteil
55	600 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
58	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
60	Größere Ziegelabplatzungen unterer Wandteil bis zur 4. Ziegelreihe
63	600 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
65	Rauchaustritt und weitere Ziegelabplatzungen unterer Wandteil
67	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
69	Konstanter langsamer Lastabfall und Verformungszunahme
70	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der Wandmitte

E.6 A6-W07 V-365mm-280kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (280 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben. Die Datenaufzeichnung während der Vorbelastung wurde zu spät gestartet, weshalb die Messwerte nicht bei 0 mm beginnen.

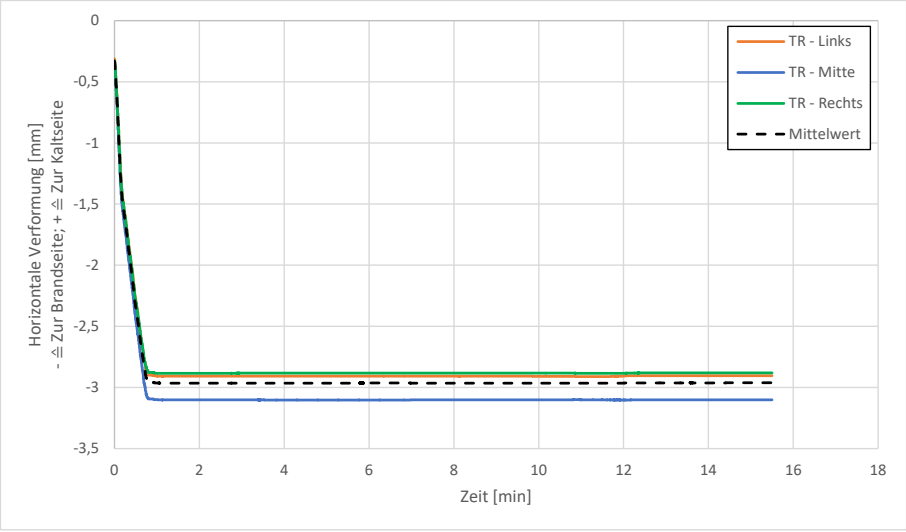


Abb. E.46: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A6-W07 V-365mm-280kN

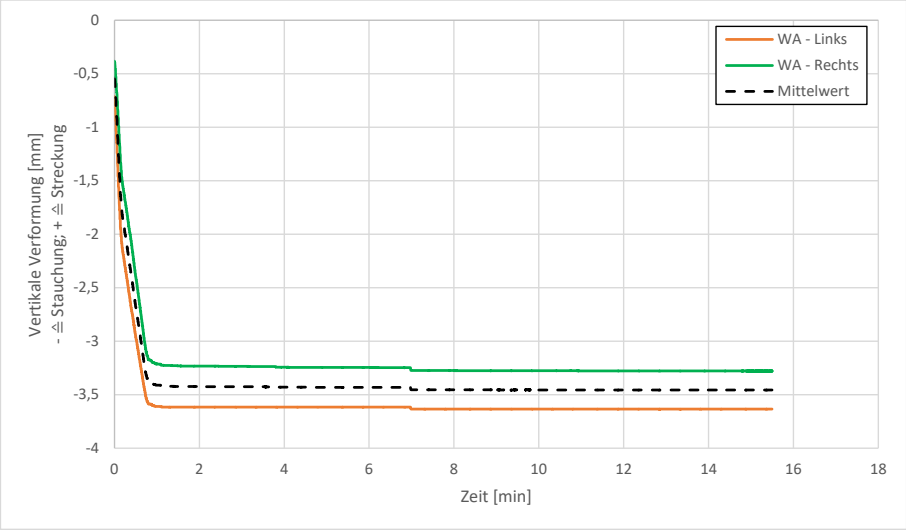


Abb. E.47: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A6-W07 V-365mm-280kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

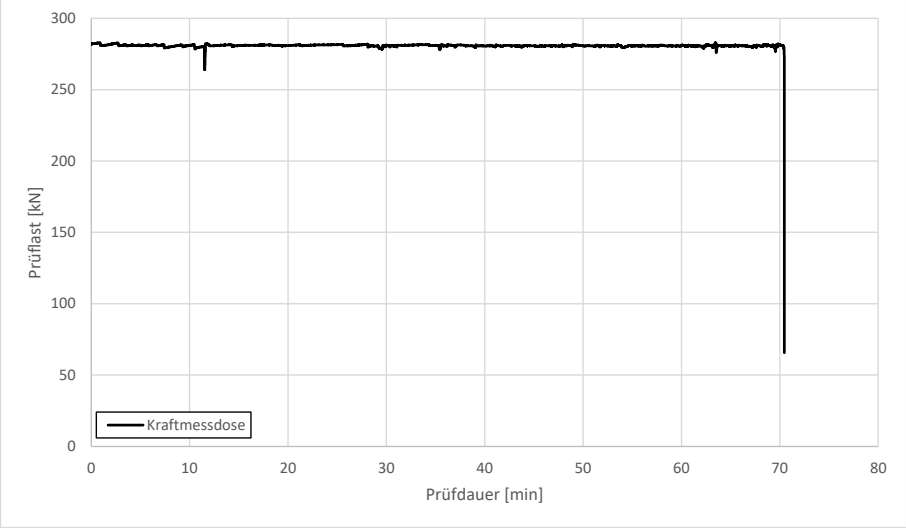


Abb. E.48: Prüflast über die Prüfdauer A6-W07 V-365mm-280kN

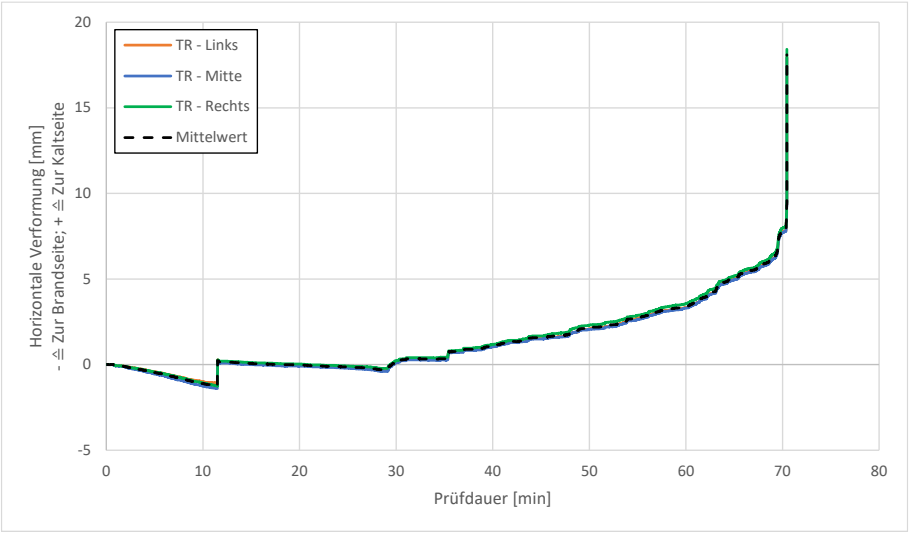


Abb. E.49: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

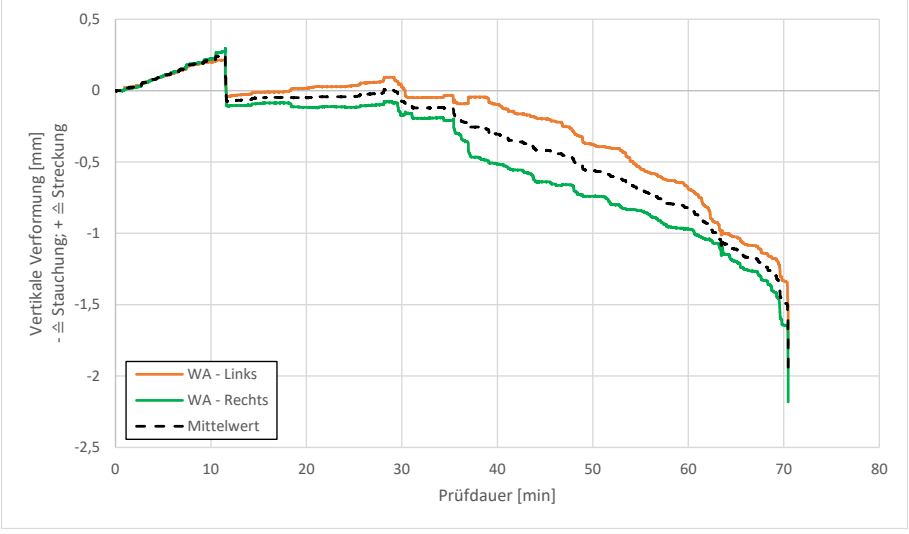


Abb. E.50: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

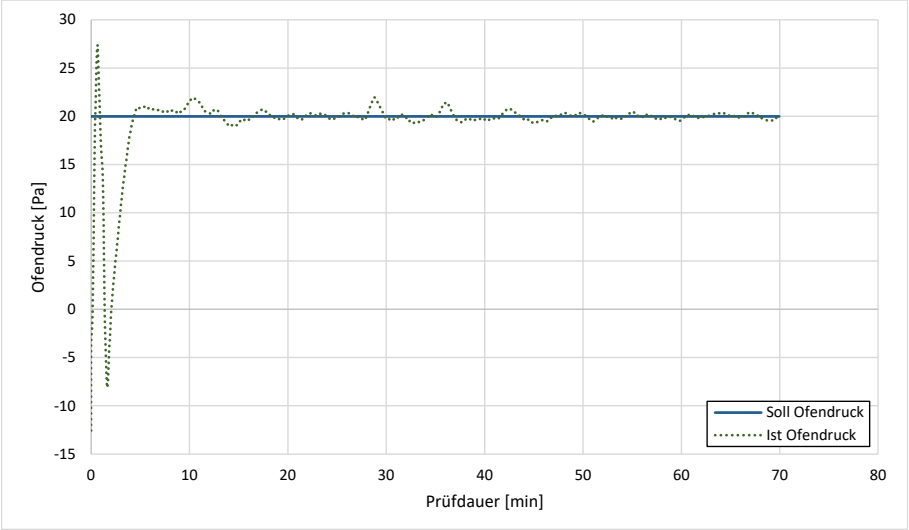


Abb. E.51: Ofendruck während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

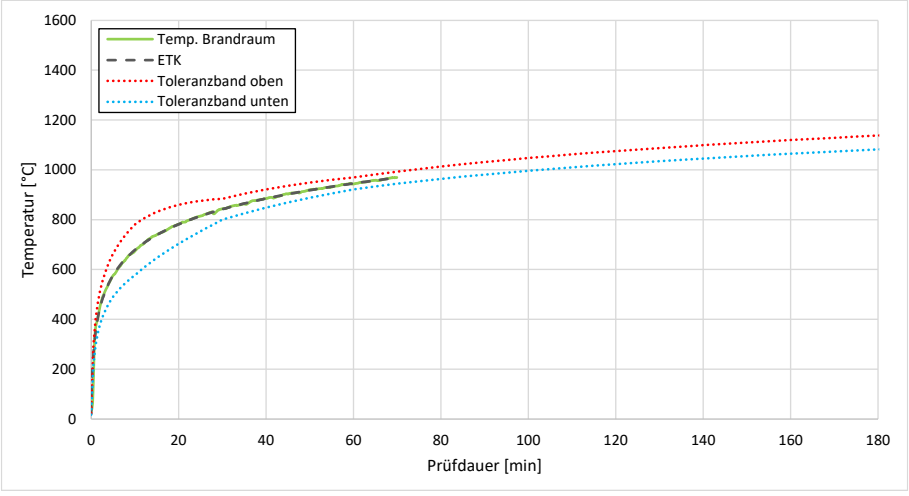


Abb. E.52: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

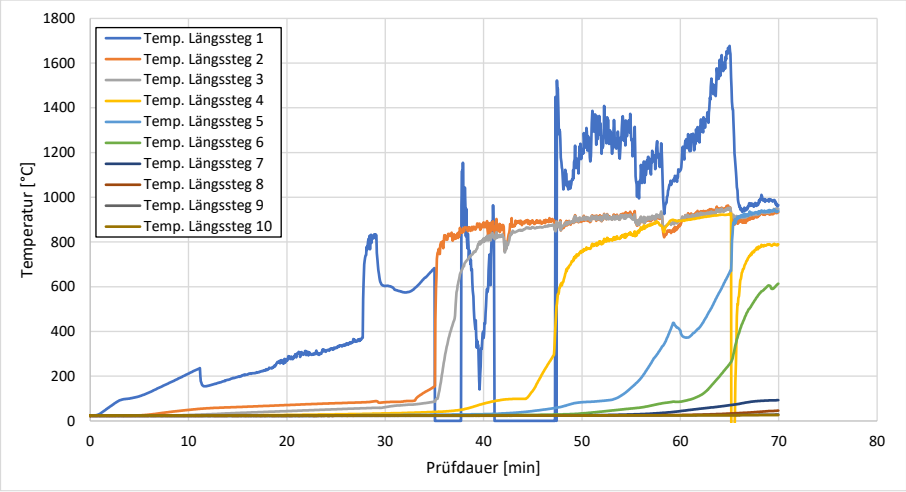


Abb. E.53: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

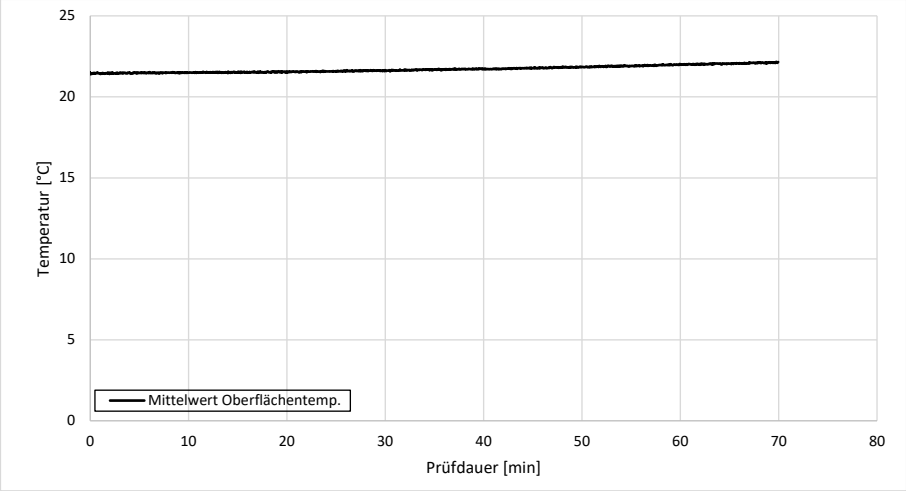


Abb. E.54: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A6-W07 V-365mm-280kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	16.05.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 2	Startzeit:	07:53
Versuchsnr.:	3	Endzeit:	09:03

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (280 kN)
0	Beginn Brandversuch
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
11	Knackgeräusche und Lastabfall um ~16 kN sowie Putzabplatzungen im unteren Wandbereich
16	Unten und mittig von der Wand Putzabplatzungen sowie vereinzelter Abfall von Ziegelscherben
17	Unten und mittig von der Wand Putzabplatzungen sowie vereinzelter Abfall von Ziegelscherben
22	Unten und mittig von der Wand Putzabplatzungen sowie vereinzelter Abfall von Ziegelscherben
27	Abplatzungen vom Putz bis oberes Wanddrittel
33	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie 600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
35	Größe Ziegelabplatzungen Wandmitte und 100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie 600°C beim 2. Thermoelement
37	600 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
41	Weitere Ziegelabplatzungen Wandmitte
44	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
48	Ziegelabplatzungen in Wandmitte und 600 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
53	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
61	100 °C beim 6. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
64	600 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
69	600 °C beim 6. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
69	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) in Wandmitte

E.7 A7-W07 UV-365mm-375kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (375 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

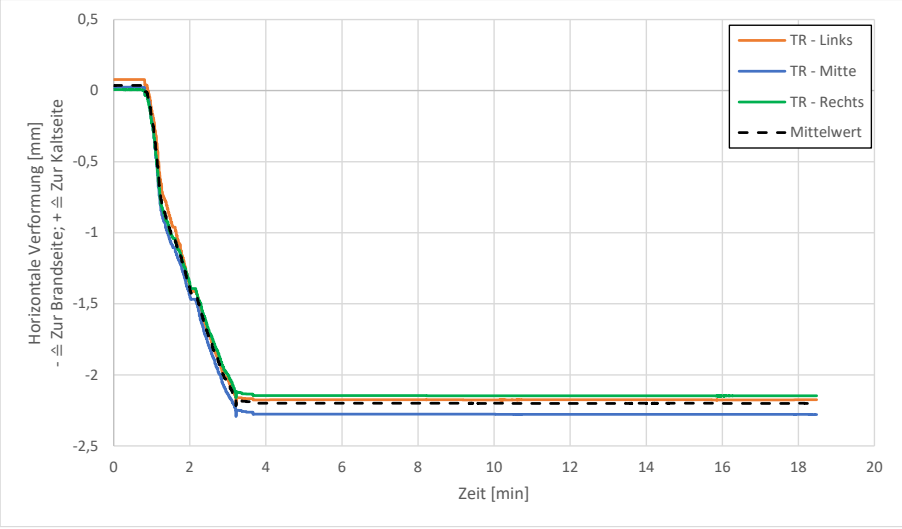


Abb. E.55: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A7-W07 UV-365mm-375kN

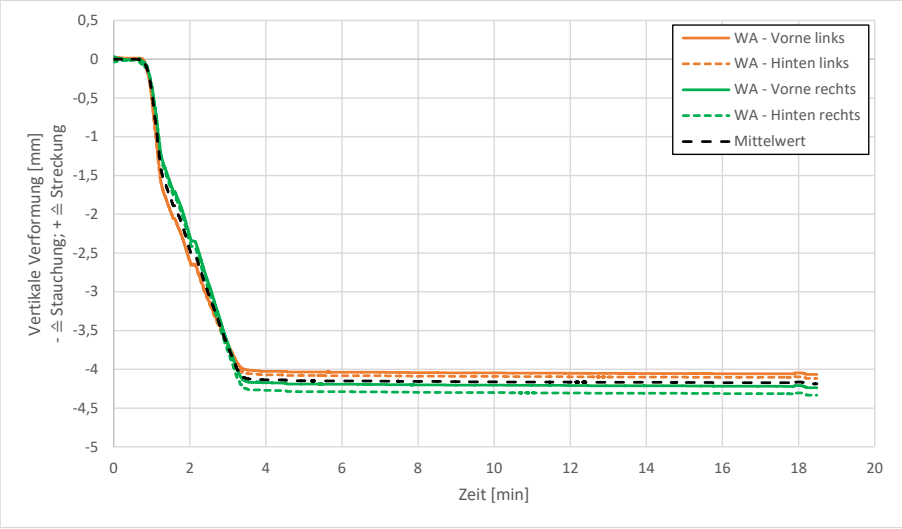


Abb. E.56: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A7-W07 UV-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

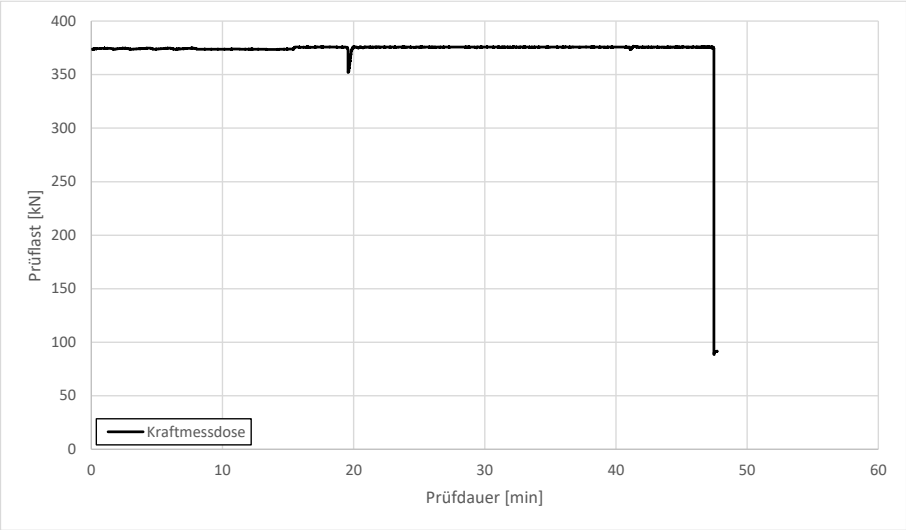


Abb. E.57: Prüflast über die Prüfdauer A7-W07 UV-365mm-375kN

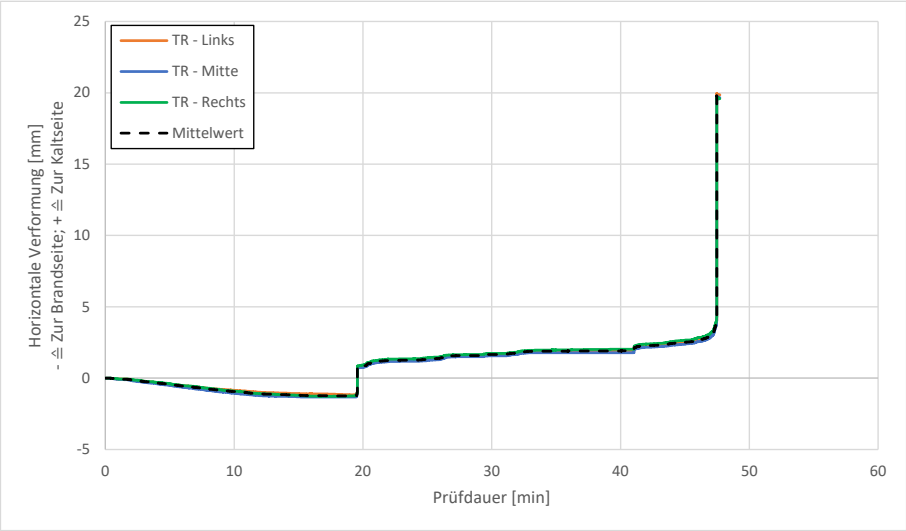


Abb. E.58: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

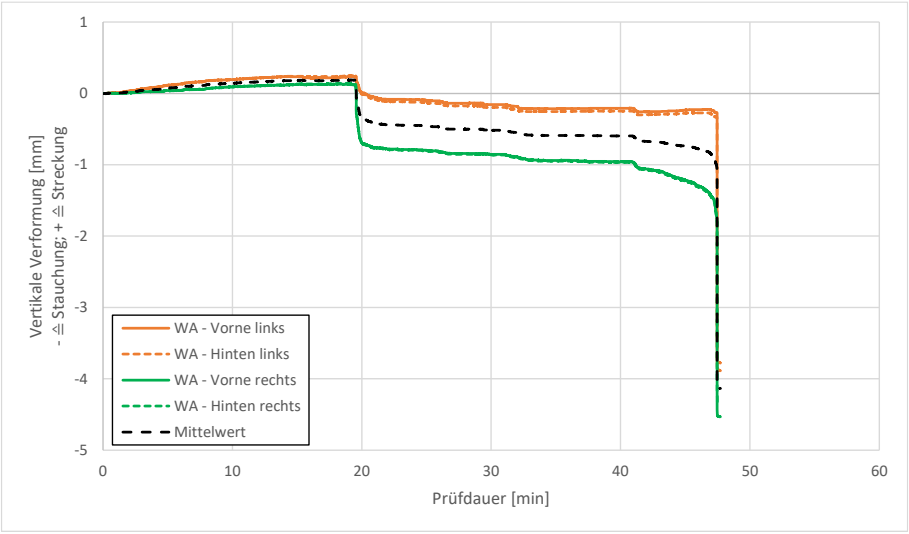


Abb. E.59: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

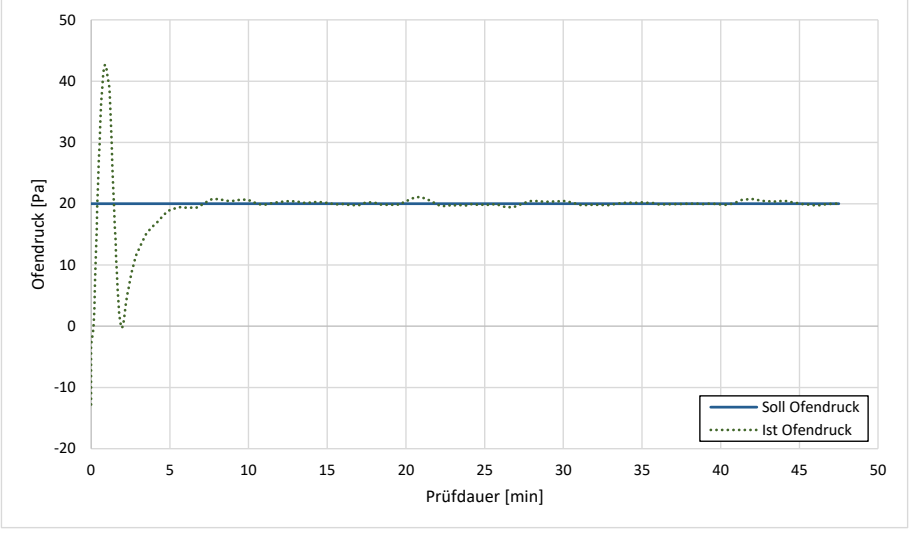


Abb. E.60: Ofendruck während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

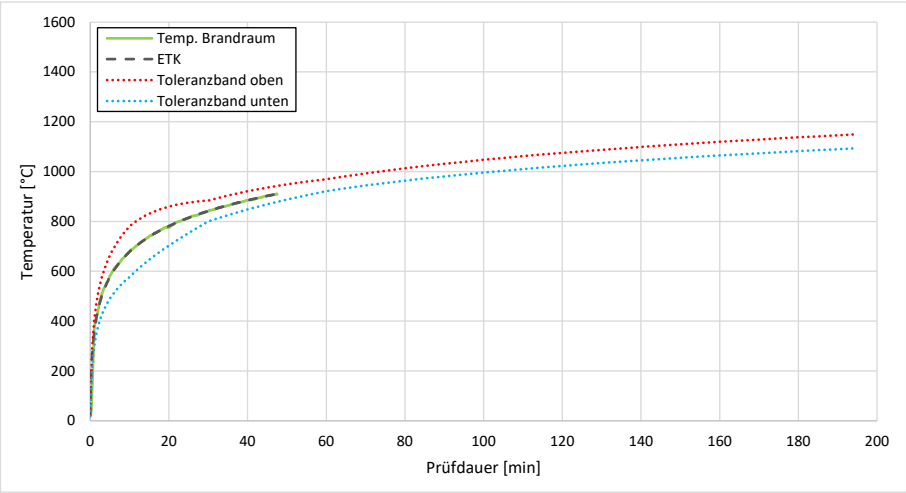


Abb. E.61: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

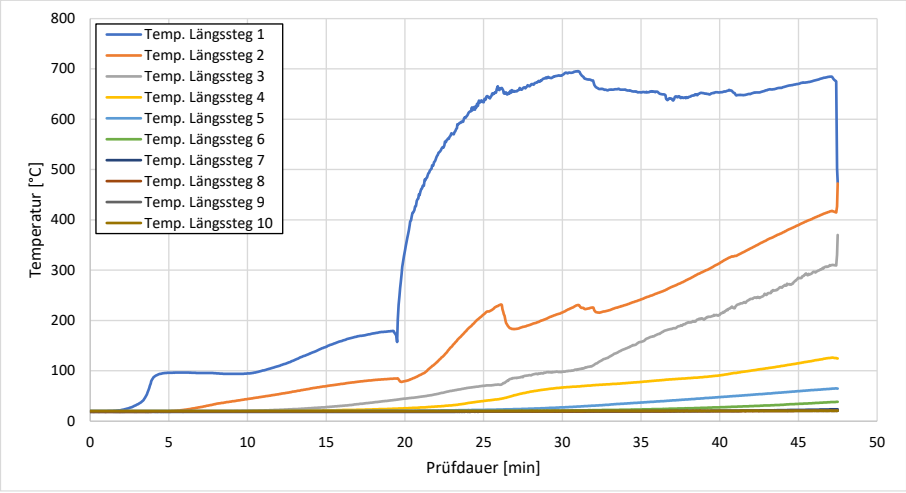


Abb. E.62: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

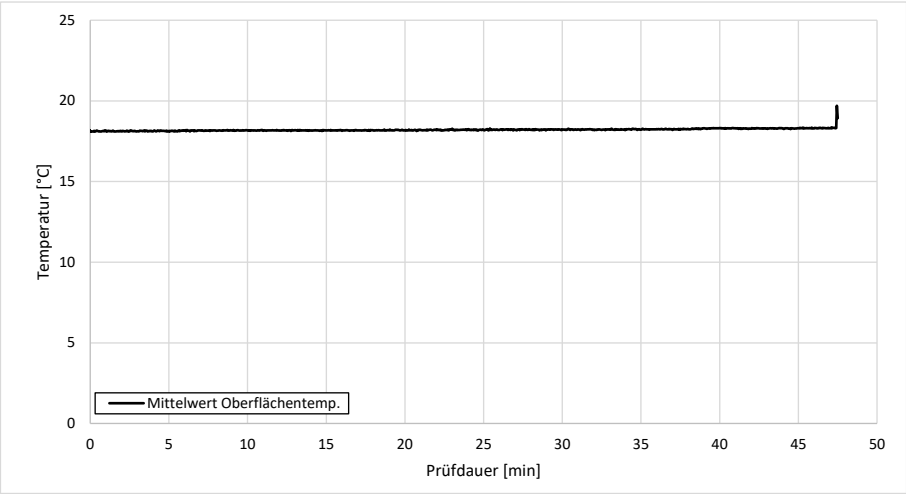


Abb. E.63: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A7-W07 UV-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	17.11.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 1	Startzeit:	07:35
Versuchsnr.:	11	Endzeit:	08:42

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
10	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
11	Leise Knackgeräusche
19	Lastabfall um ~23 kN; Abfall von Putz und Ziegelscherben über 2 Steinreihen in Wandmitte
21	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
23	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
30	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
41	Lastabfall um ~2 kN
42	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
47	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

E.8 A8-W07 UV-365mm-280kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (280 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

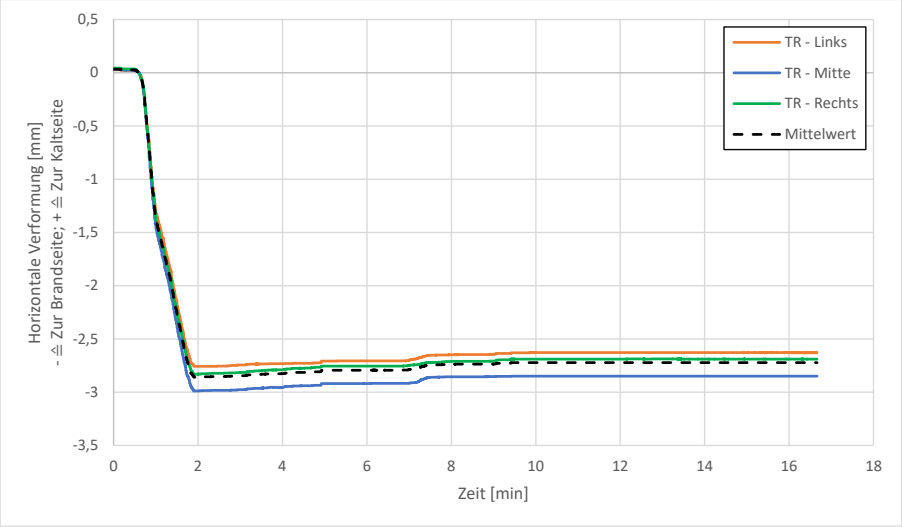


Abb. E.64: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A8-W07 UV-365mm-280kN

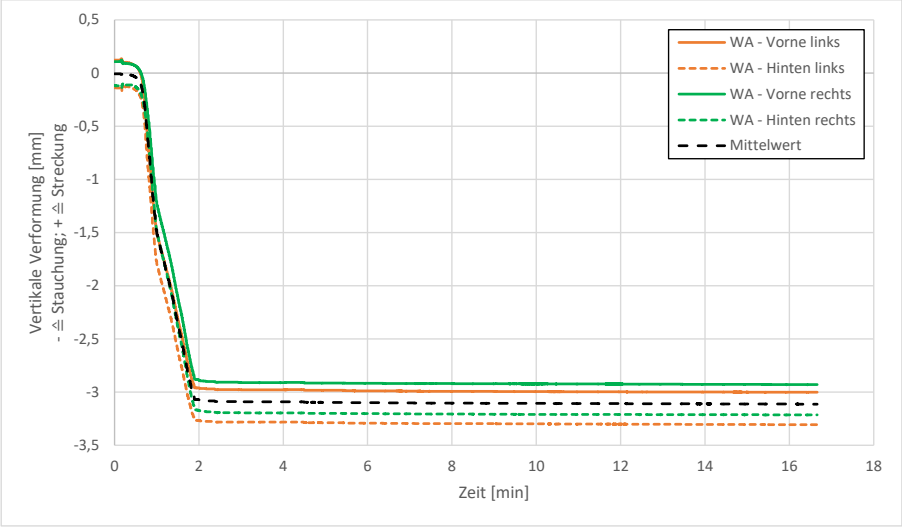


Abb. E.65: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A8-W07 UV-365mm-280kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

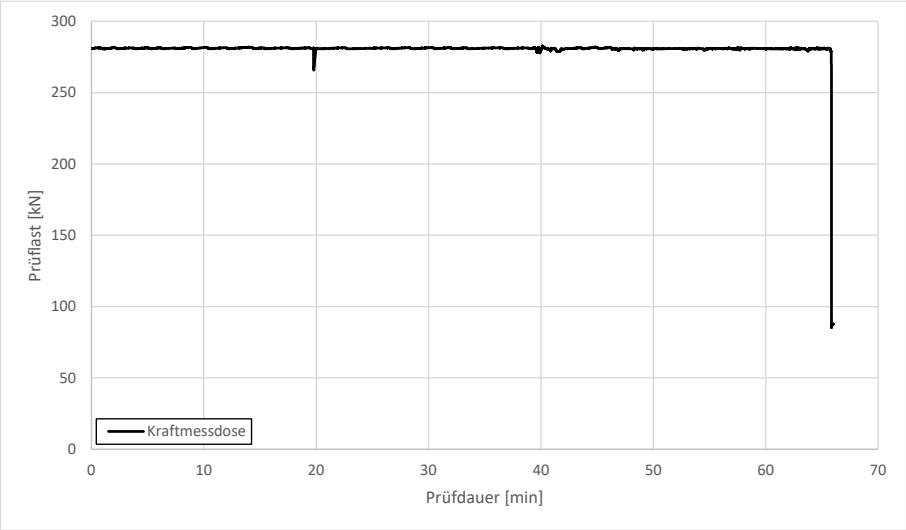


Abb. E.66: Prüflast über die Prüfdauer A8-W07 UV-365mm-280kN

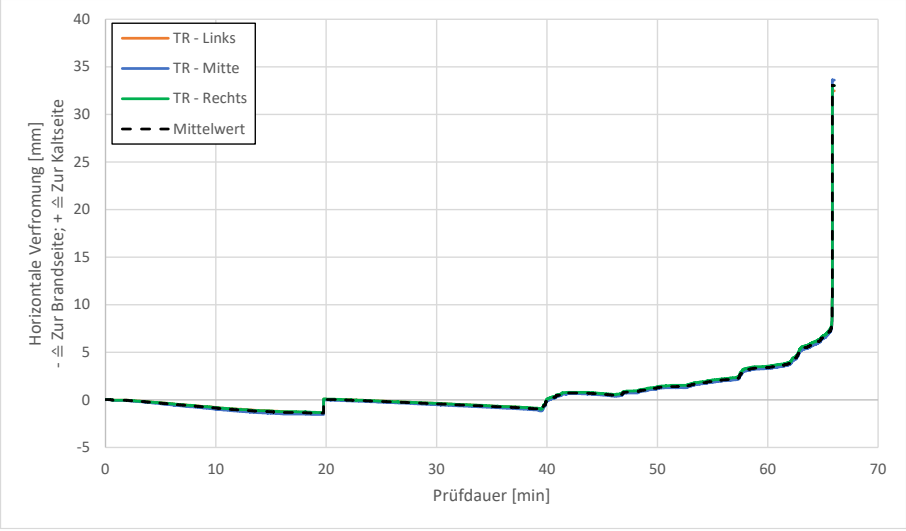


Abb. E.67: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

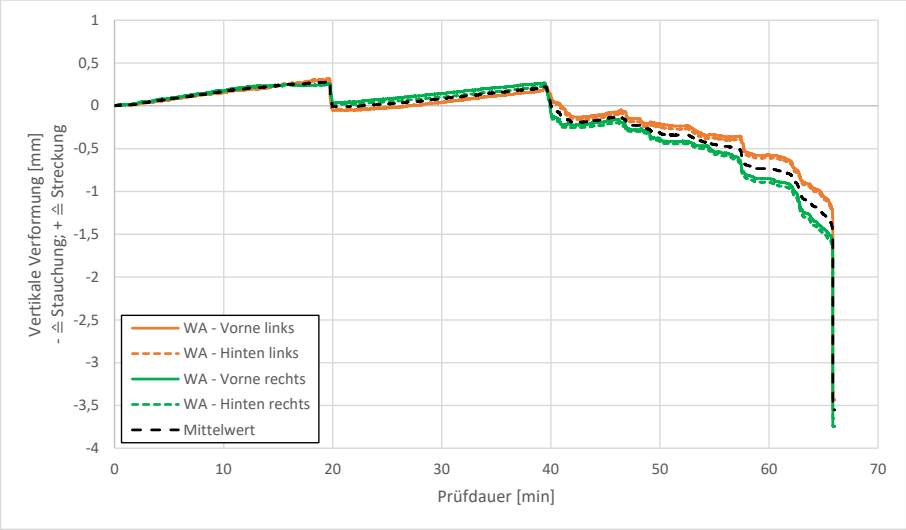


Abb. E.68: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

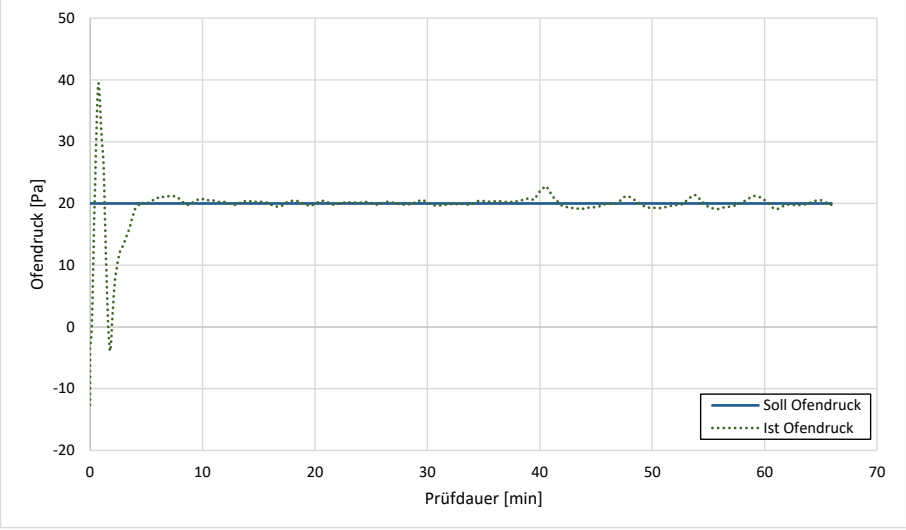


Abb. E.69: Ofendruck während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

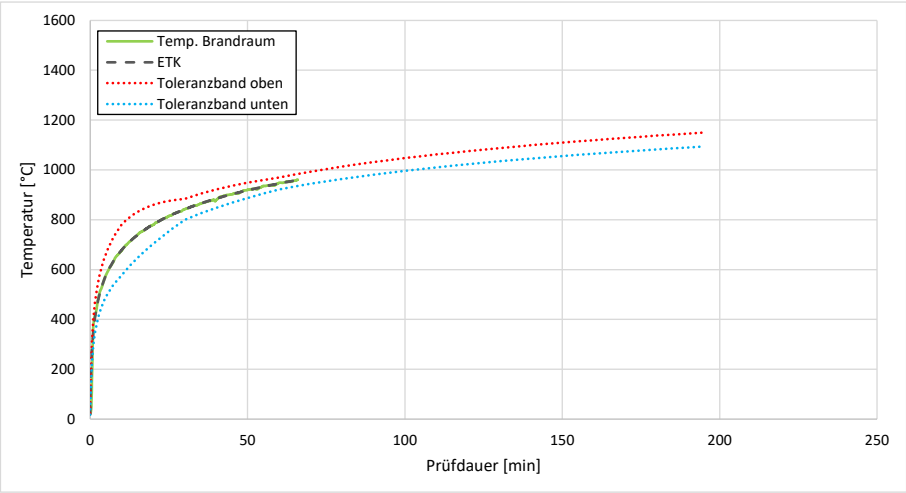


Abb. E.70: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

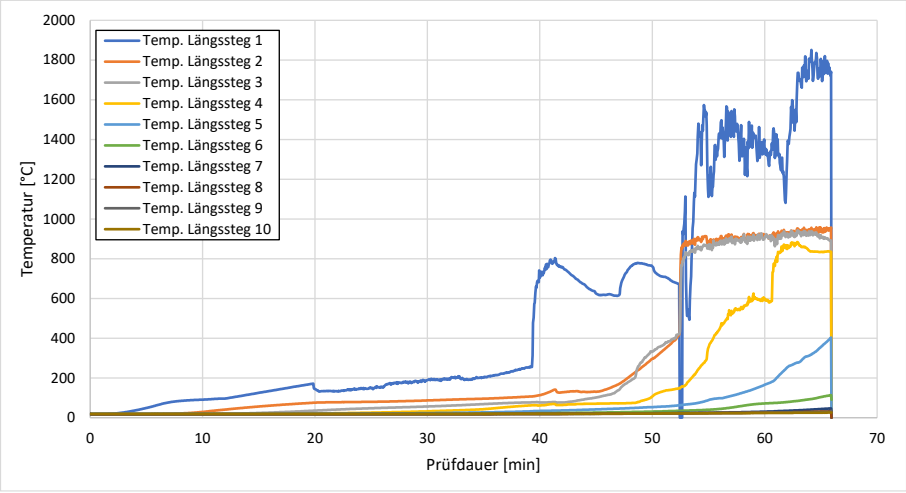


Abb. E.71: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

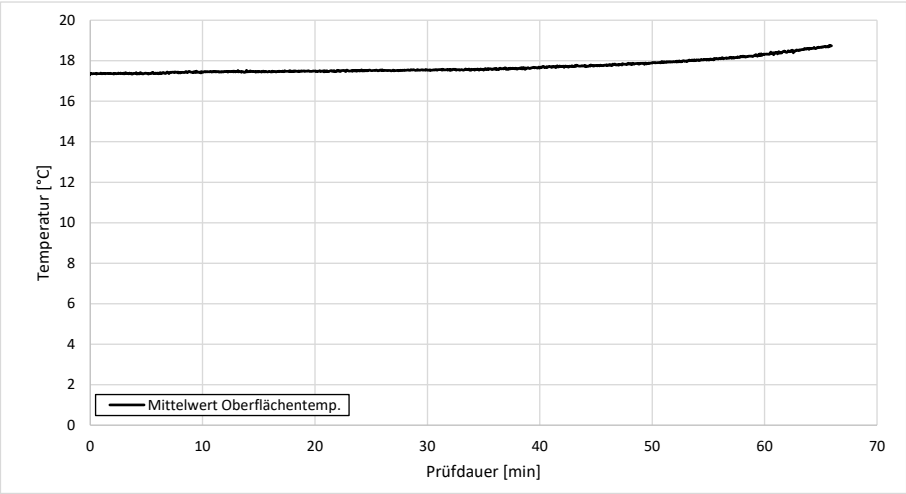


Abb. E.72: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A8-W07 UV-365mm-280kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	29.11.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 2	Startzeit:	07:53
Versuchsnr.:	12	Endzeit:	09:03

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (280 kN)
0	Beginn Brandversuch
12	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, vereinzelte Knackgeräusche
19	Lastabfall um ~15 kN, Riss im Putz im oberen Wandbereich
25	Abfall von Putzscherben im oberern Wandbereich
36	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
39	Gesamter Putz fällt ab, 600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, kleine Ziegelscherben fallen über gesamten Wandbereich ab
44	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im mittlerem Wandbereich, 100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
46	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im mittlerem Wandbereich
47	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im mittlerem Wandbereich
50	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
52	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im mittlerem Wandbereich, 600 °C beim 2. und 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
56	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
57	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im mittlerem Wandbereich
58	Abfall vereinzelte Ziegelscherben im oberen Wandbereich, 600 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
63	Abfall von weiteren Ziegelscherben über gesamten Wandbereich, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) in Wandmitte

E.9 A9-W07 UV-365mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

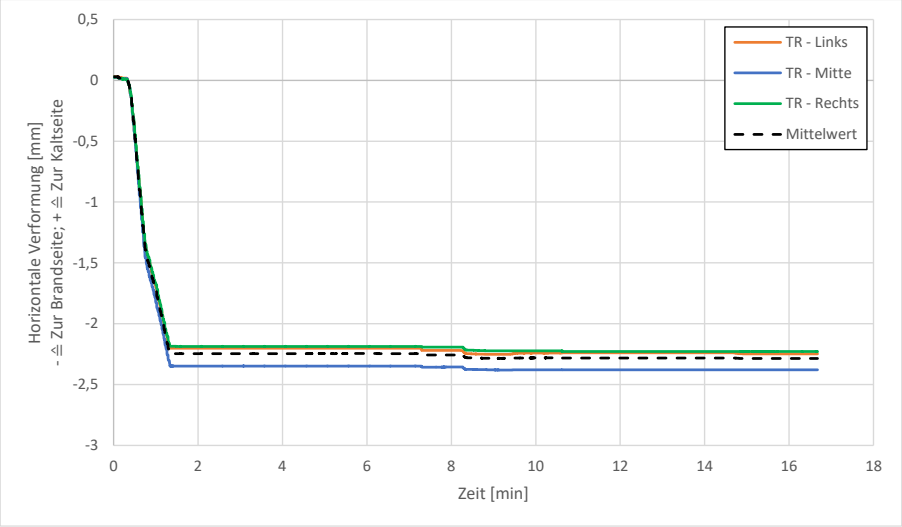


Abb. E.73: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A9-W07 UV-365mm-200kN

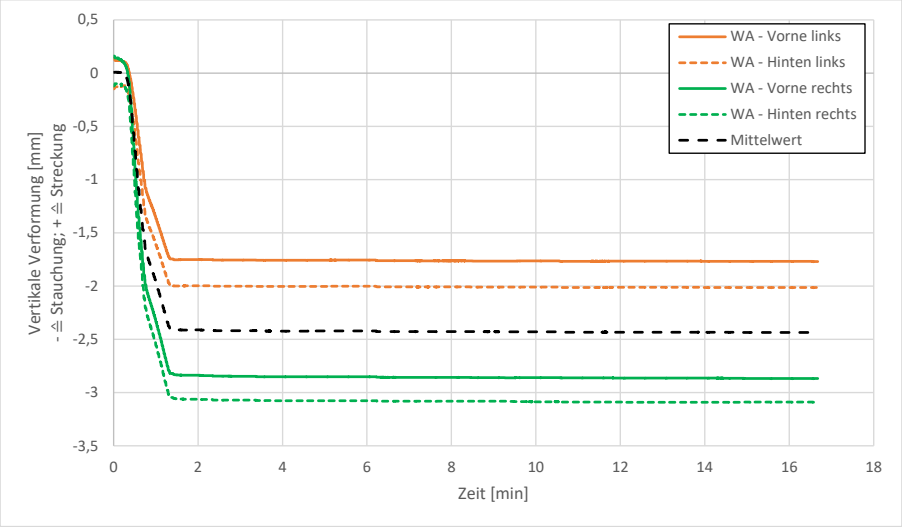


Abb. E.74: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A9-W07 UV-365mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

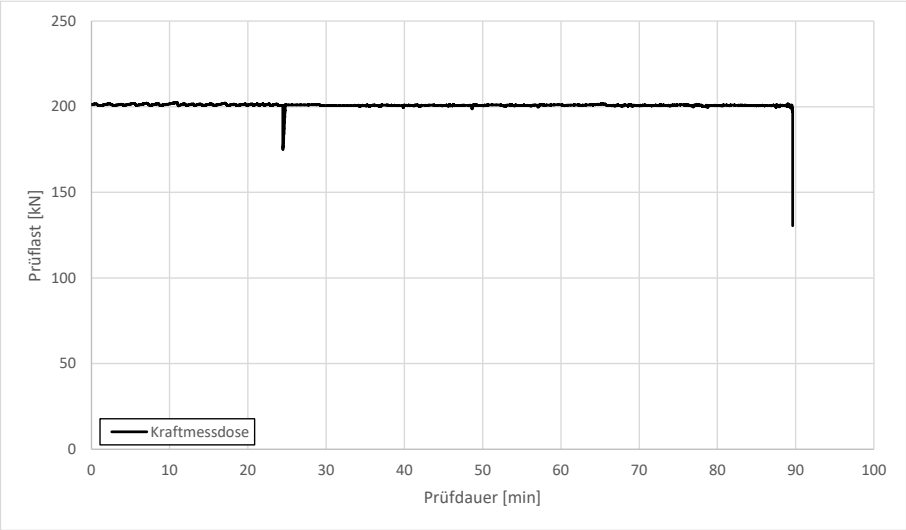


Abb. E.75: Prüflast über die Prüfdauer A9-W07 UV-365mm-200kN

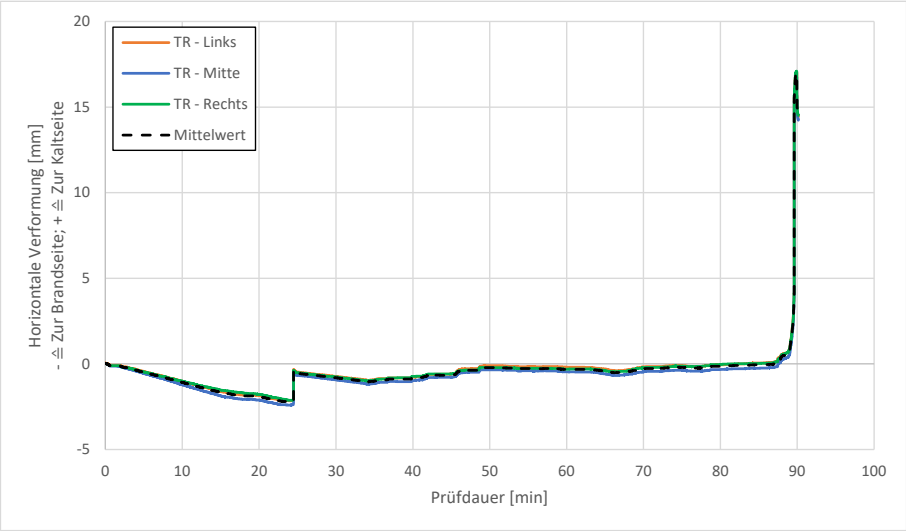


Abb. E.76: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

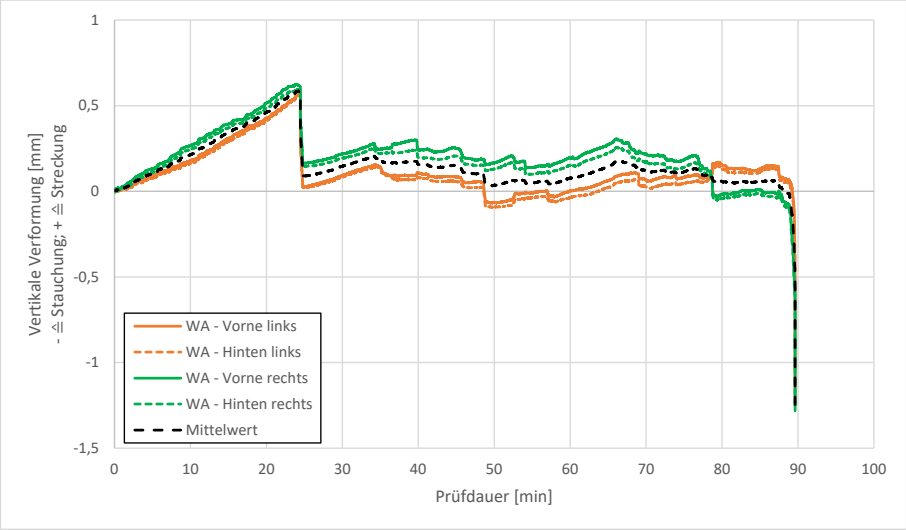


Abb. E.77: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

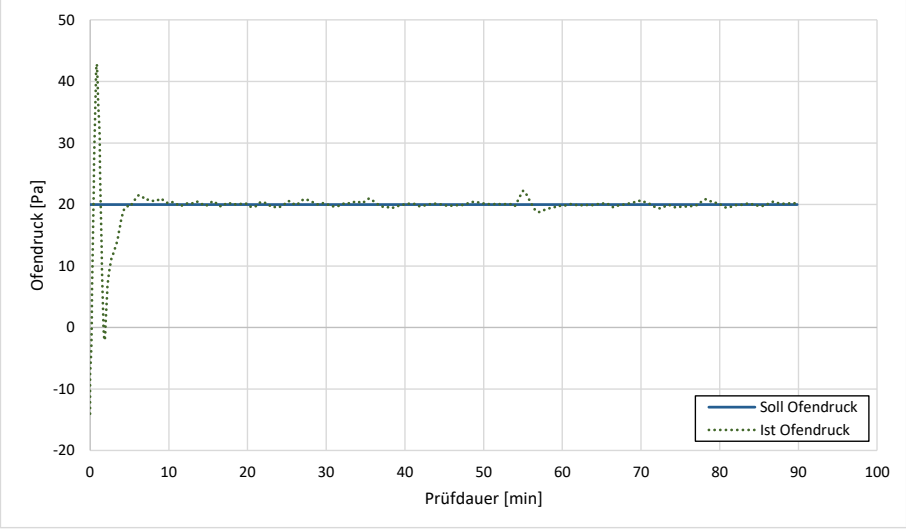


Abb. E.78: Ofendruck während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

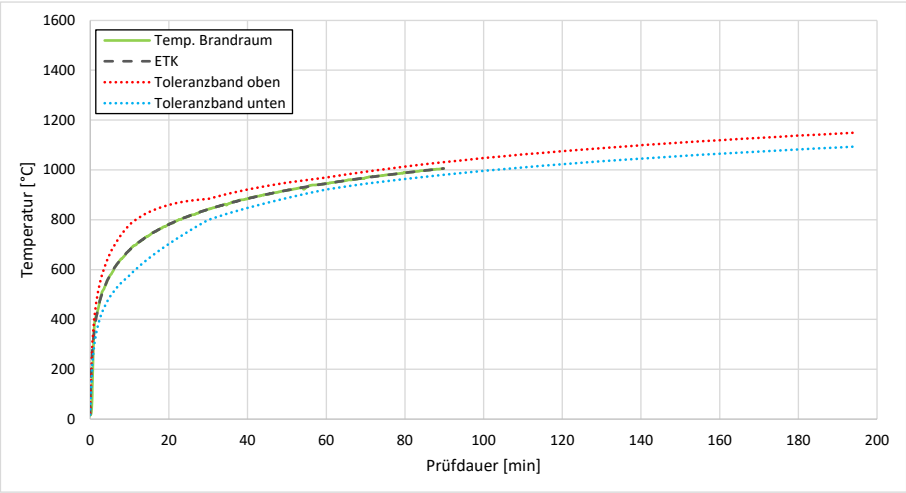


Abb. E.79: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

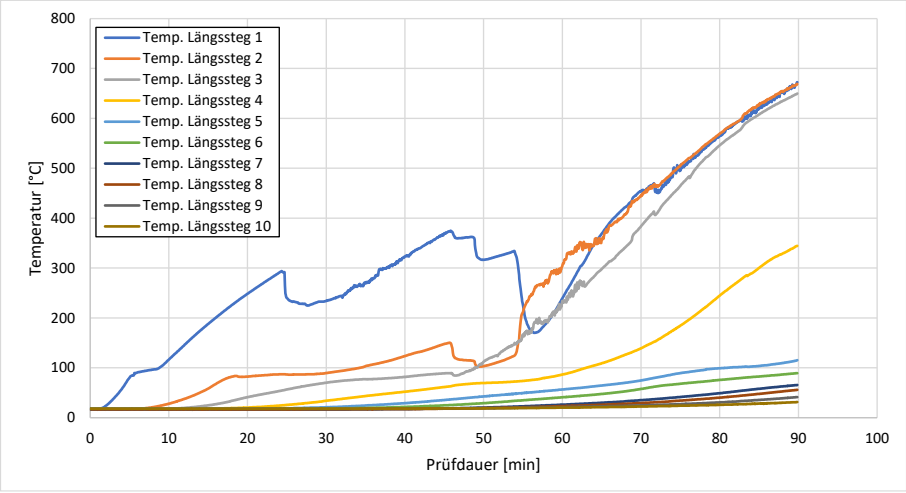


Abb. E.80: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

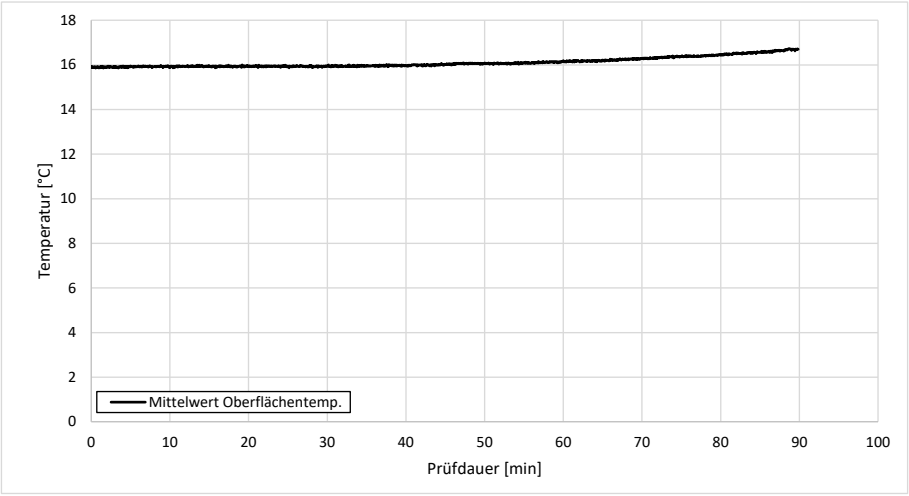


Abb. E.81: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A9-W07 UV-365mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	12.12.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 3	Startzeit:	07:31
Versuchsnr.:	13	Endzeit:	09:20

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
24	Lautes Knacken, Lastabfall um ~25 kN, Riss im Putz bei oberster Steinreihe, bis zum Lastabfall ständiges ablassen der ansteigenden Prüflast
34	Putzabfall und Abfall vereinzelte Ziegelscherben bei obersten Steinreihen, 100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
49	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
53	Abfall von Ziegelscherben und Putz bis auf untersten beiden Steinreihen
63	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
68	Ziegelabplatzungen im oberen Wanddrittel im mittleren Bereich, Prüflast beginnt immer mal wieder zu fallen
80	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Ziegelscherben im oberen Wandbereich abgefallen
82	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
83	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
84	600 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
87+88	Kleinere Lastabfälle ~2 kN
89	Große Ziegelscherben fallen ab, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Drittelpunkt

E.10 A10-W07 UV NG-365mm-375kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (375 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

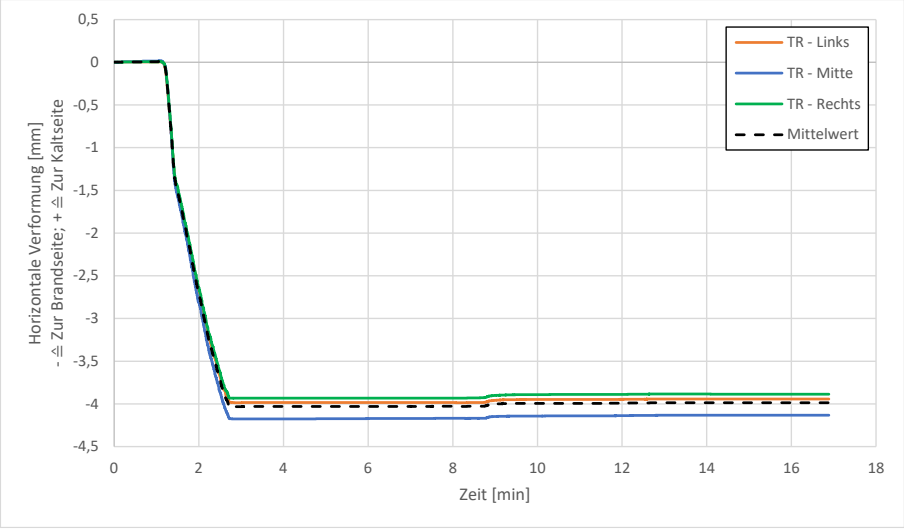


Abb. E.82: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A10-W07 UV NG-365mm-375kN

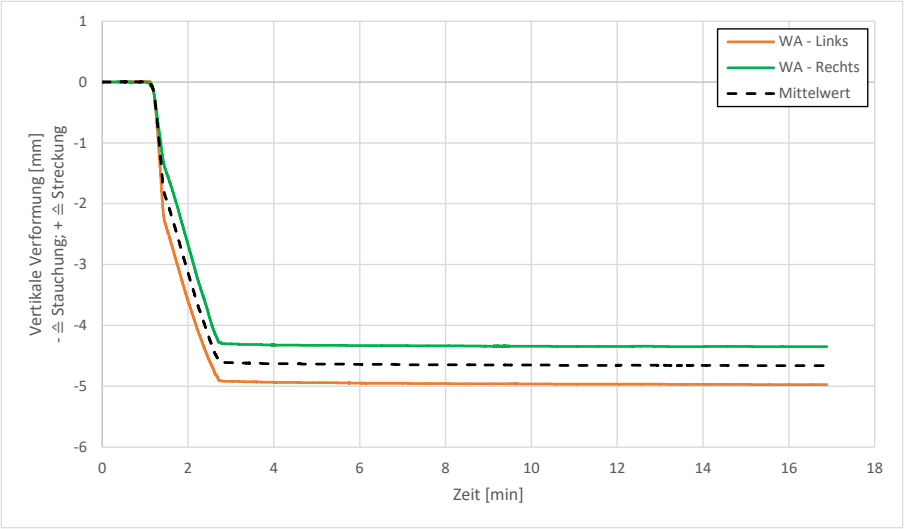


Abb. E.83: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A10-W07 UV NG-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. In der zweiten und vierten Prüfminute wurde per Hand zu viel Prüflast abgelassen.

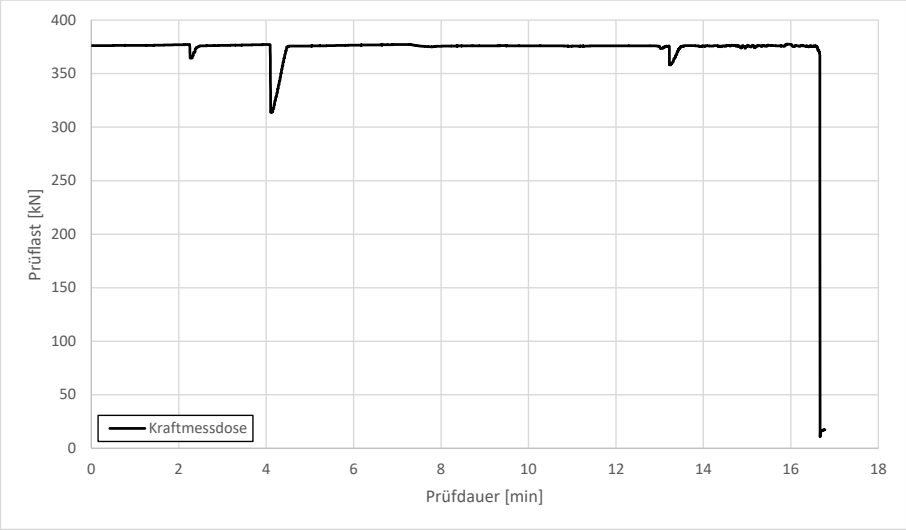


Abb. E.84: Prüflast über die Prüfdauer A10-W07 UV NG-365mm-375kN

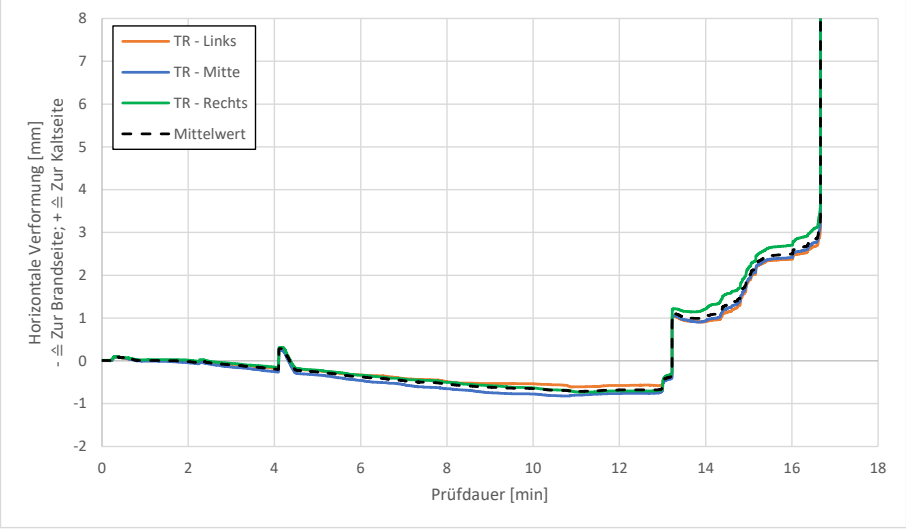


Abb. E.85: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

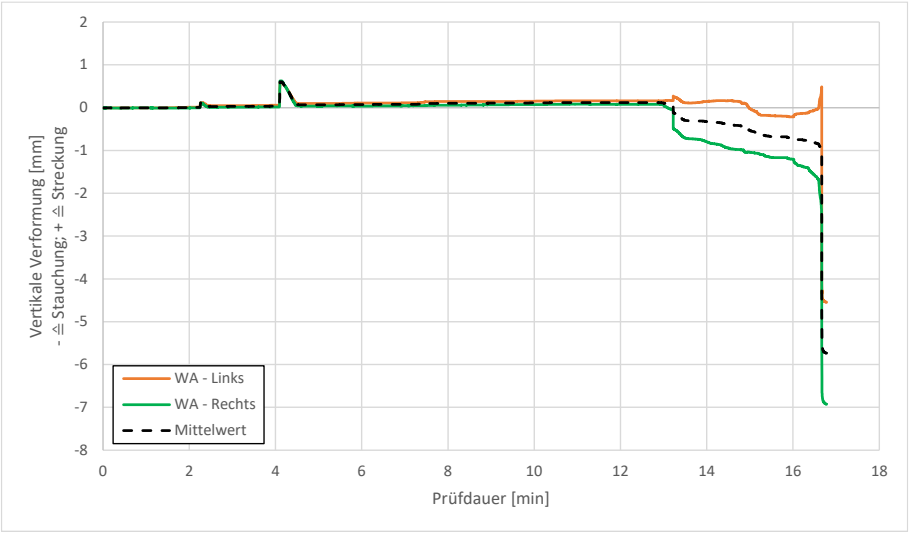


Abb. E.86: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

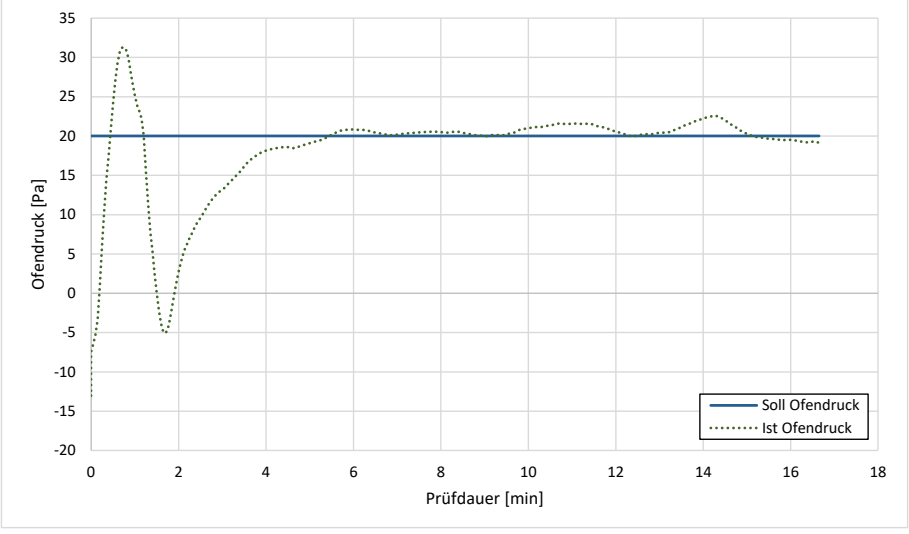


Abb. E.87: Ofendruck während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

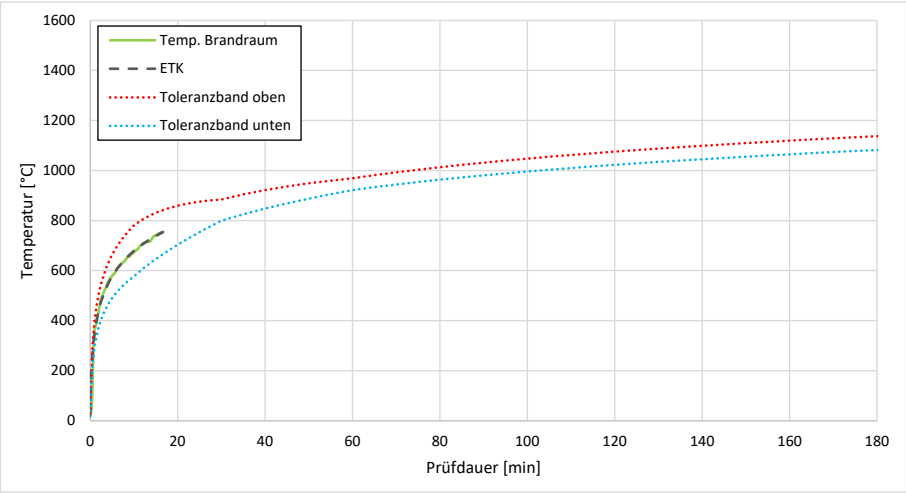


Abb. E.88: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

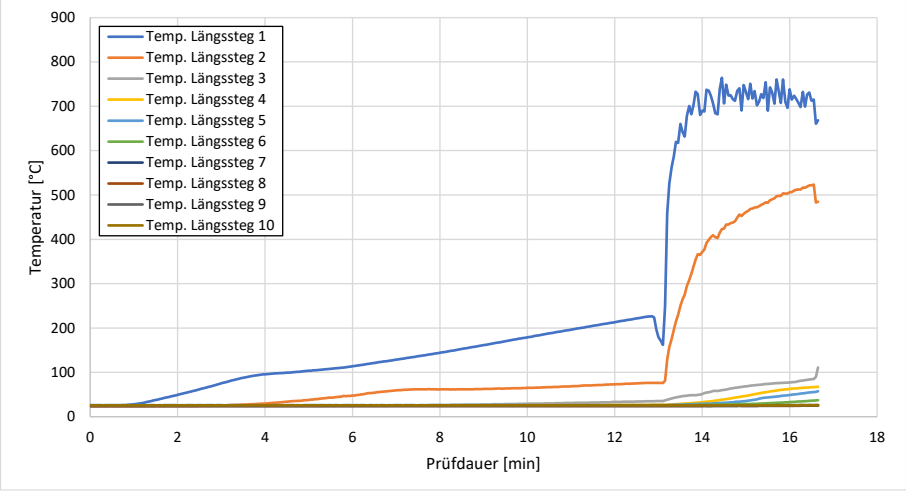


Abb. E.89: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

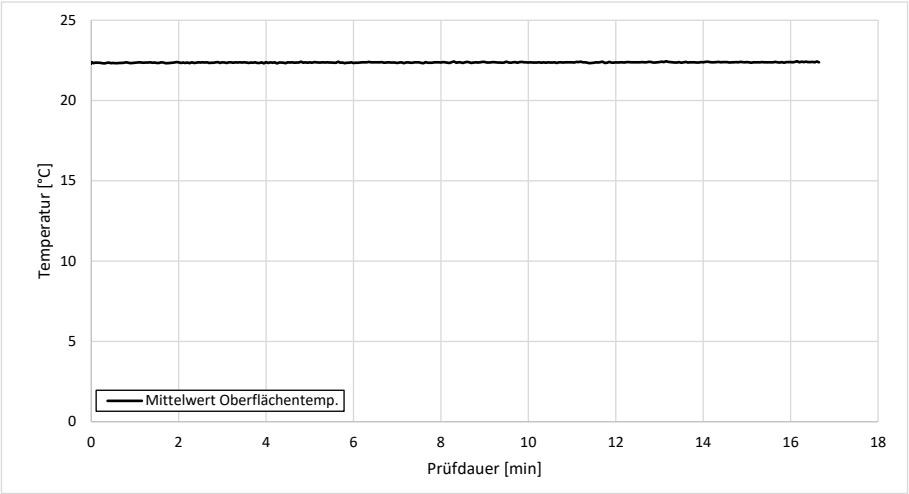


Abb. E.90: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A10-W07 UV NG-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	27.06.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 1 NG	Startzeit:	07:48
Versuchsnr.:	7	Endzeit:	08:05

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
2	Per Hand Prüflast ungewollt auf 364 kN abgelassen
4	Per Hand Prüflast ungewollt auf 313 kN abgelassen; 100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
8	Knackgeräusche sowie langsamer kontinuierlicher Lastabfall
13	Knackgeräusch und Lastabfall um ~17 kN sowie Putz- und Ziegelabplatzungen im mittlerem Wandbereich; 100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte sowie 600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
16	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

E.11 A11-W07 UV NG-365mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

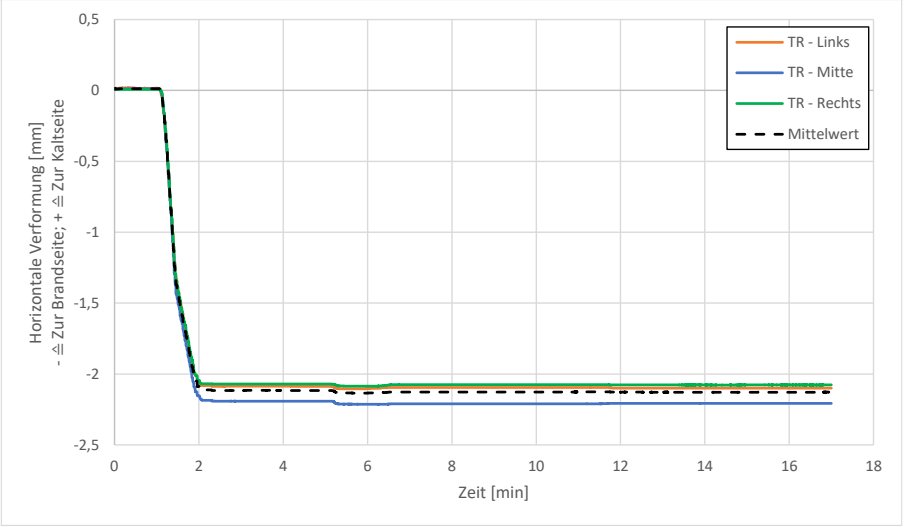


Abb. E.91: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A11-W07 UV NG-365mm-200kN

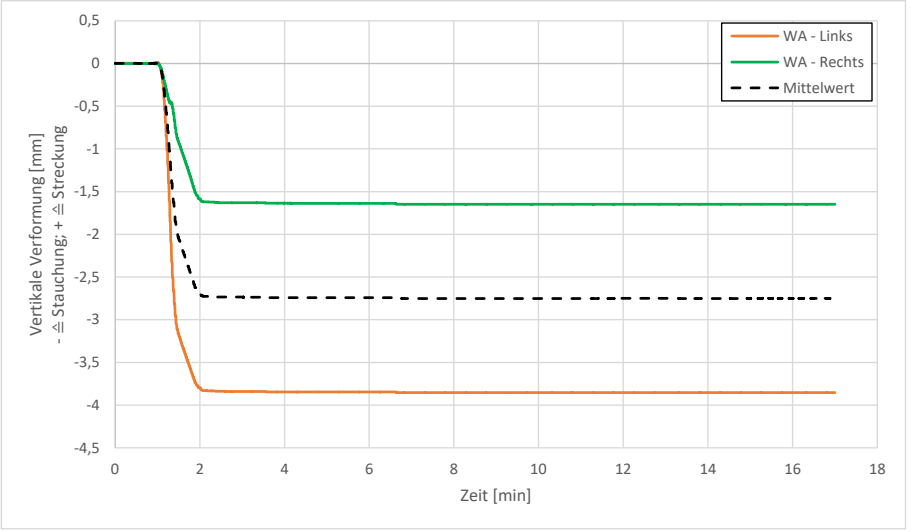


Abb. E.92: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A11-W07 UV NG-365mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

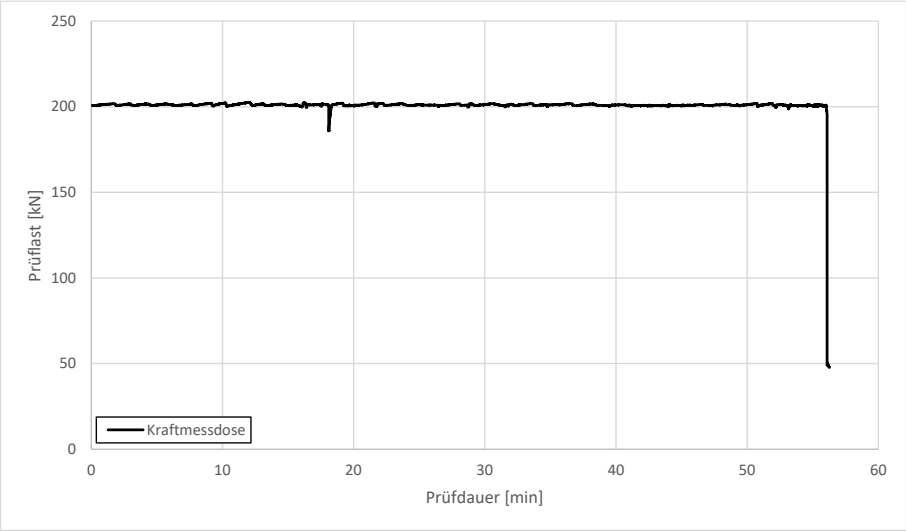


Abb. E.93: Prüflast über die Prüfdauer A11-W07 UV NG-365mm-200kN

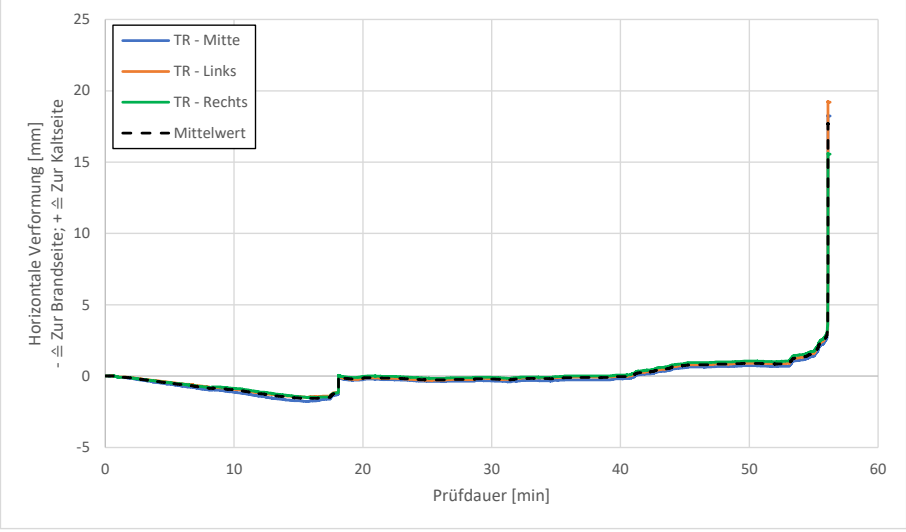


Abb. E.94: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

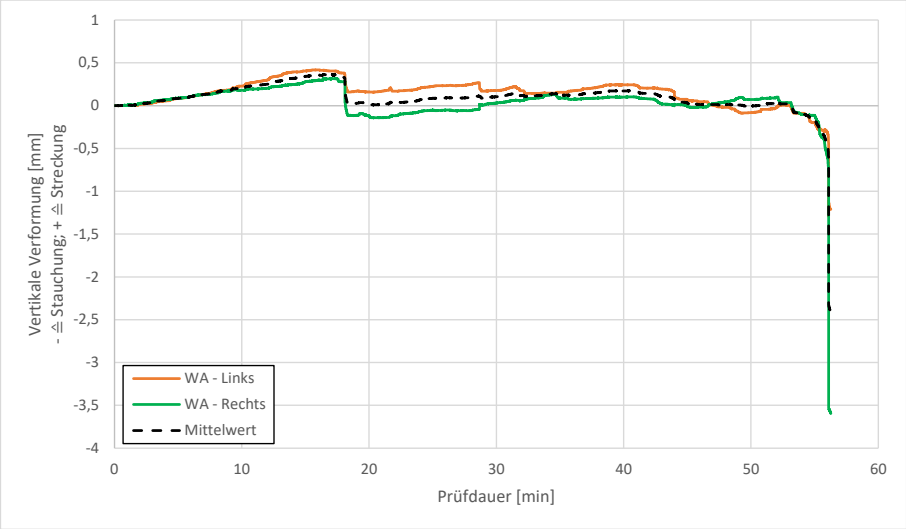


Abb. E.95: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

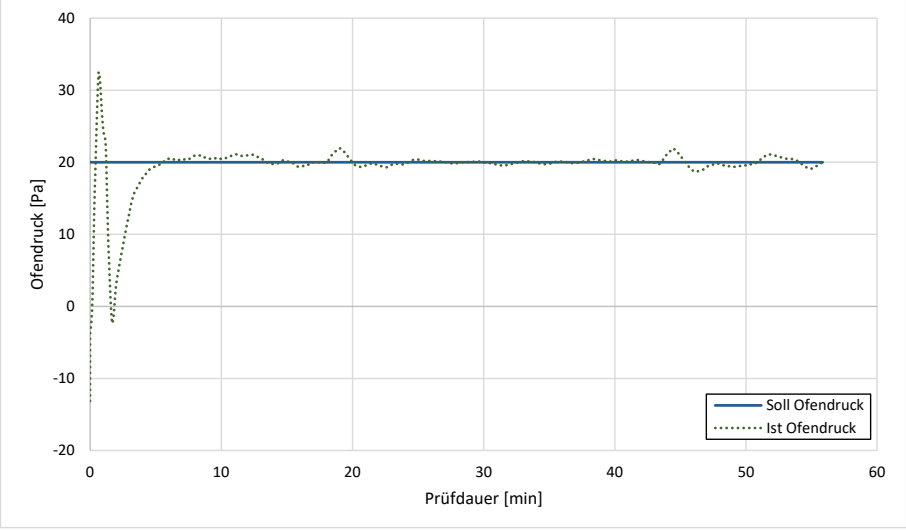


Abb. E.96: Ofendruck während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

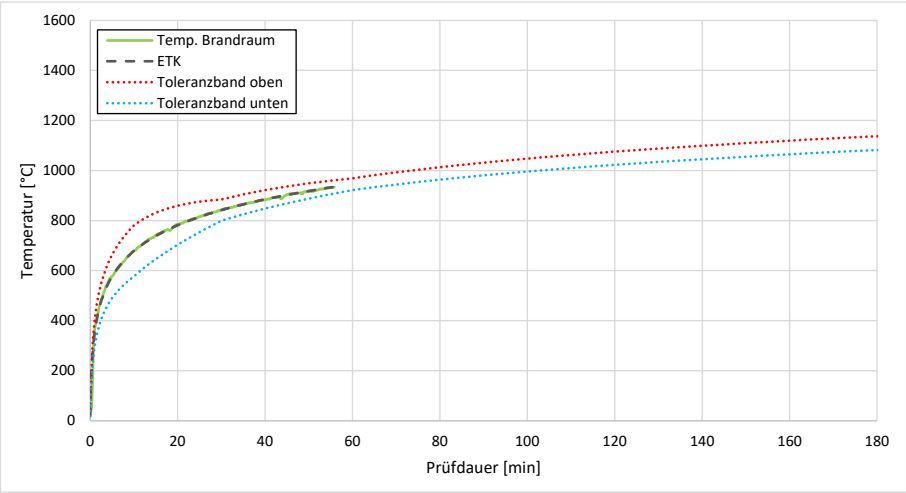


Abb. E.97: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

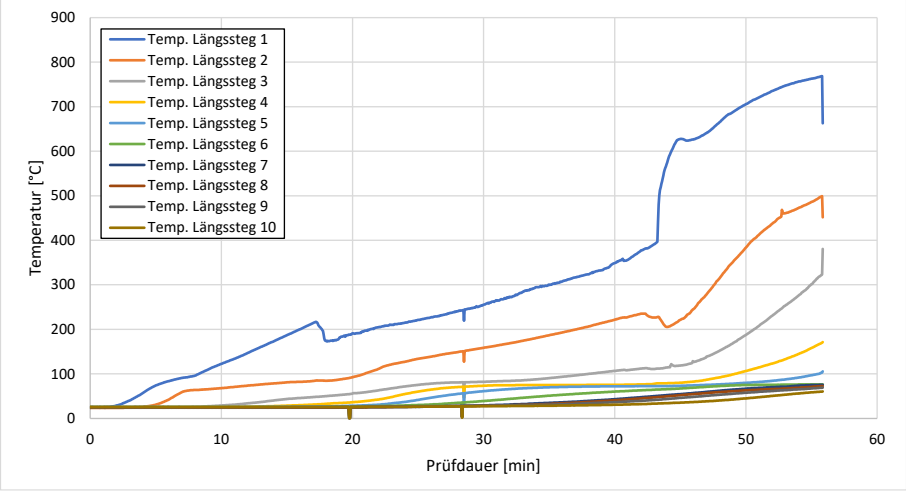


Abb. E.98: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

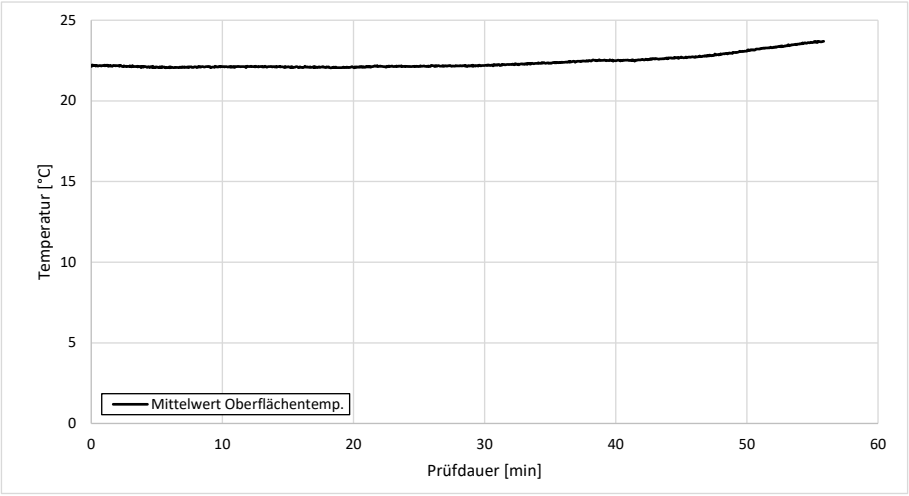


Abb. E.99: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A11-W07 UV NG-365mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	04.07.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 2 NG	Startzeit:	07:52
Versuchsnr.:	8	Endzeit:	08:48

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
18	Knackgeräusch und Lastabfall um ~14 kN sowie Putz- und Ziegelabplatzungen im oberen Wandbereich
21	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
38	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
39	Putz- und Ziegelabplatzungen im mittleren und oberen Wandbereich (eher rechte Seite)
41	Putz- und Ziegelabplatzungen im mittleren und oberen Wandbereich (eher linke Seite)
43	Putz- und Ziegelabplatzungen im mittleren und unteren Wandbereich
44	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
49	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
53 bis 56	Kontinuierlicher Lastabfall
55	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
56	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

E.12 A12-W07 UV NG-365mm-135kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (135 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

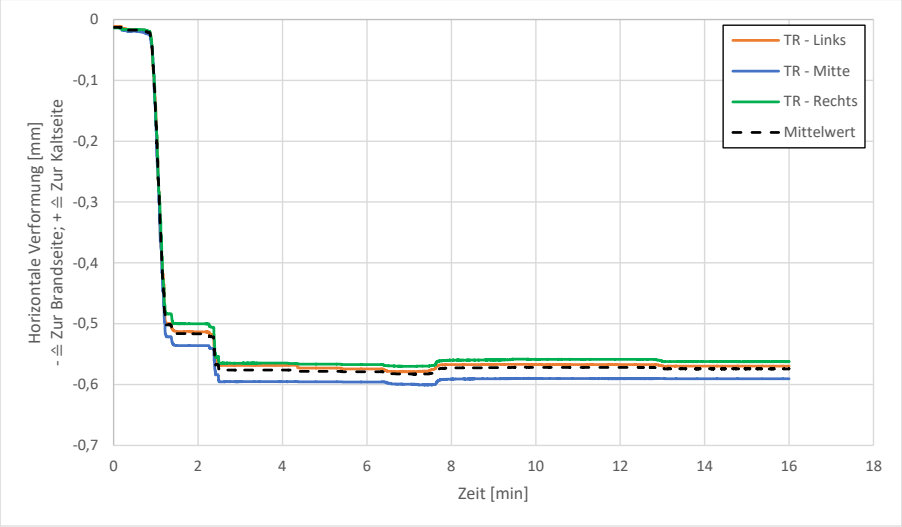


Abb. E.100: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A12-W07 UV NG-365mm-135kN

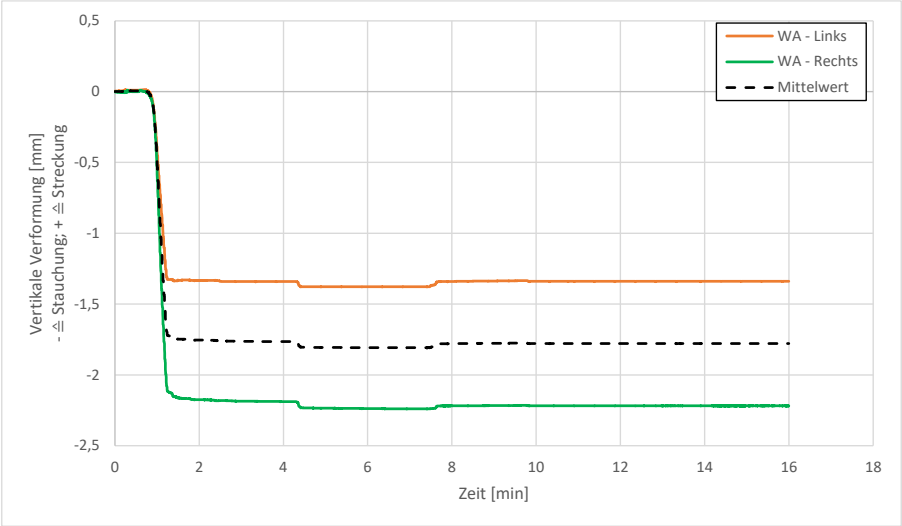


Abb. E.101: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer A12-W07 UV NG-365mm-135kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

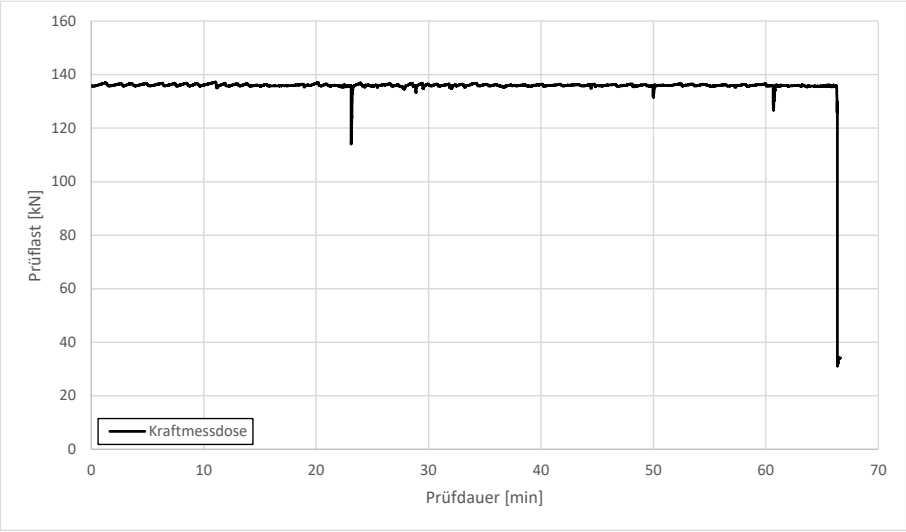


Abb. E.102: Prüflast über die Prüfdauer A12-W07 UV NG-365mm-135kN

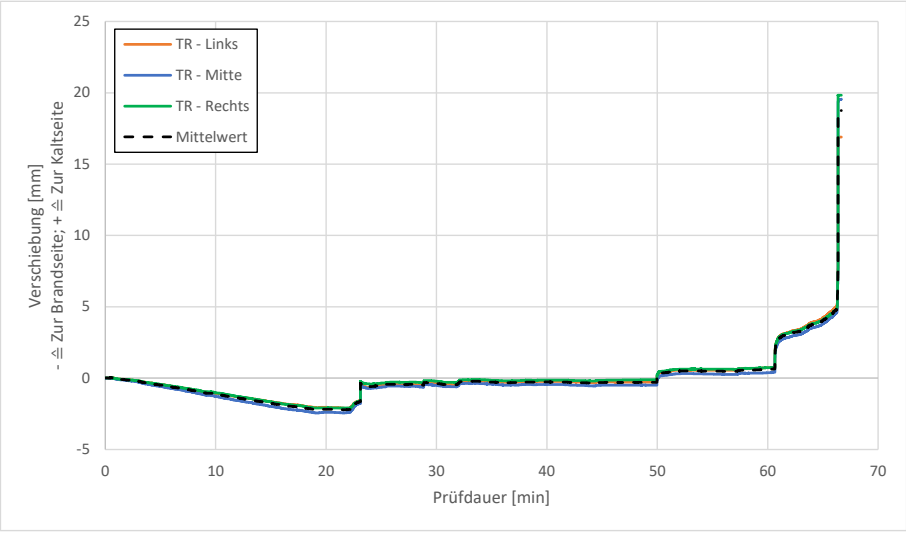


Abb. E.103: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

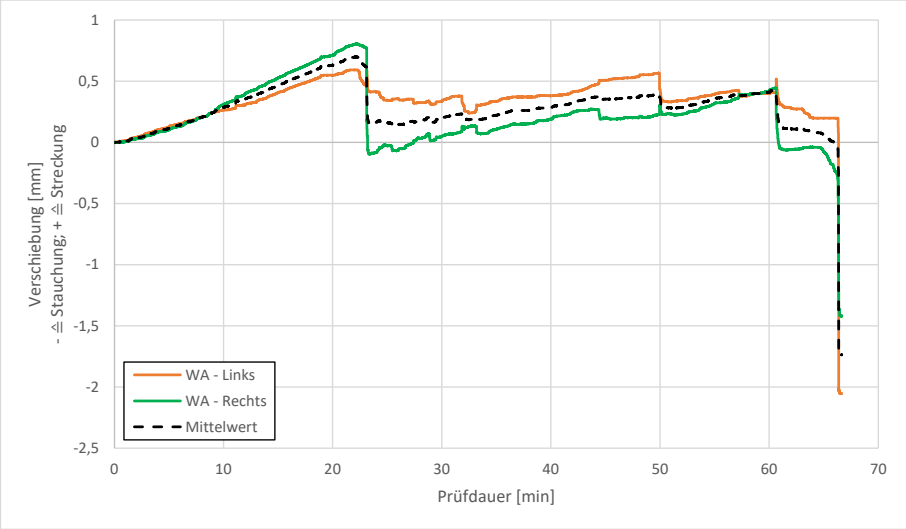


Abb. E.104: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

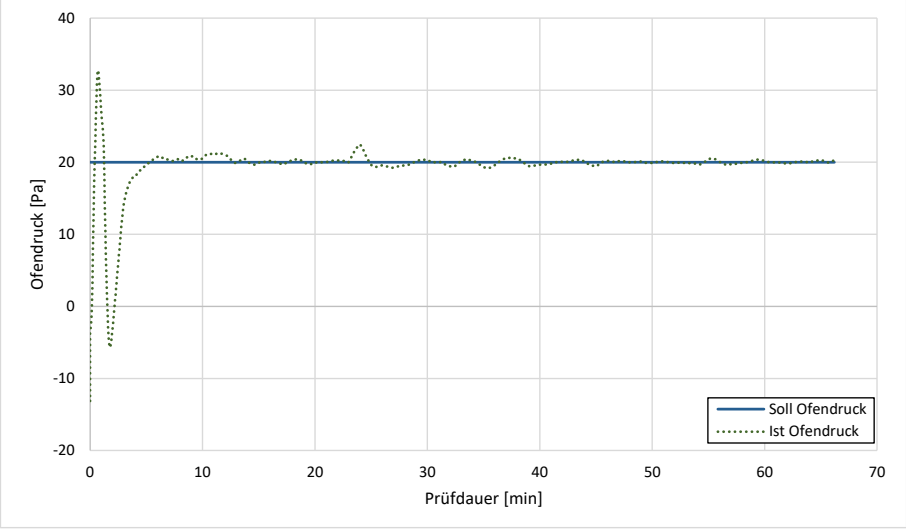


Abb. E.105: Ofendruck während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

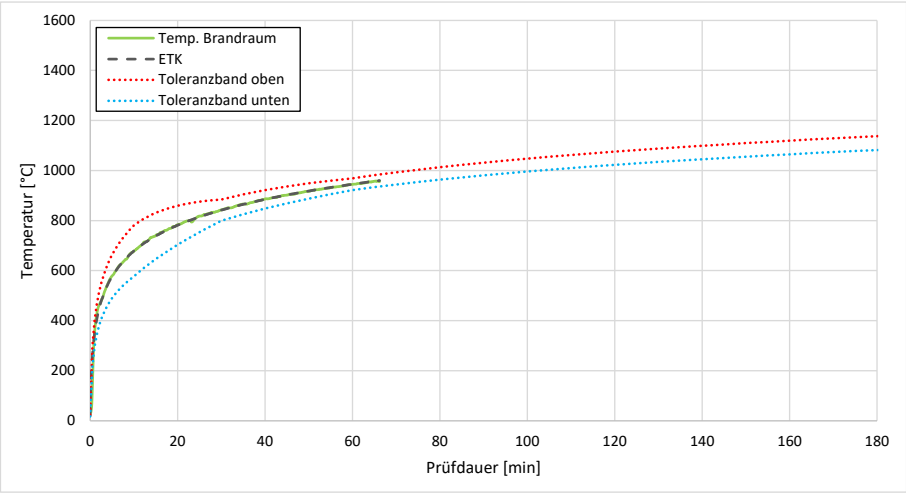


Abb. E.106: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

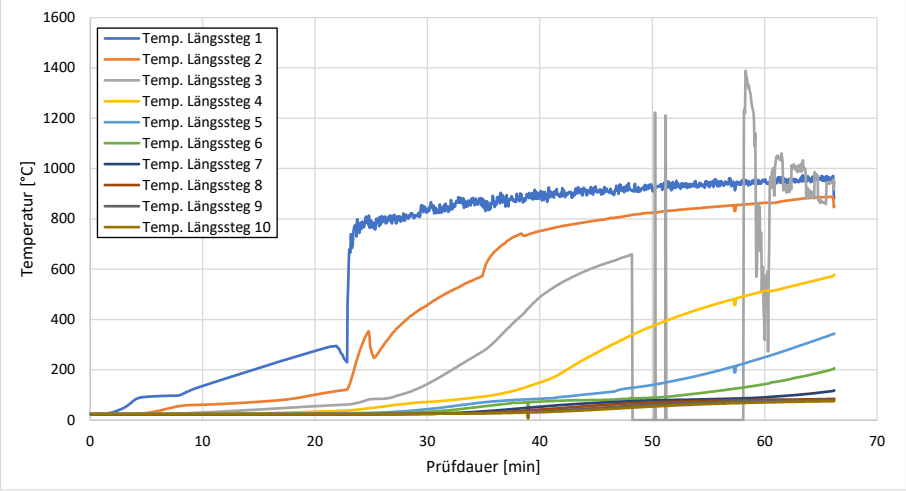


Abb. E.107: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

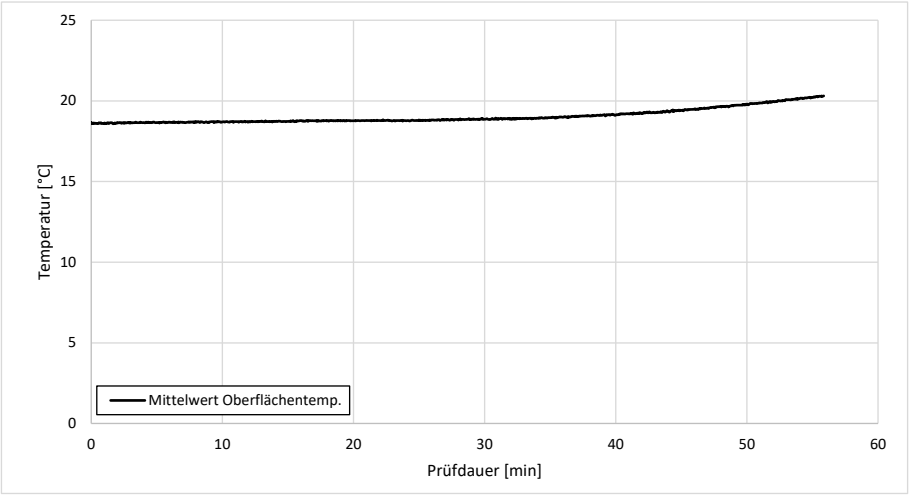


Abb. E.108: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes A12-W07 UV NG-365mm-135kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	08.07.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 3 NG	Startzeit:	07:46
Versuchsnr.:	9	Endzeit:	08:52

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (135 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
20	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
23	Knackgeräusch und Lastabfall um ~21 kN sowie Putz- und Ziegelabplatzungen in Wandmitte; 600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
27	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
35	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
36	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
43	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
44	600 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
49	Lastabfall um ~5 kN
52	100 °C beim 6. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
60	Lastabfall um ~10 kN und Ziegelabplatzungen in Wandmitte
63	100 °C beim 7. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
66	Putz und Ziegelscherben fallen ab, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) oberhalb der Wandmitte

Anlage F Messdaten der Versuchsserie B

Es folgen Informationen und Messdaten zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen an der RPTU mit den Prüfkörpergeometrien 3,0 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge mit einer Nennmaßdicke von ungleich 0,365 m. Die Messstellen für die Verformungs- und Temperaturmessungen sind Anlage A zu entnehmen. Aufgrund der geringeren Wandschlankheit λ wurden bei dieser Prüfserie weniger Thermoelemente im Wandinneren verbaut. Ausgehend von den Überlegungen des Kapitels 6.4 wurde jeweils in den Protokollen vermerkt, wann ein Längssteg 100 °C und 600 °C aufweist.

F.1 B1-MZ70-190mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben. Bei den vertikalen Wegaufnehmern erfolgte eine kurze Nachjustiert per Hand kurz nach der zweiten Prüfminute.

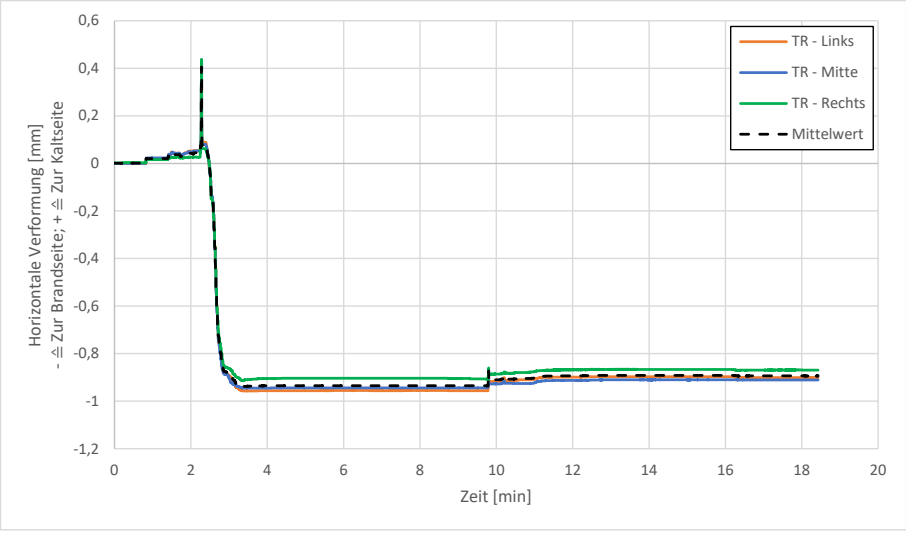


Abb. F. 1: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B1-MZ70-190mm-200kN

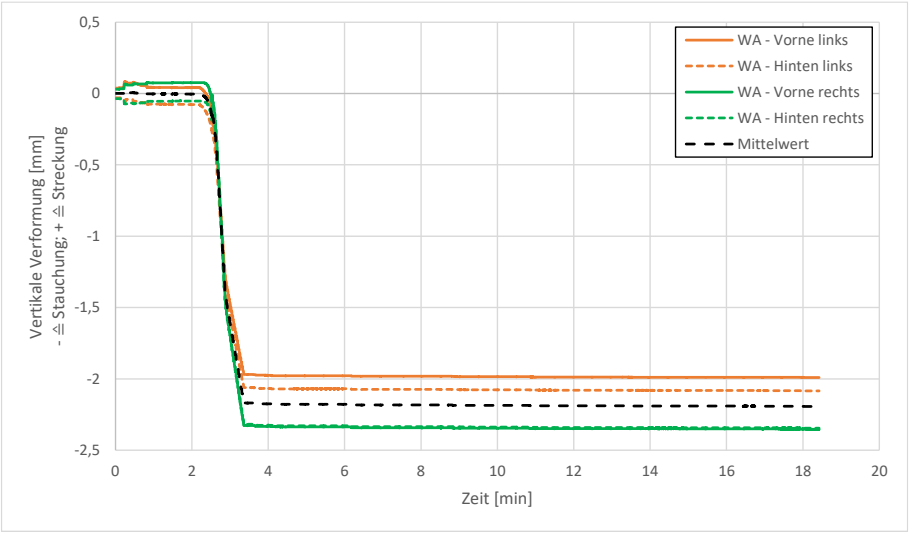


Abb. F. 2: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B1-MZ70-190mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

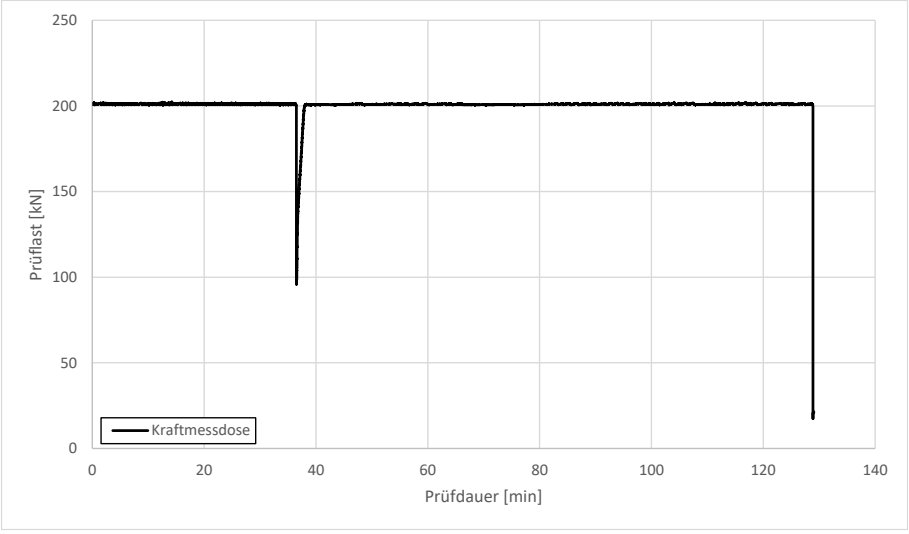


Abb. F. 3: Prüflast über die Prüfdauer B1-MZ70-190mm-200kN

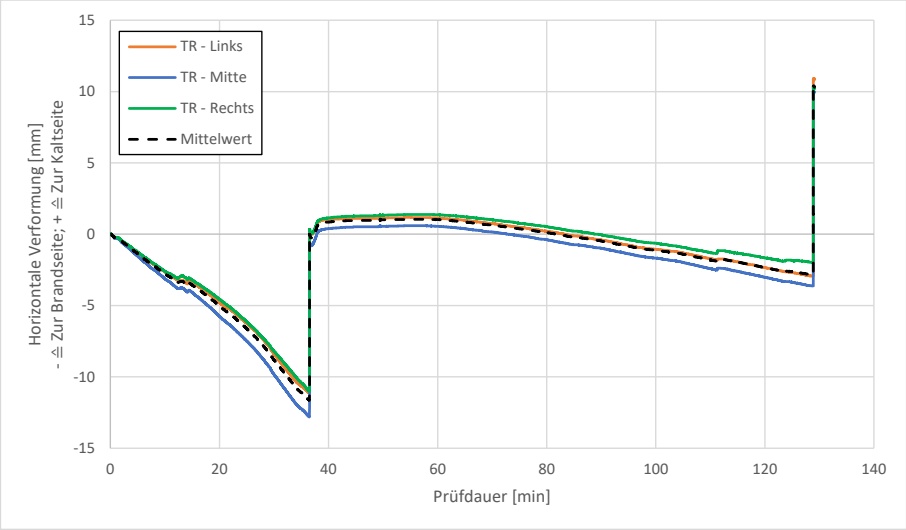


Abb. F. 4: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

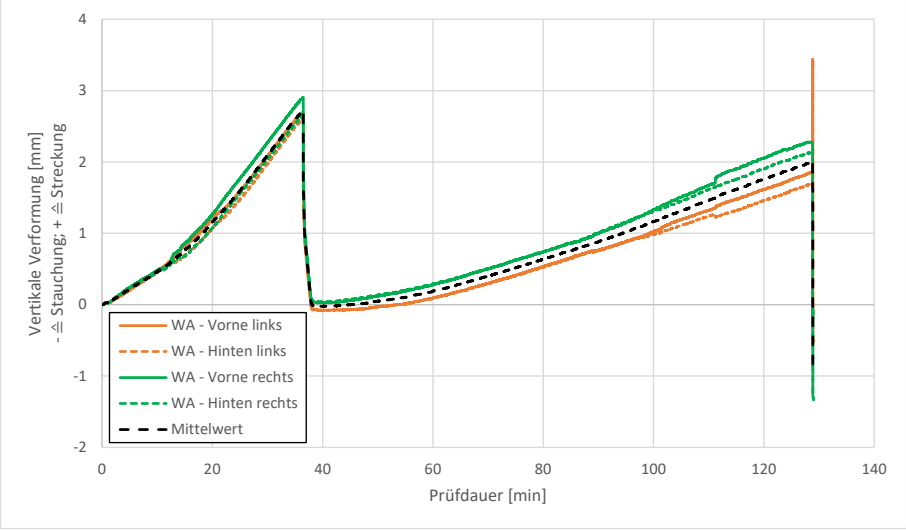


Abb. F. 5: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

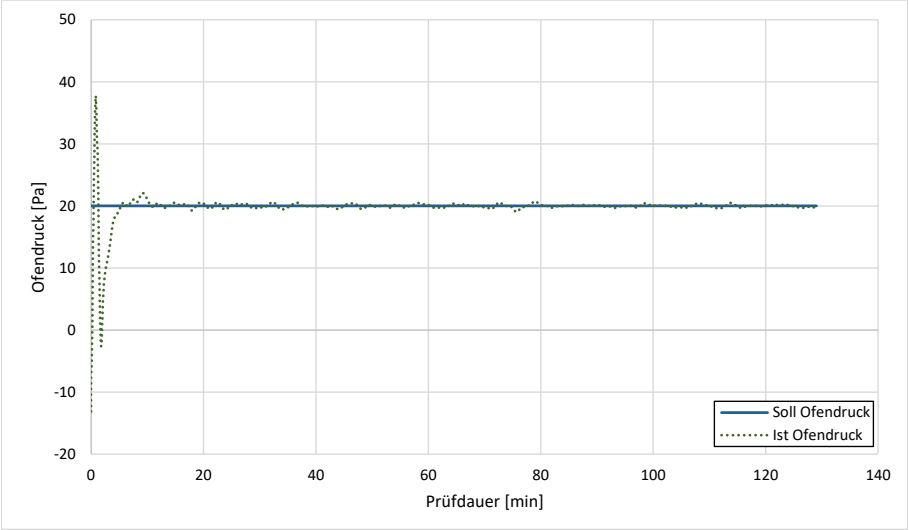


Abb. F. 6: Ofendruck während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

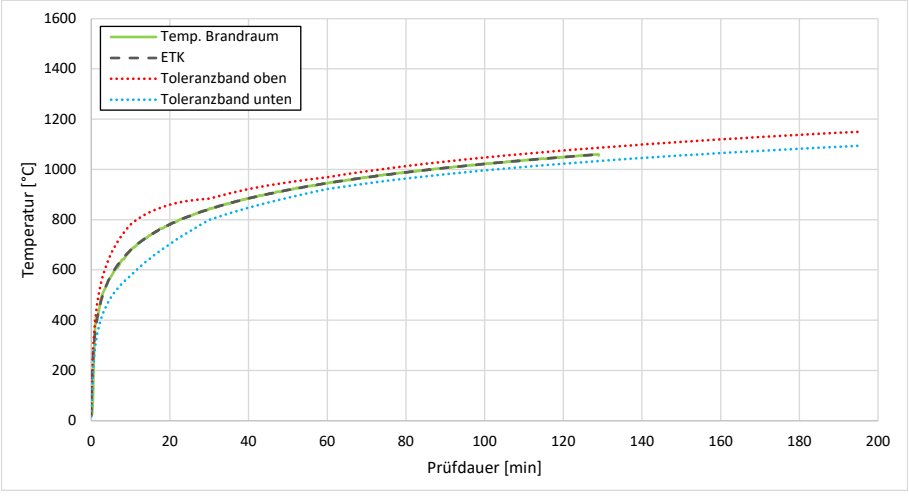


Abb. F. 7: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

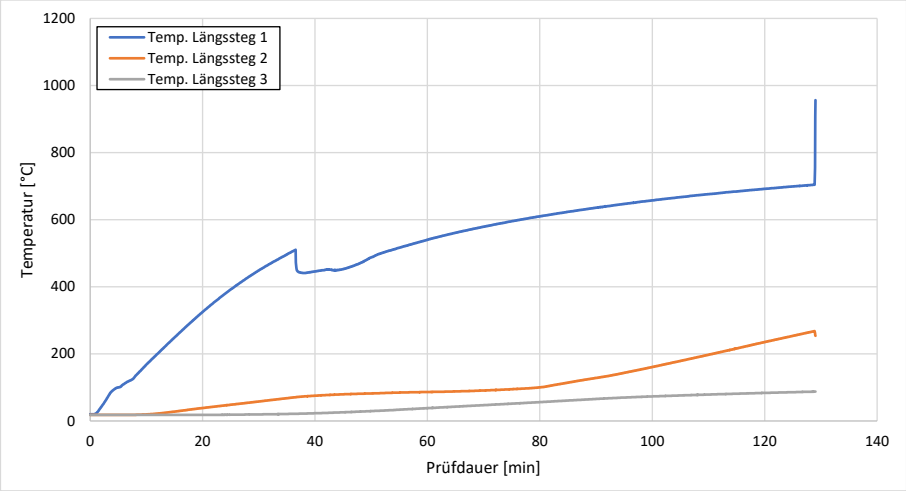


Abb. F. 8: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

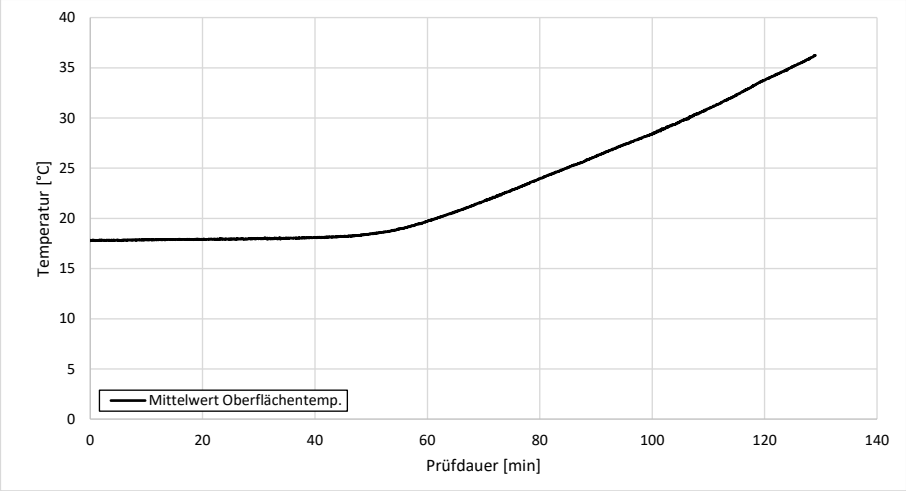


Abb. F. 9: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B1-MZ70-190mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,190 m	Datum:	13.01.2023
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 1	Startzeit:	07:57
Versuchsnr.:	16	Endzeit:	10:06

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
1	Last steigt sehr schnell an, ständiges ablassen der Prüflast
5	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, horizontaler Riss im Putz auf Brandseite in Wandmitte
35	Wand auf Außeseite unten von Stahlträger abgelöst
36	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~105 kN
40	Vertikaler Riss im Putz auf Außenseite in Wandmitte zum oberen Wanddrittel verlaufend
76	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
80	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
112	Verästelnder Riss im Putz in Wandmitte auf Brandseite
123	Vertikaler Riss im Putz auf Außenseite in Wandmitte zum unteren Wanddrittel verlaufend
129	Abfall von Putz und Ziegelscherben, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

F.2 B2-MZ70-190mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

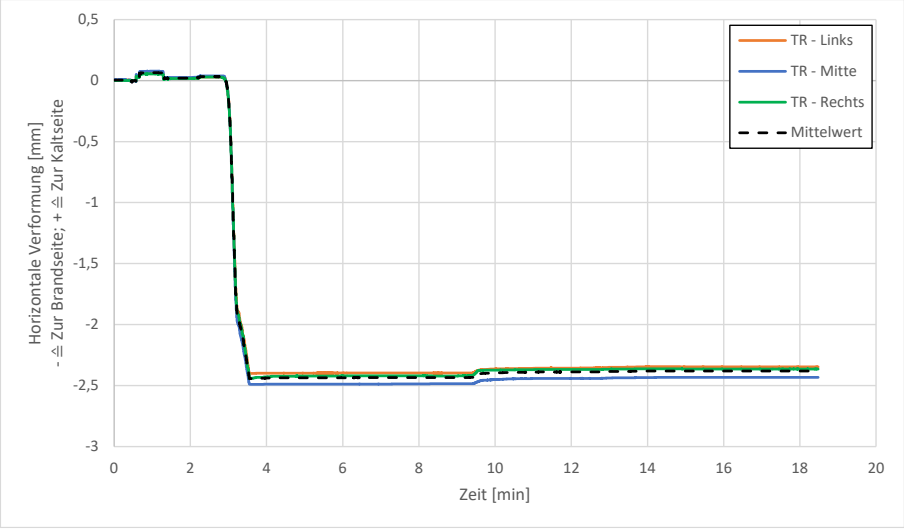


Abb. F. 10: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B2-MZ70-190mm-200kN

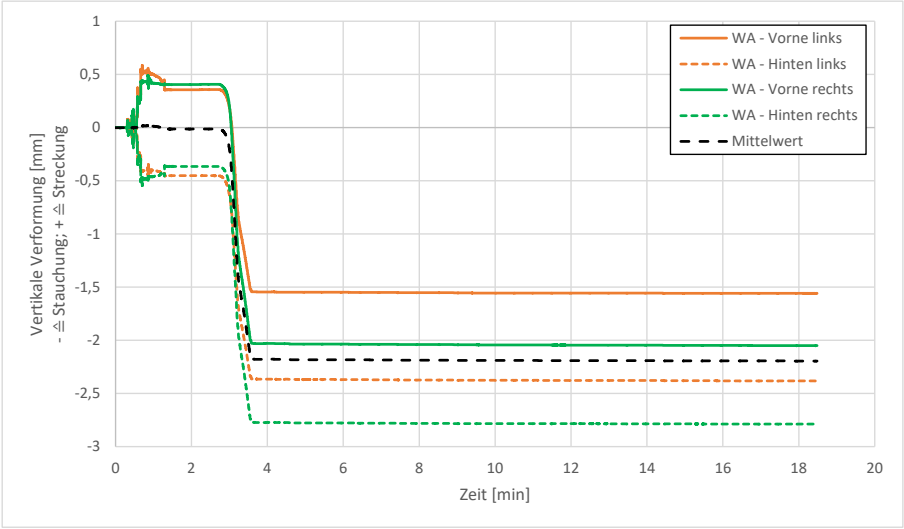


Abb. F. 11: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B2-MZ70-190mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

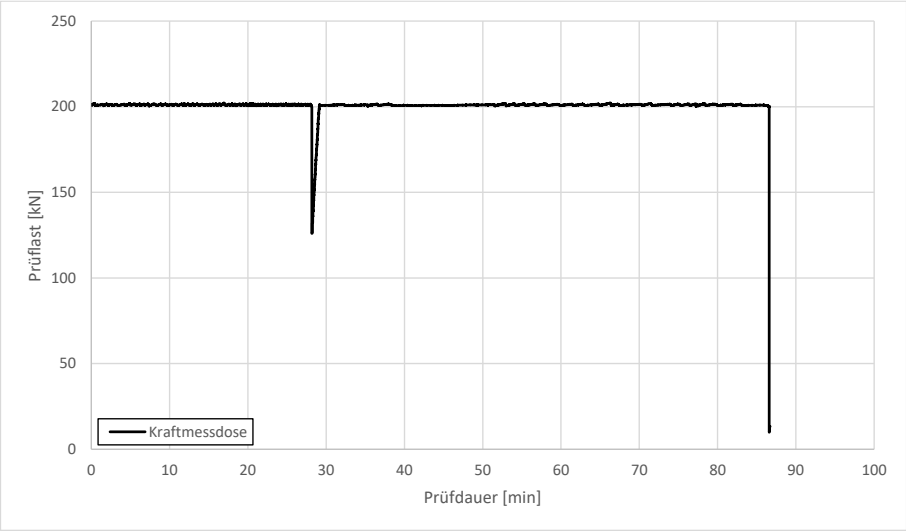


Abb. F. 12: Prüflast über die Prüfdauer B2-MZ70-190mm-200kN

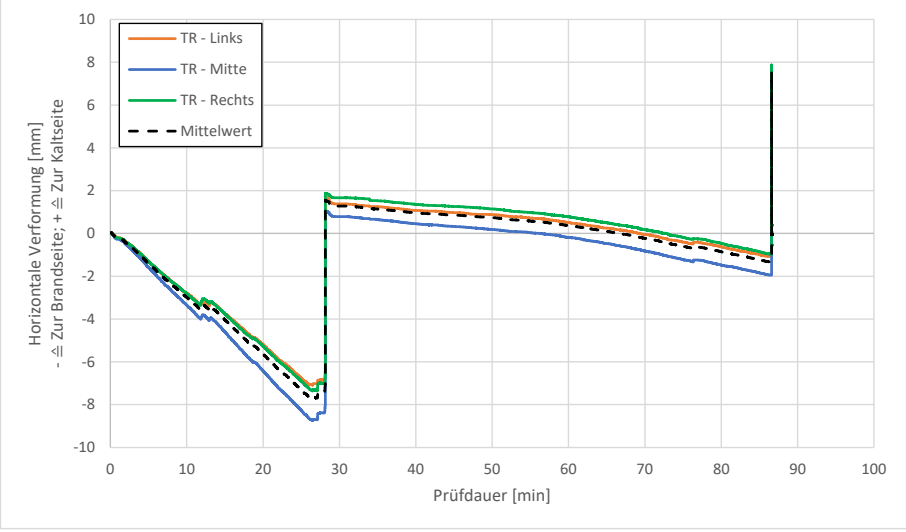


Abb. F. 13: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

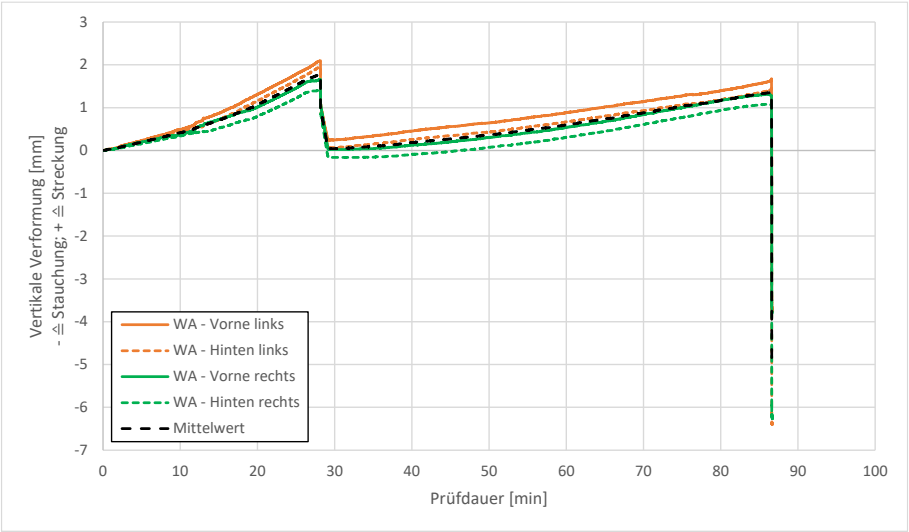


Abb. F. 14: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

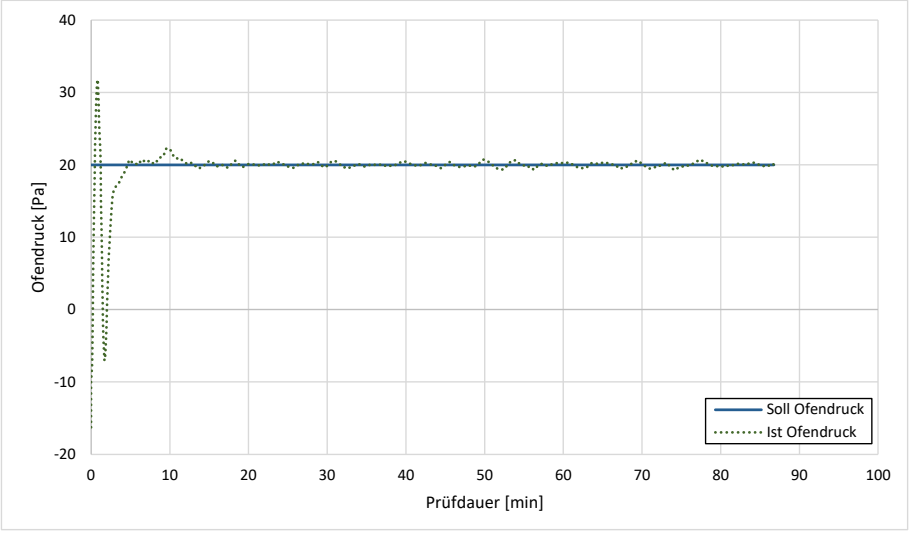


Abb. F. 15: Ofendruck während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

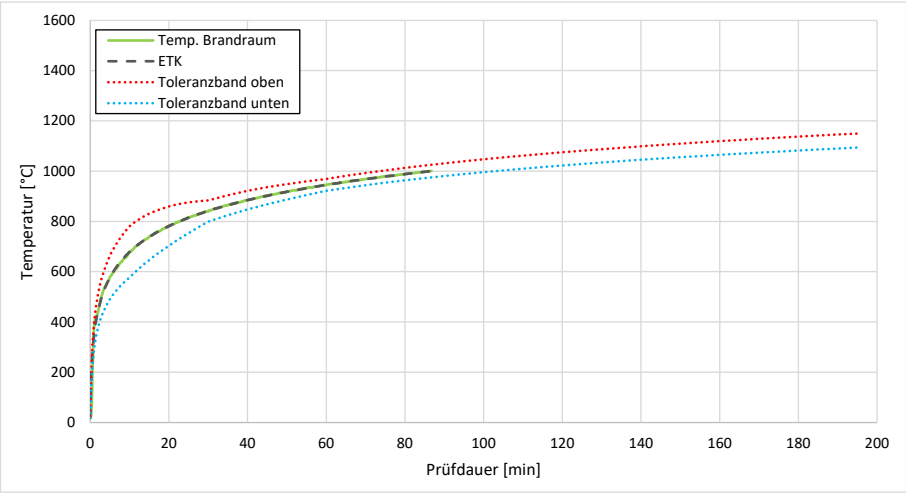


Abb. F. 16: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

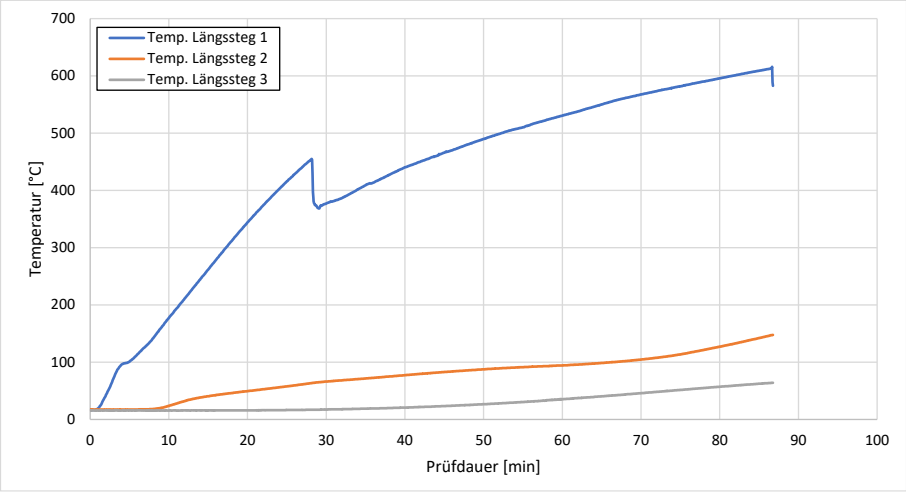


Abb. F. 17: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

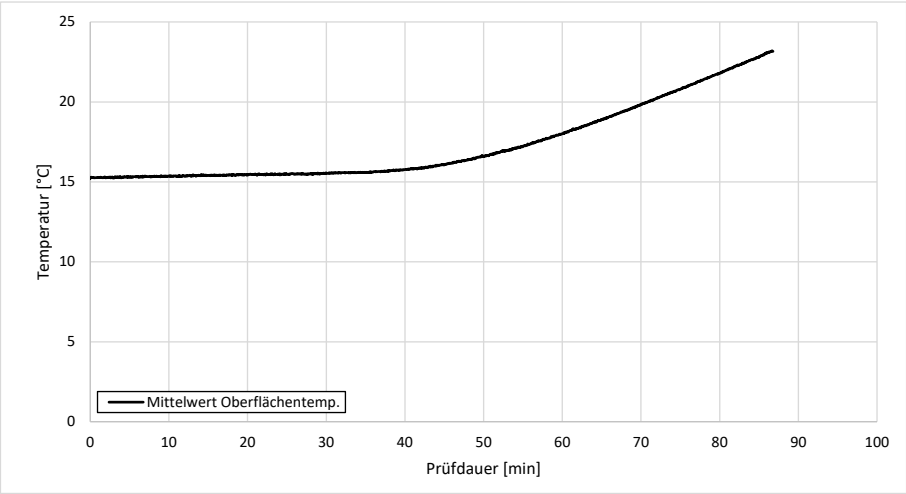


Abb. F. 18: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B2-MZ70-190mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,190 m	Datum:	25.01.2023
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 2	Startzeit:	07:53
Versuchsnr.:	17	Endzeit:	09:20

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
5	Horizontaler Riss im Putz auf Brandseite in Wandmitte, Prüflast steigt sehr schnell an, ständiges Ablassen der Prüflast
21	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
27	Wand auf Außeseite unten von Stahlträger abgelöst
28	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~74 kN
29	Partieller Putzabfall in oberster Steinreihe
42	Weiterer Putzabfall in oberster Steinreihe
66	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
72	Vertikaler Riss im Putz auf Außenseite in Wandmitte zum oberen Wanddrittel verlaufend
81	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
86	Abfall von Putz und Ziegelscherben, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

F.3 B3-MZ70-240mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

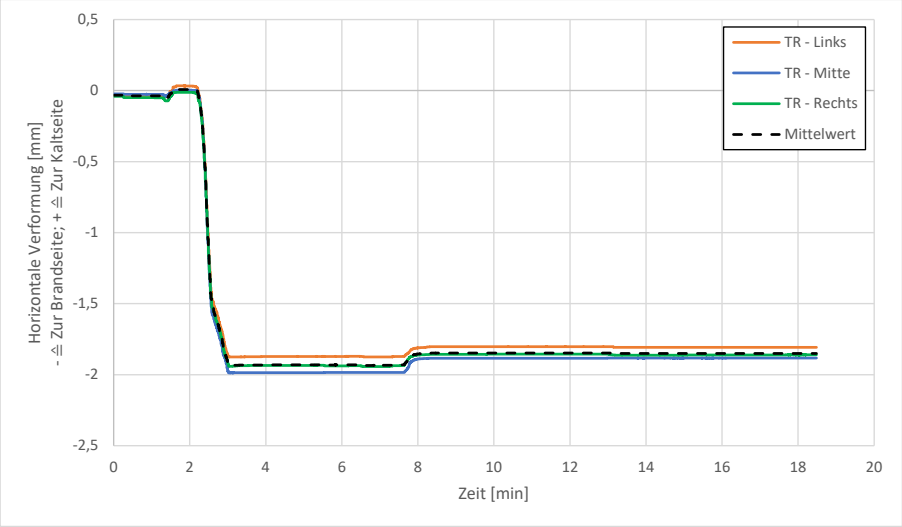


Abb. F. 19: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B3-MZ70-240mm-200kN

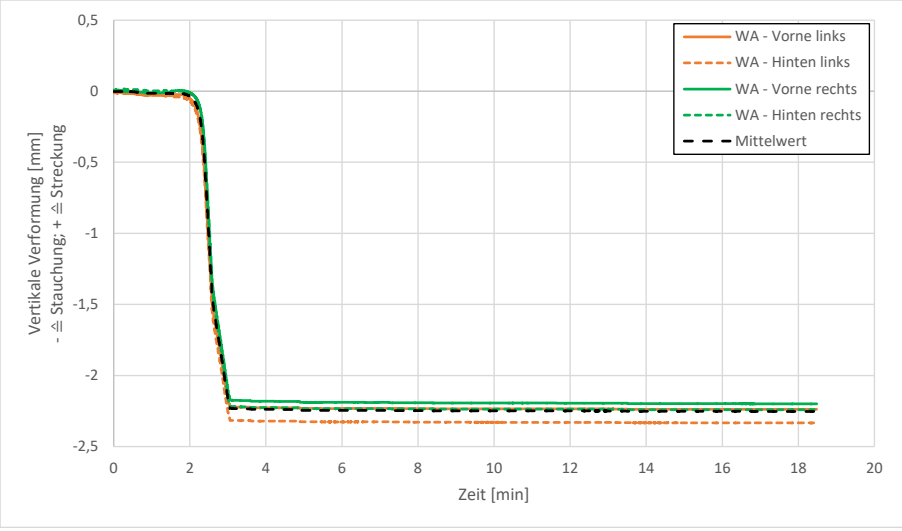


Abb. F. 20: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B3-MZ70-240mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

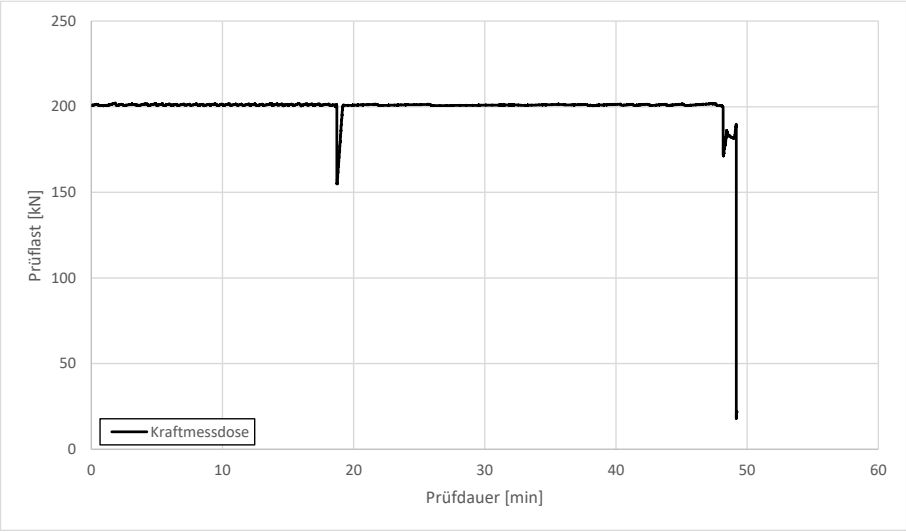


Abb. F. 21: Prüflast über die Prüfdauer B3-MZ70-240mm-200kN

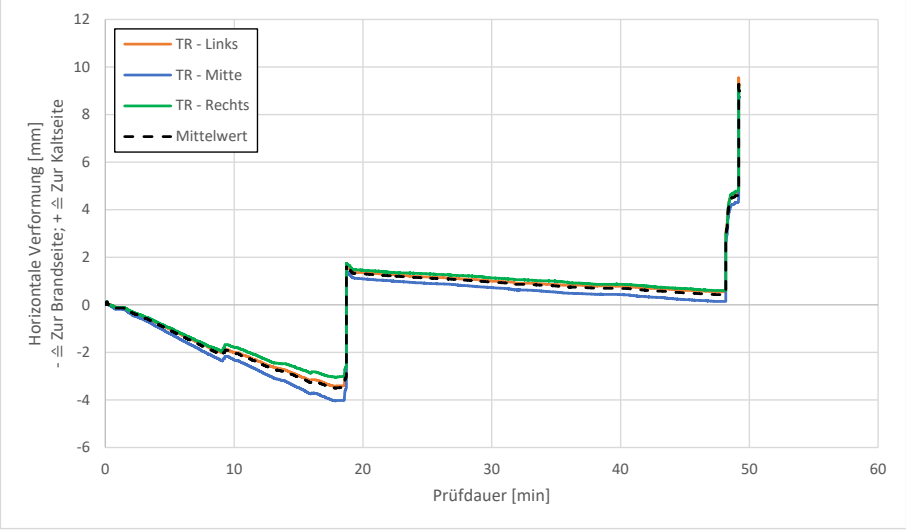


Abb. F. 22: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

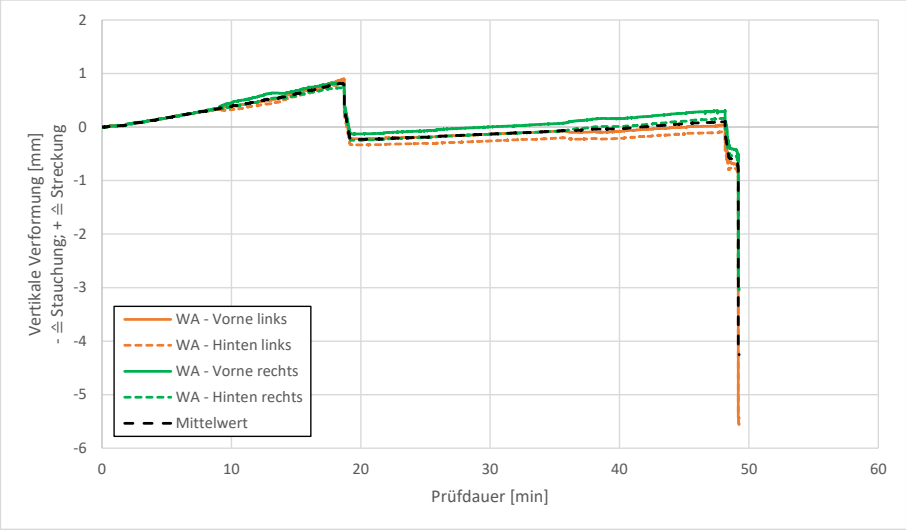


Abb. F. 23: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

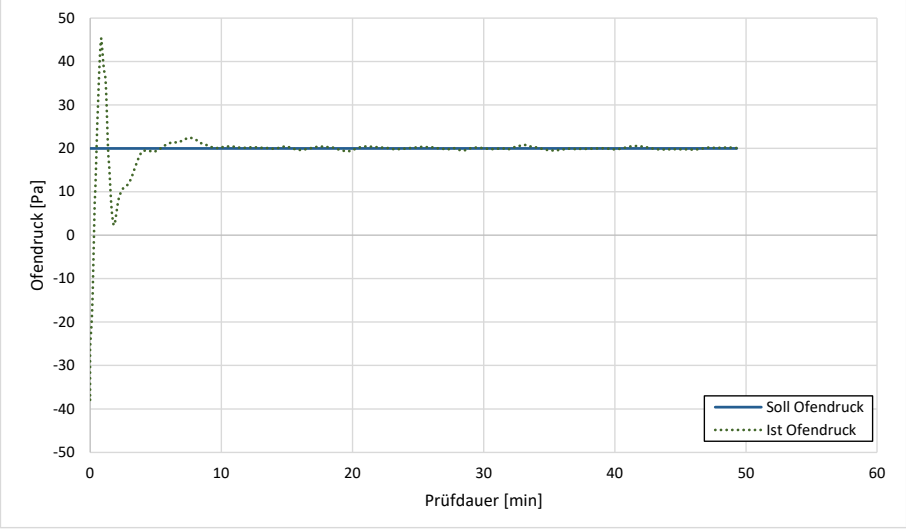


Abb. F. 24: Ofendruck während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

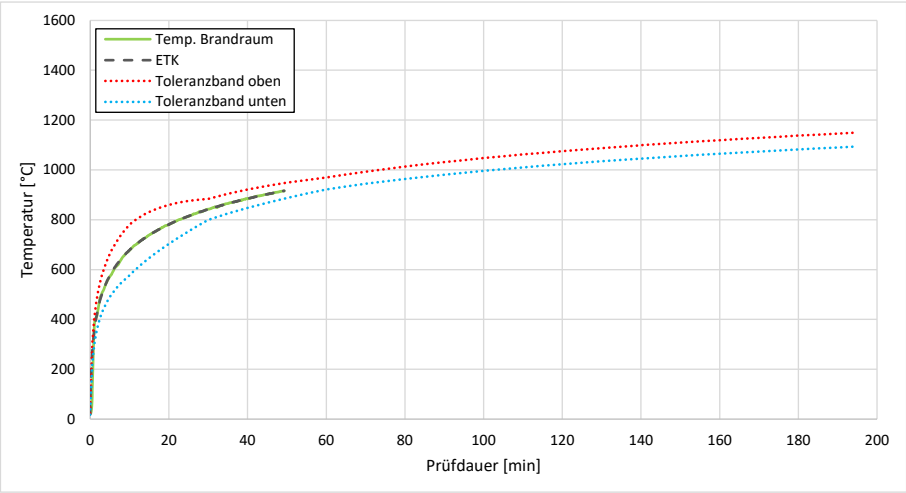


Abb. F. 25: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

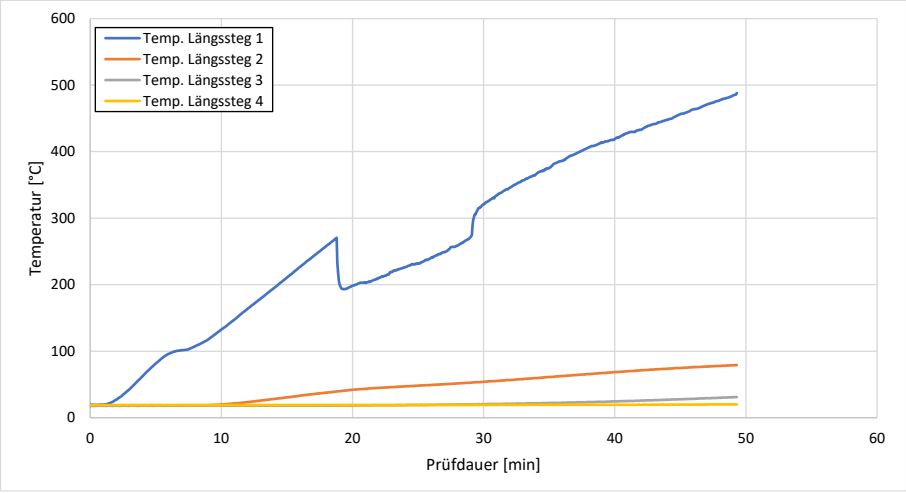


Abb. F. 26: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

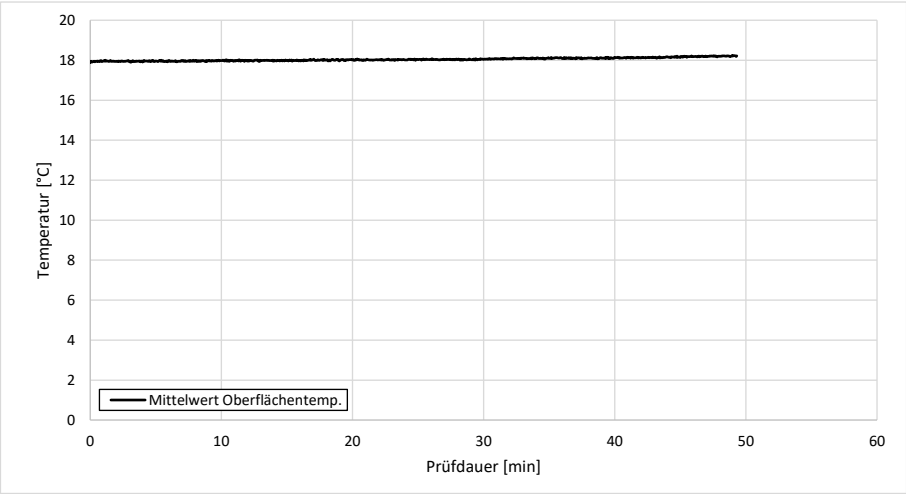


Abb. F. 27: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B3-MZ70-240mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,240 m	Datum:	24.02.2023
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 1	Startzeit:	07:45
Versuchsnr.:	20	Endzeit:	08:33

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Prüflast steigt sehr schnell an, ständiges Ablassen der Prüflast
6	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
18	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~45 kN
48	Abfall von Putz und Ziegelscherben, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

F.4 B4-MZ70-490mm-375kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (375 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

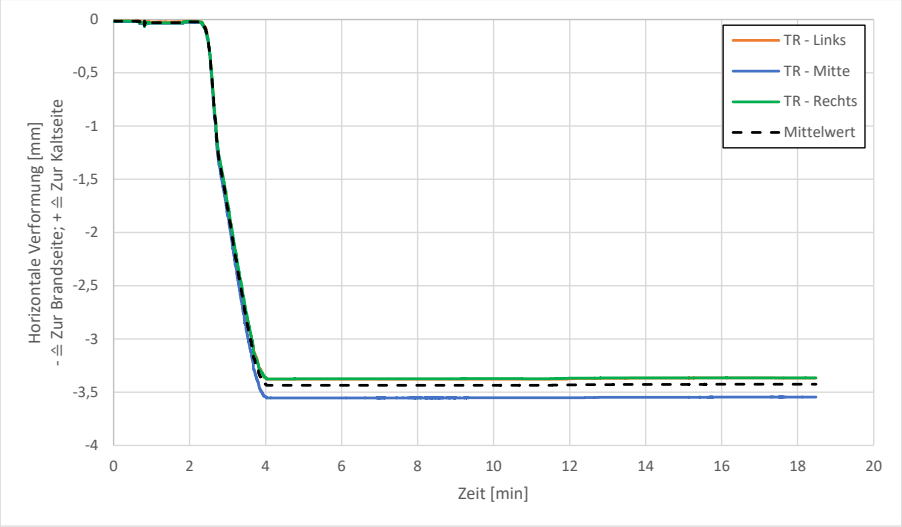


Abb. F. 28: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B4-MZ70-490mm-375kN

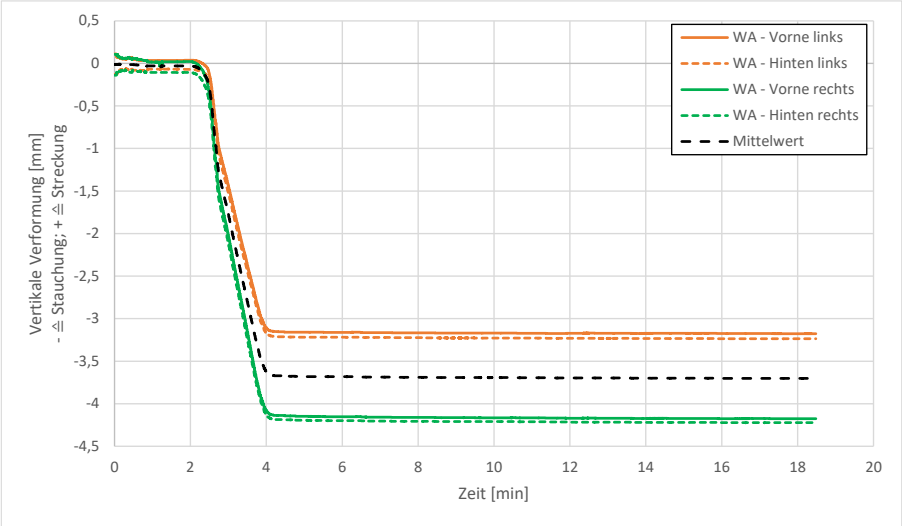


Abb. F. 29: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B4-MZ70-490mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

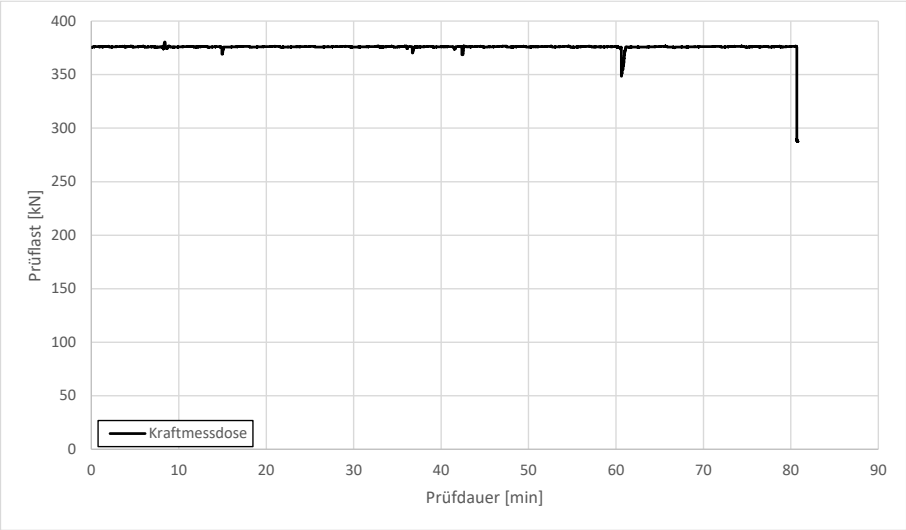


Abb. F. 30: Prüflast über die Prüfdauer B4-MZ70-490mm-375kN

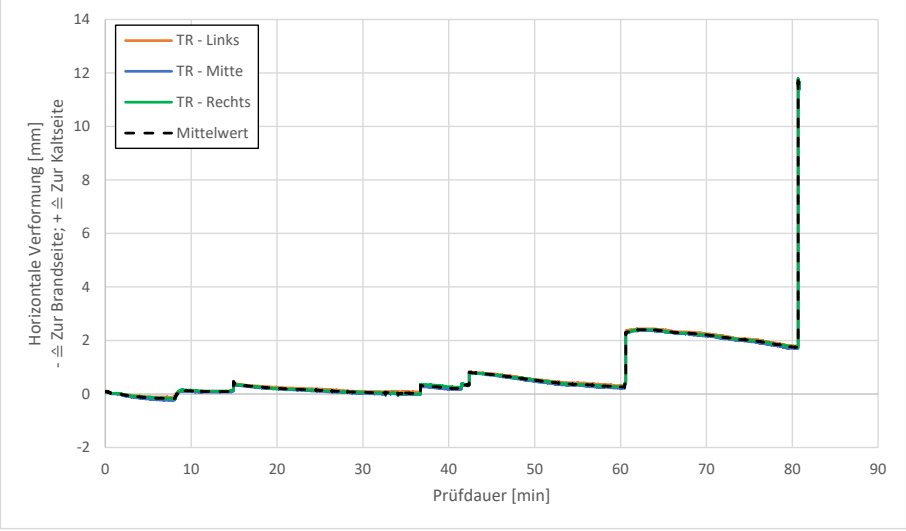


Abb. F. 31: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

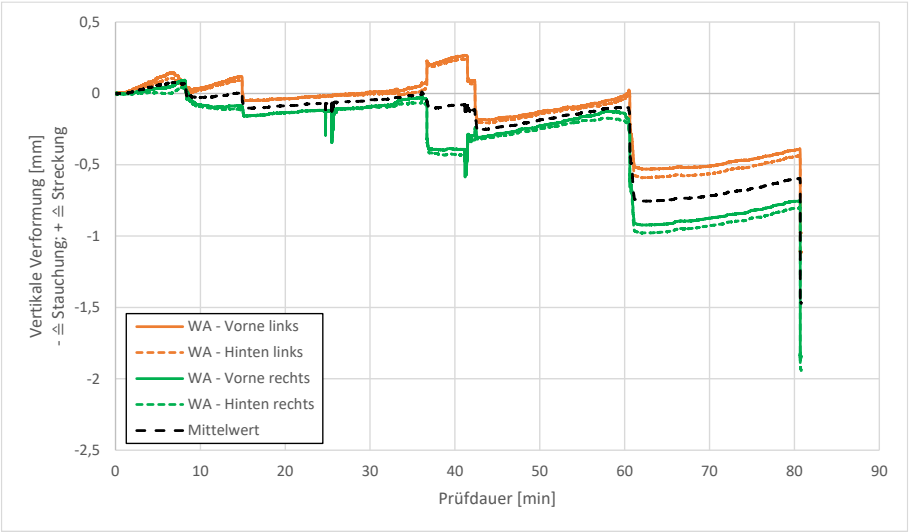


Abb. F. 32: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen am Mauerwerksrand direkt unter dem Putz bei der brandzugewandten Wandseite jeweils links und rechts zeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

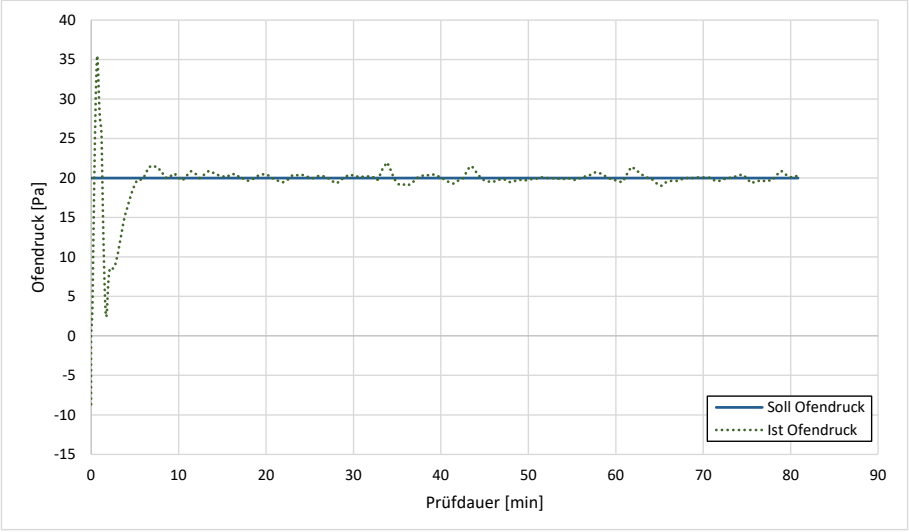


Abb. F. 33: Ofendruck während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

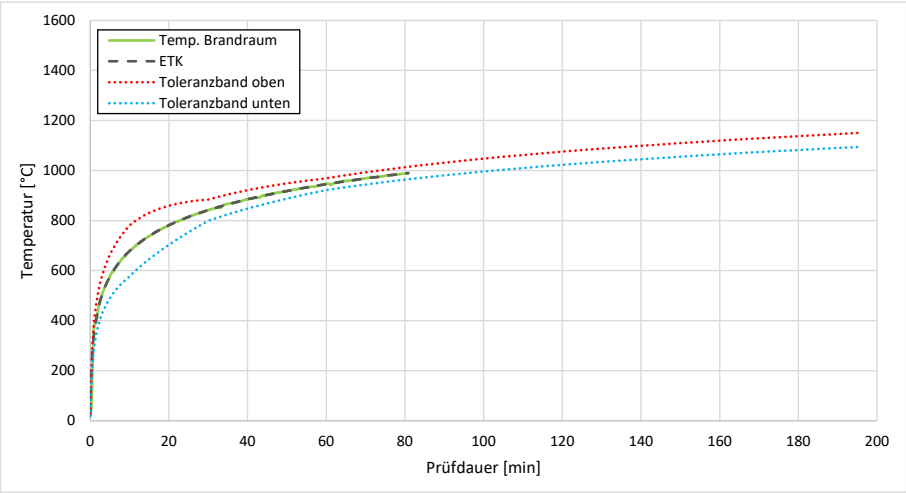


Abb. F. 34: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

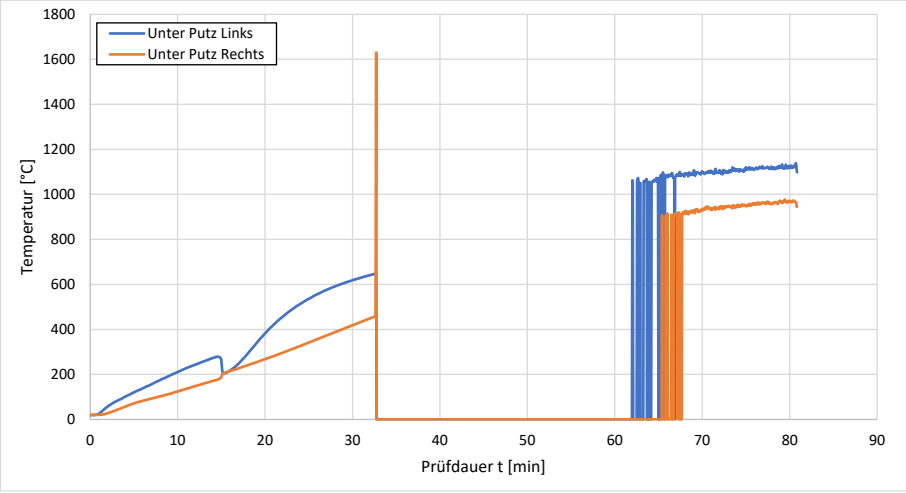


Abb. F. 35: Temperatur unter dem Putz während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

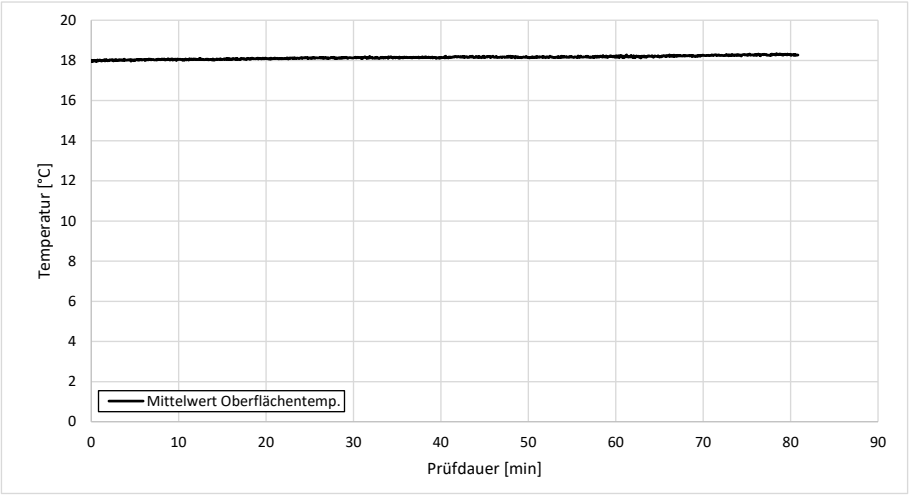


Abb. F. 36: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B4-MZ70-490mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,490 m	Datum:	10.03.2023
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 1	Startzeit:	07:38
Versuchsnr.:	21	Endzeit:	08:58

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	Viele leise Knackgeräusche, Lastabfall um ~3 kN
15	Knackgeräusche und Lastabfall um ~6 kN sowie großer Riss im Putz bei oberen Wanddrittel
20	Putz ist abgelößt jedoch nicht abgefallen, da sich dieser verkeilt hat
32	Putzabfall über mittleren und oberen Wandbereich durch Lösung der verkeilung
36	Lastabfall um ~5 kN sowie Ziegelabplatzungen in linken mittleren Wandbereich
41	Lastabfall um ~2 kN sowie Ziegelabplatzungen in rechten oberen Wandbereich
42	Lastabfall um ~7 kN sowie Ziegelabplatzungen im mittleren Wandbereich
60	Lastabfall um ~27 kN sowie Ziegelabplatzungen im mittleren Wandbereich
80	Abfall von Putz und Ziegelscherben, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten und zweit obersten Ziegelreihe

F.5 B5-W07 V-175mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

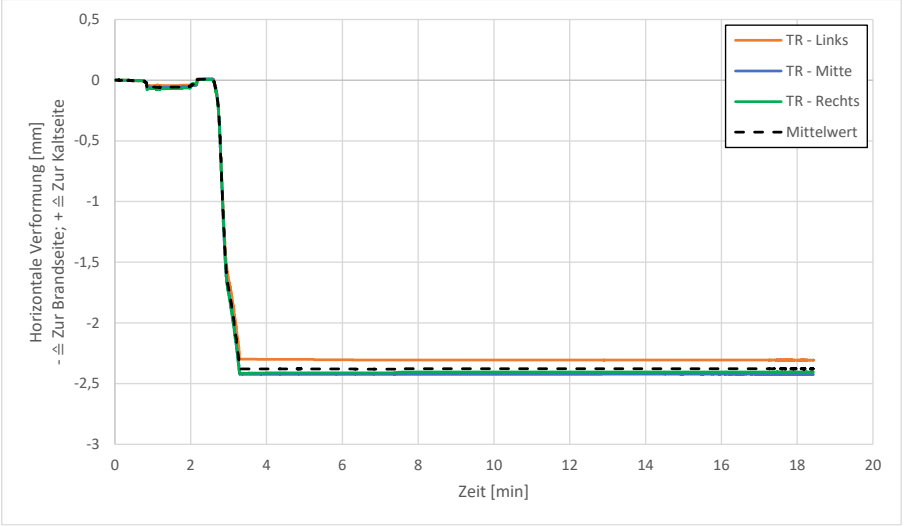


Abb. F. 37: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B5-W07 V-175mm-200kN

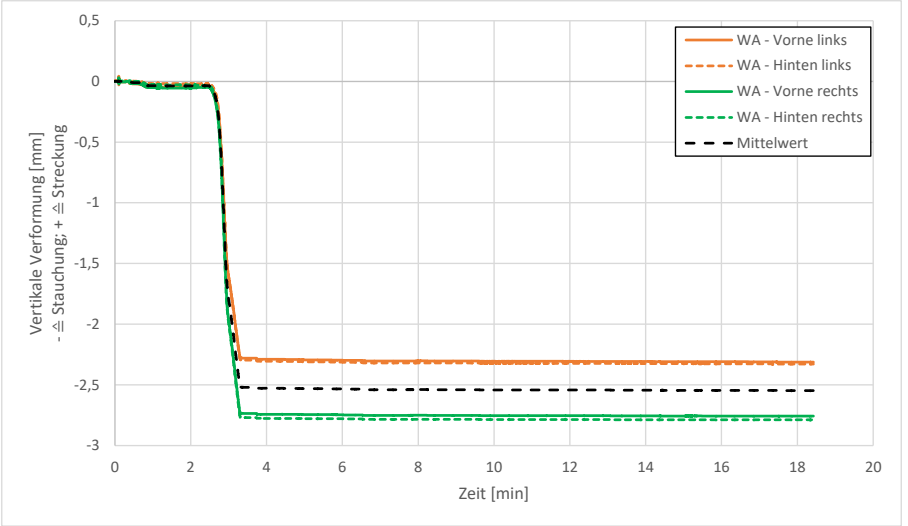


Abb. F. 38: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B5-W07 V-175mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

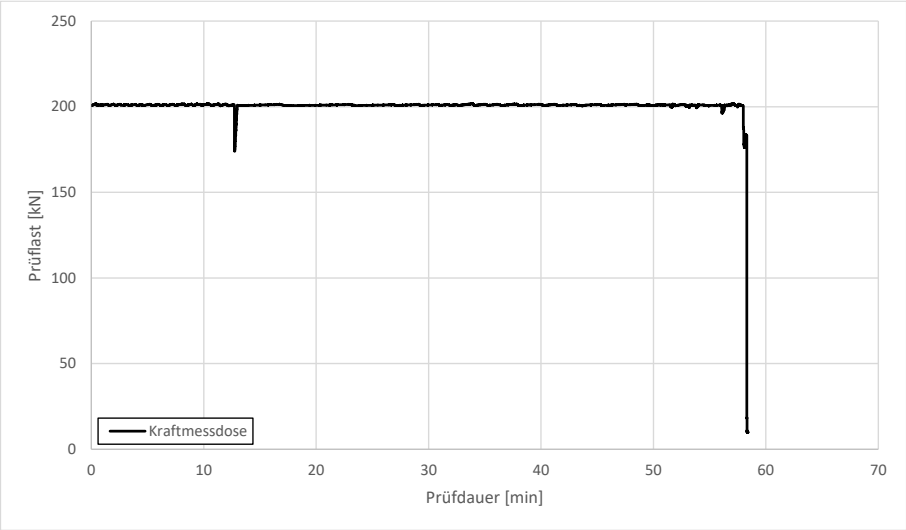


Abb. F. 39: Prüflast über die Prüfdauer B5-W07 V-175mm-200kN

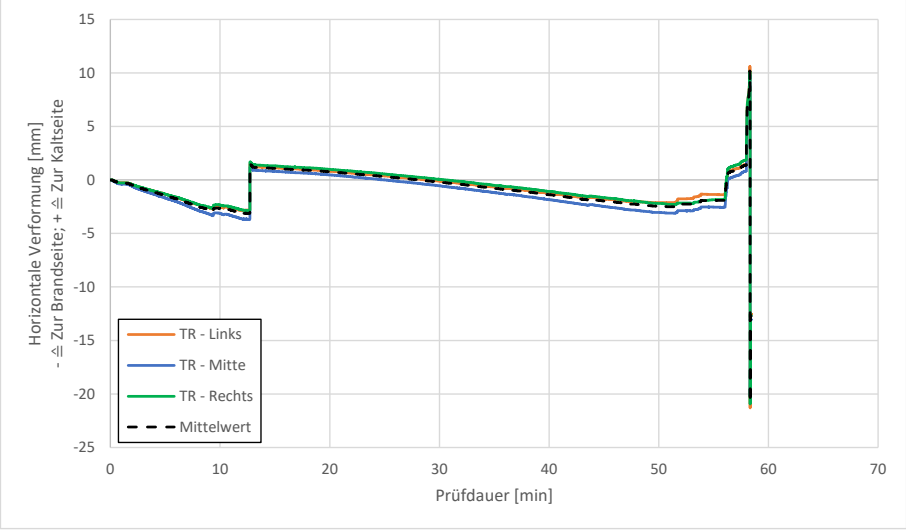


Abb. F. 40: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

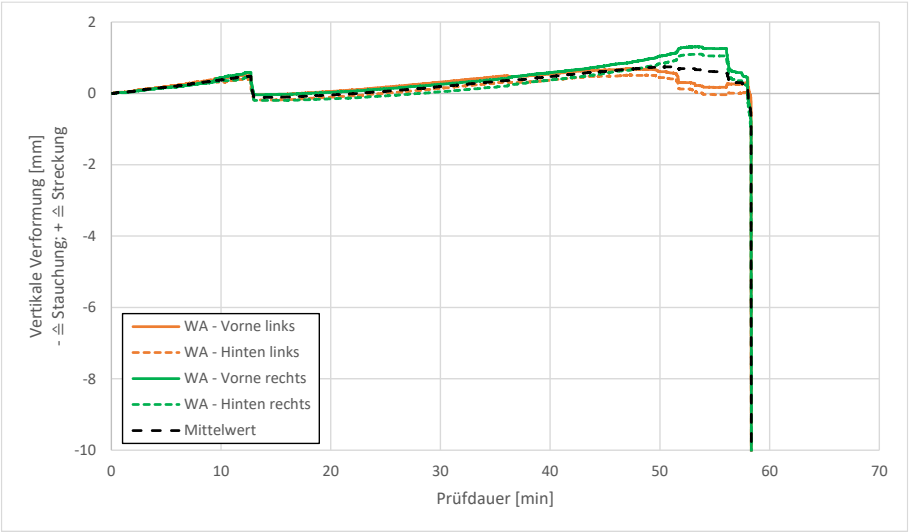


Abb. F. 41: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

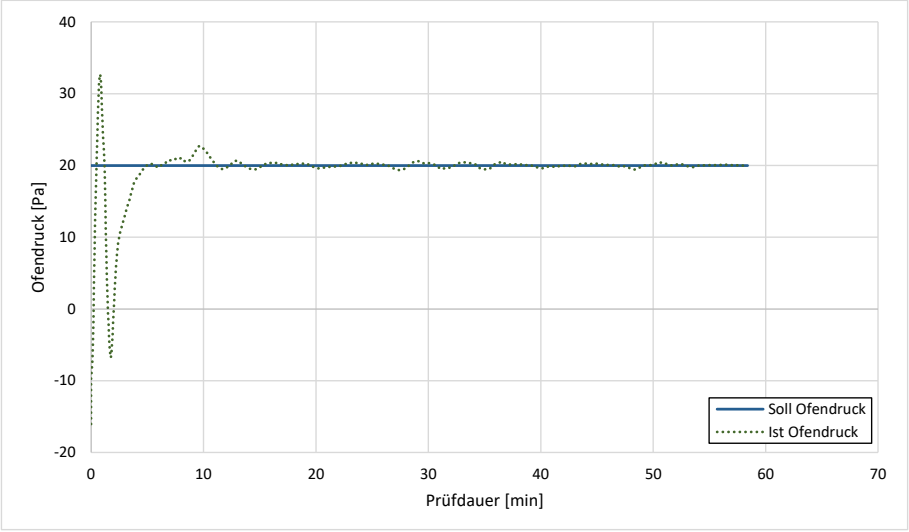


Abb. F. 42: Ofendruck während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

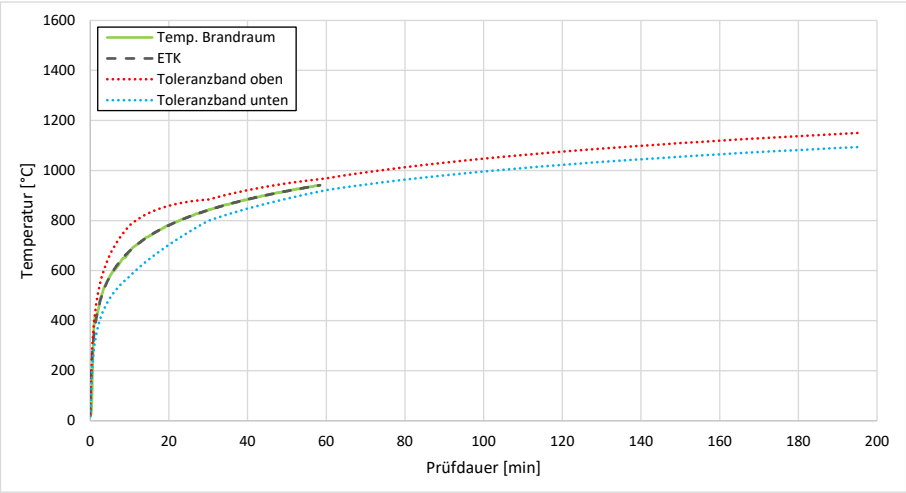


Abb. F. 43: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

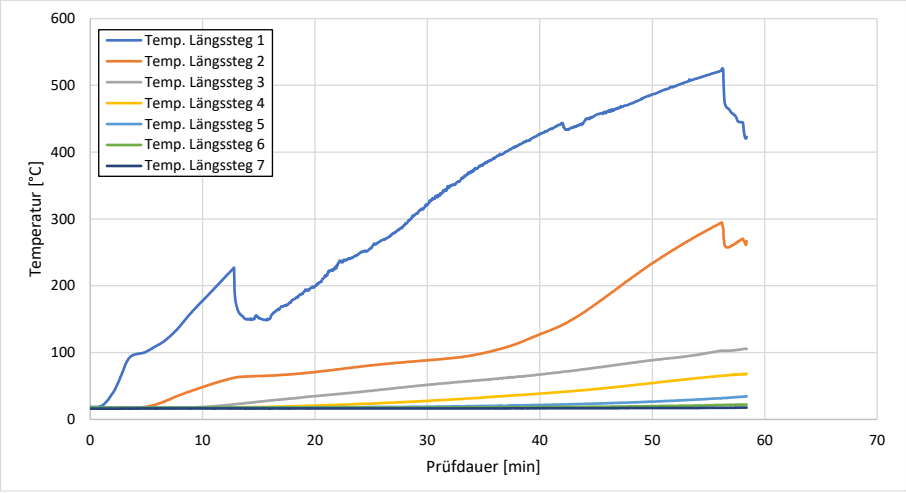


Abb. F. 44: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

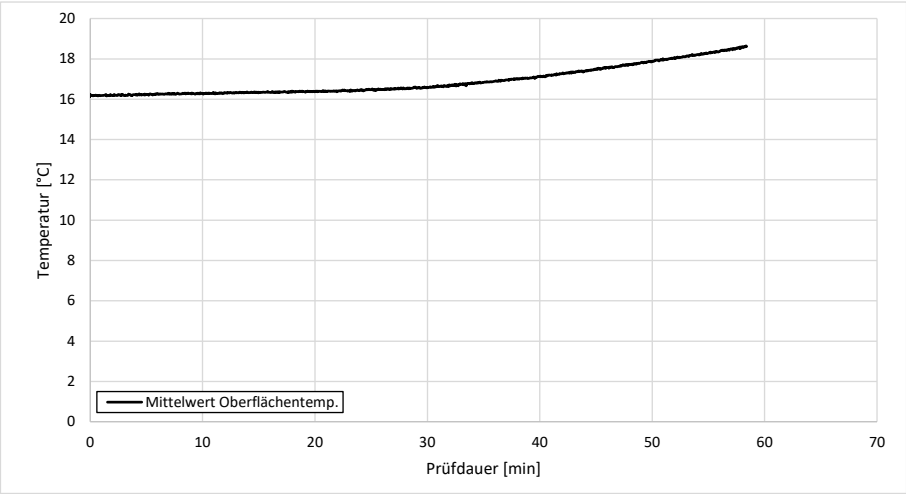


Abb. F. 45: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B5-W07 V-175mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,175 m	Datum:	01.02.2023
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 1	Startzeit:	07:48
Versuchsnr.:	18	Endzeit:	08:46

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Prüflast steigt sehr schnell an, ständiges ablassen der Prüflast
4	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Wand beginnt sich auf Außenseite unten von Stahlträger abzulösen
12	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~26 kN
35	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
51-54	Langsamer, stetiger Lastabfall
55	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
56	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~4 kN
57	Langsamer, stetiger Lastabfall
58	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

F.6 B6-W07 V-175mm-154kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (154 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

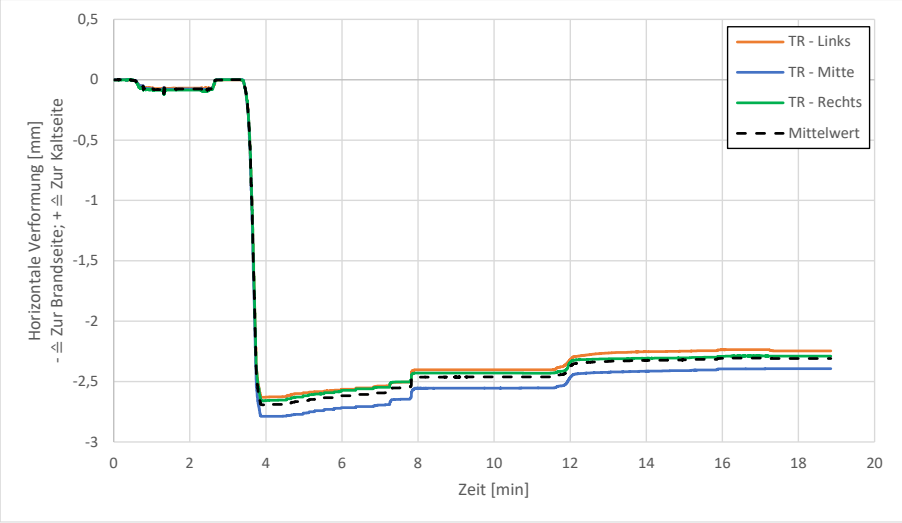


Abb. F. 46: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B6-W07 V-175mm-154kN

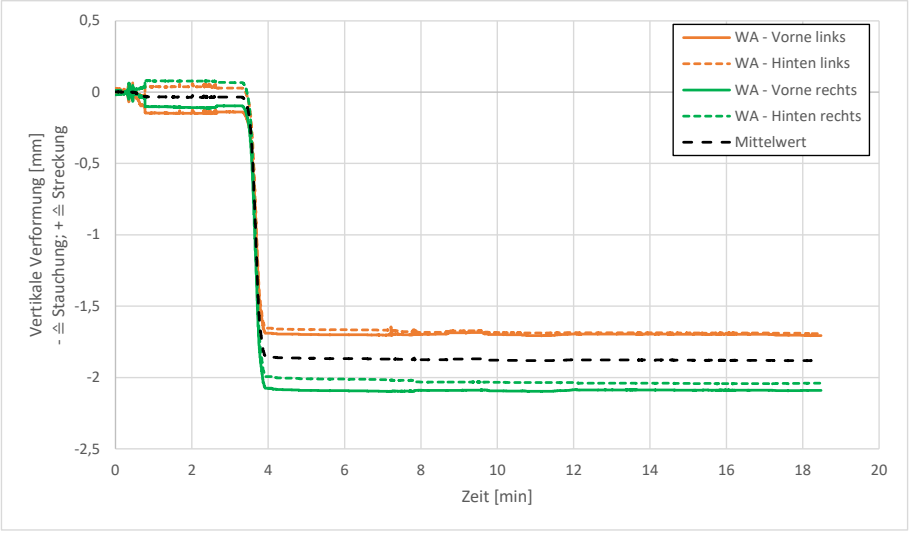


Abb. F. 47: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B6-W07 V-175mm-154kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

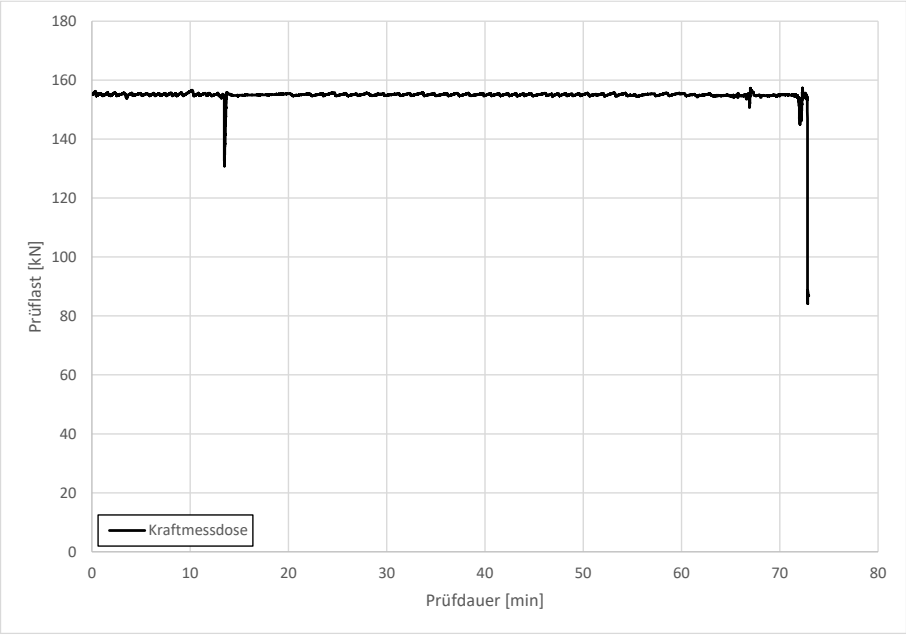


Abb. F. 48: Prüflast über die Prüfdauer B6-W07 V-175mm-154kN

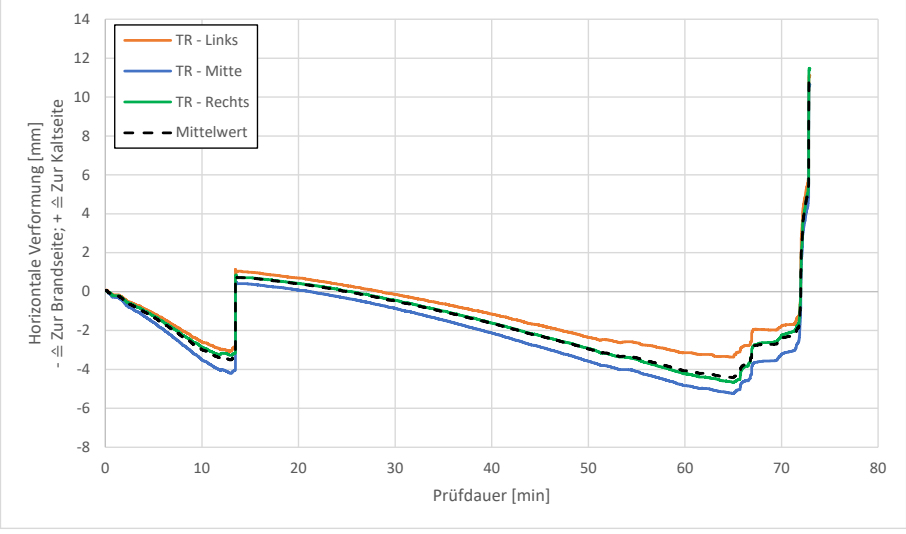


Abb. F. 49: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

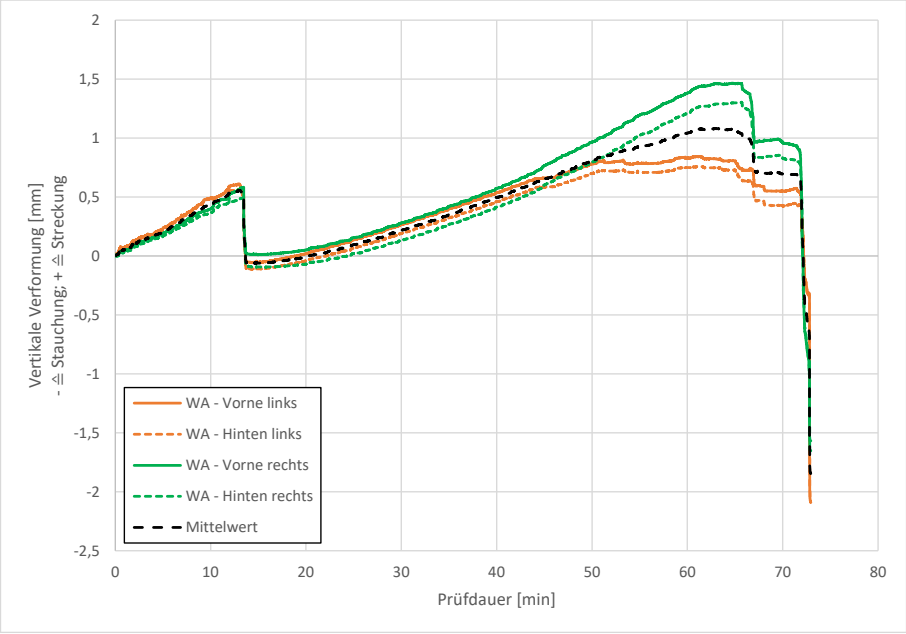


Abb. F. 50: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

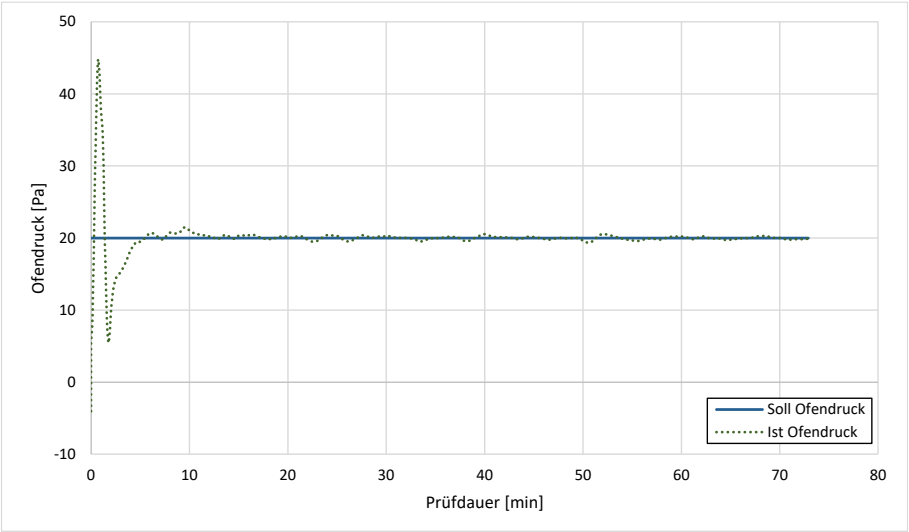


Abb. F. 51: Ofendruck während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

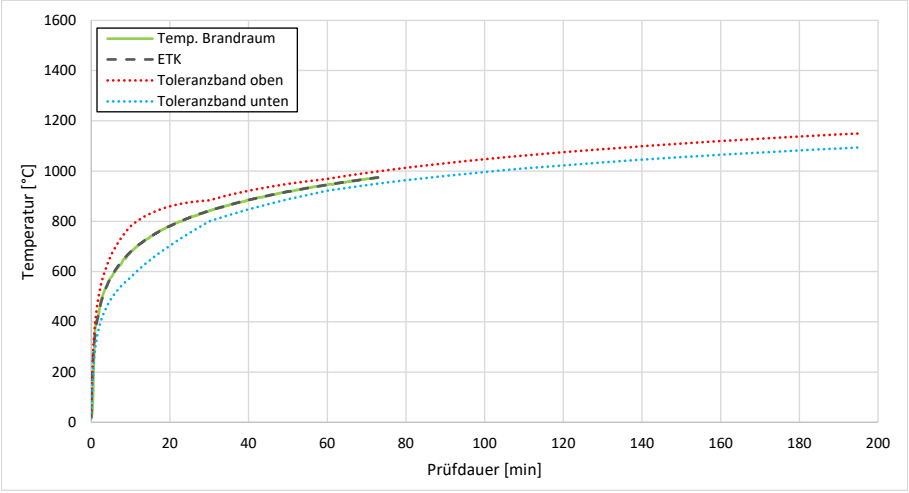


Abb. F. 52: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

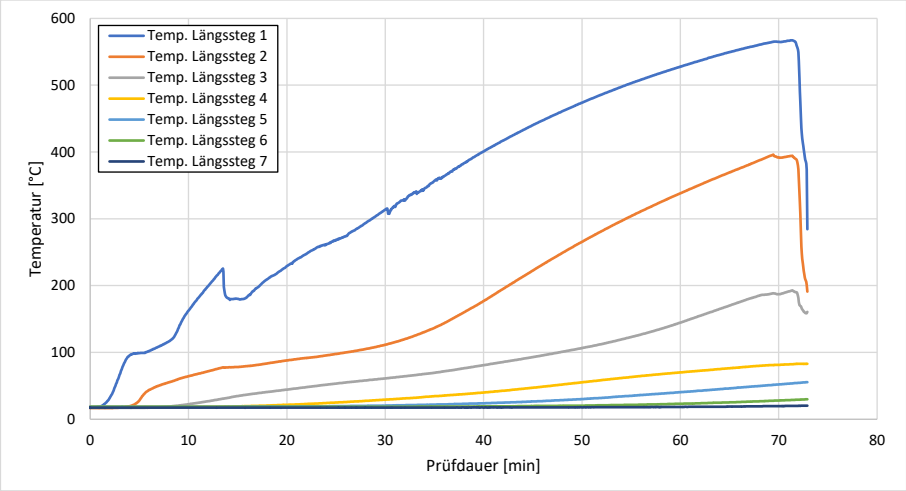


Abb. F. 53: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

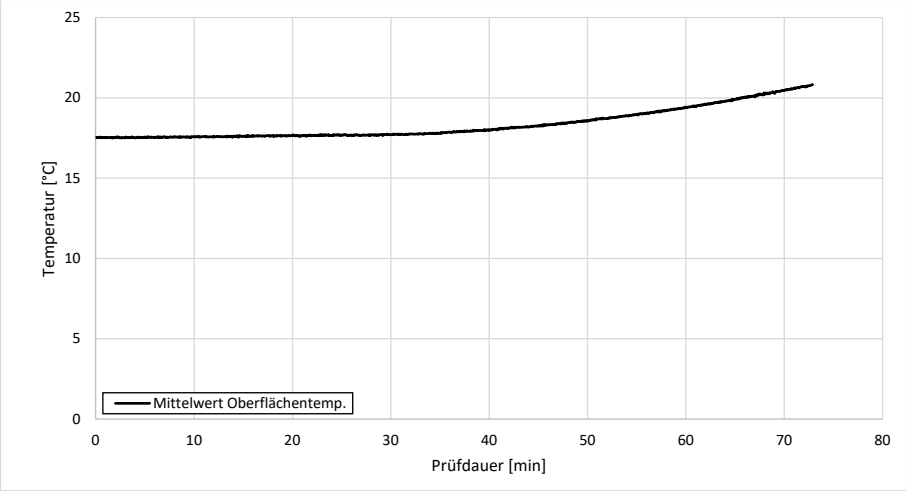


Abb. F. 54: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B6-W07 V-175mm-154kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,175 m	Datum:	13.02.2023
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 2	Startzeit:	07:44
Versuchsnr.:	19	Endzeit:	08:57

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (154 kN)
0	Beginn Brandversuch
1	Last steigt sehr schnell an, ständiges Ablassen der Prüflast
3	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
13	Lautes Knackgeräusch, Lastabfall um ~24 kN
26	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
47	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
65	Langsamer, stetiger Lastabfall
72	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der zweit obersten Ziegelreihe

F.7 B7-W07 UV-175mm-200kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

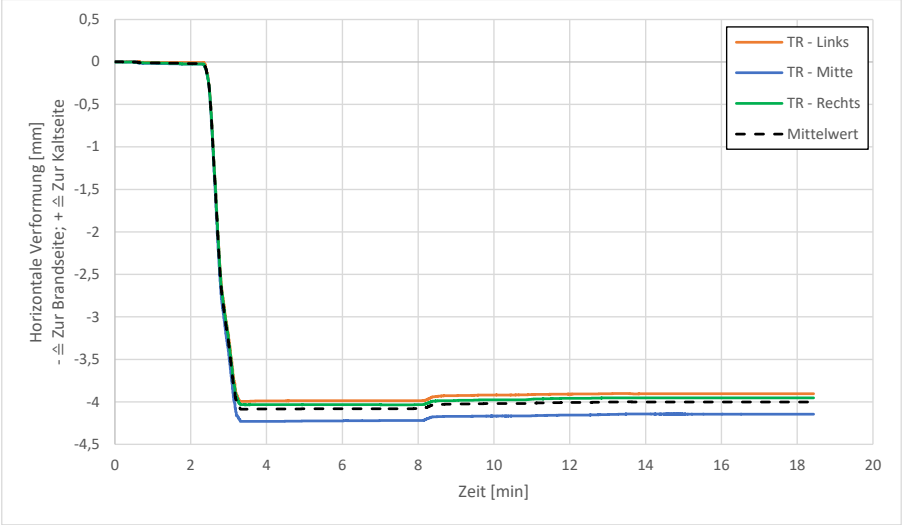


Abb. F. 55: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B7-W07 UV-175mm-200kN

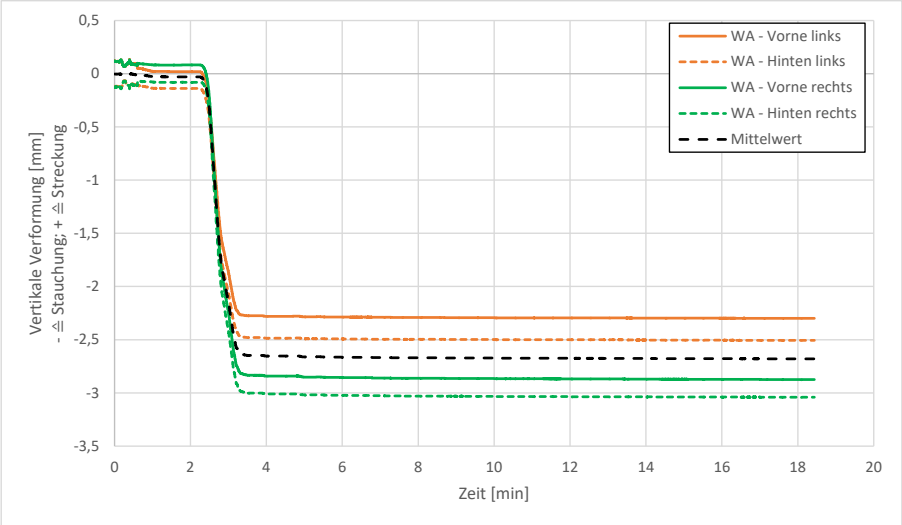


Abb. F. 56: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B7-W07 UV-175mm-200kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

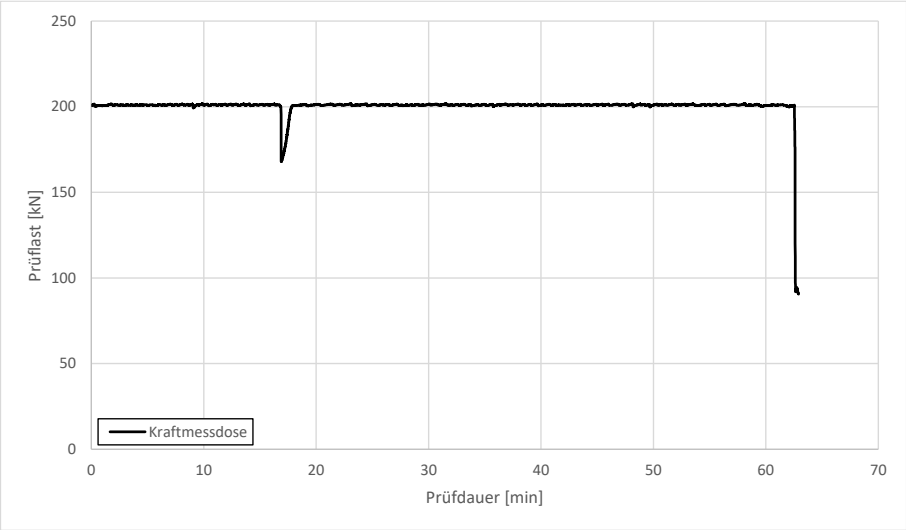


Abb. F. 57: Prüflast über die Prüfdauer B7-W07 UV-175mm-200kN

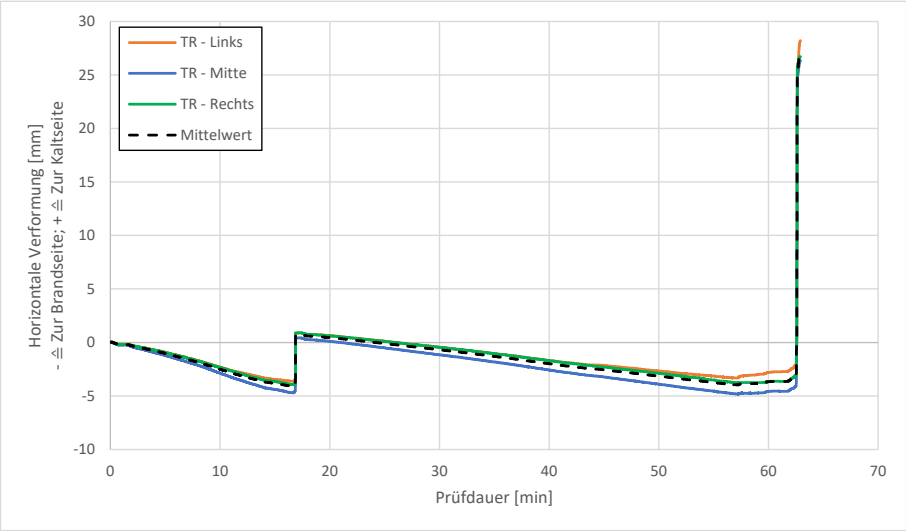


Abb. F. 58: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

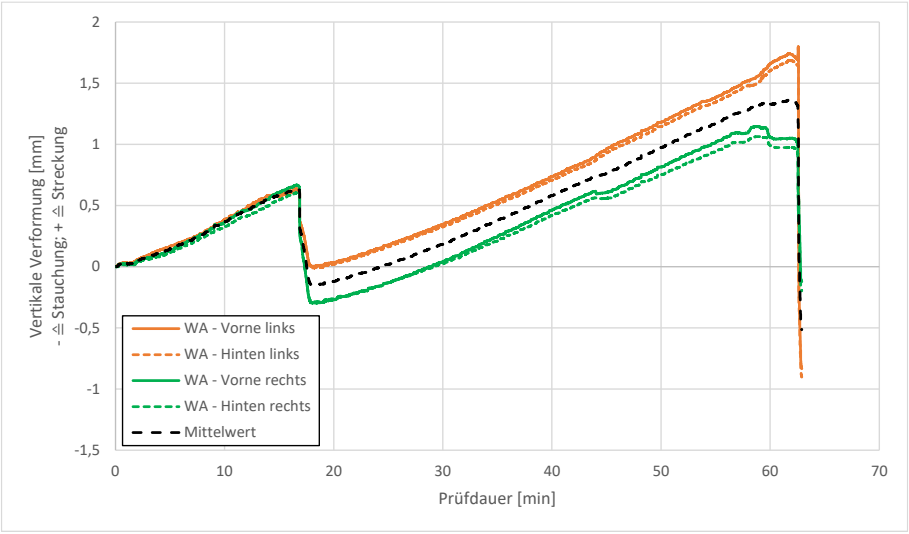


Abb. F. 59: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

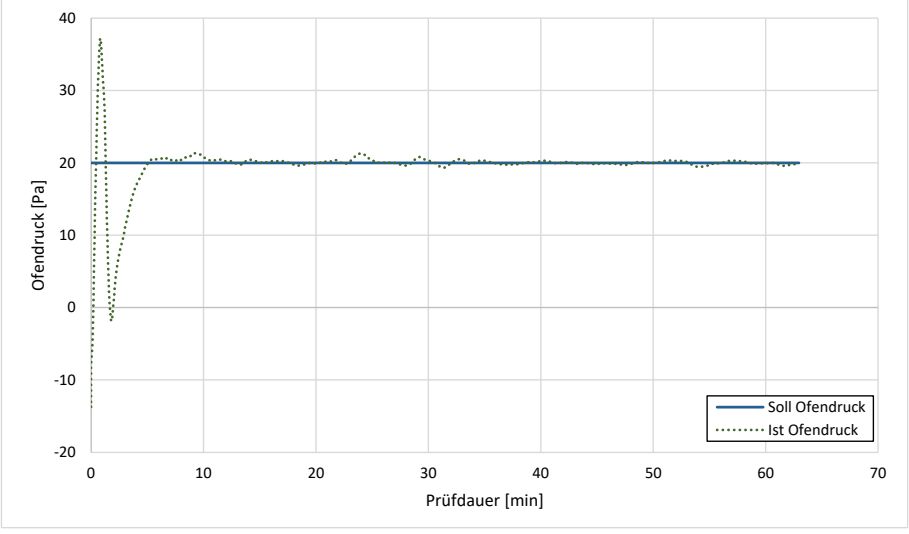


Abb. F. 60: Ofendruck während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

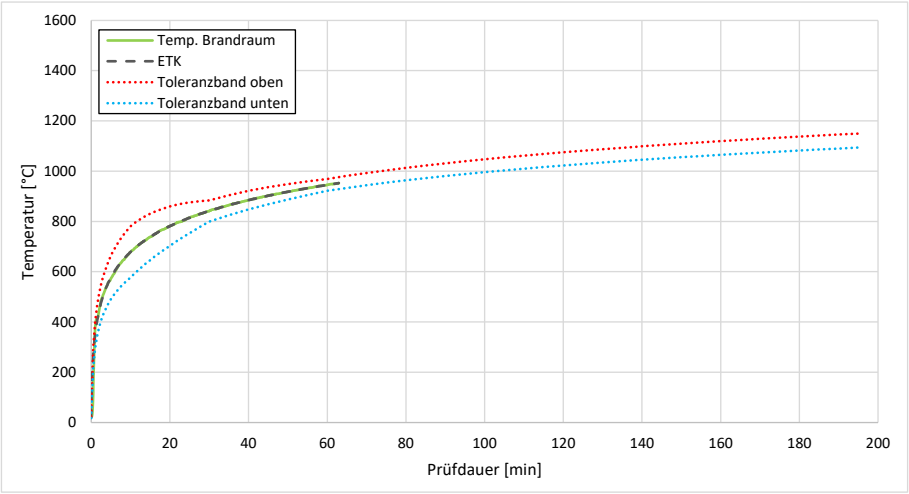


Abb. F. 61: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

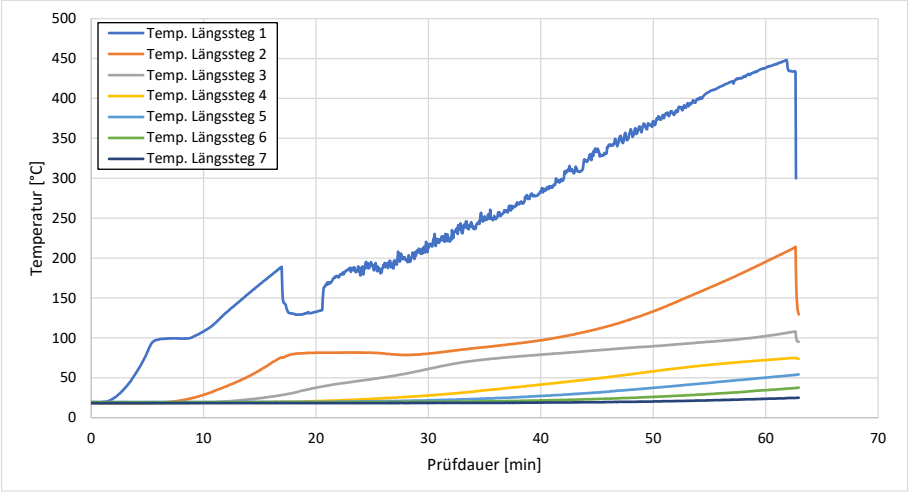


Abb. F. 62: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

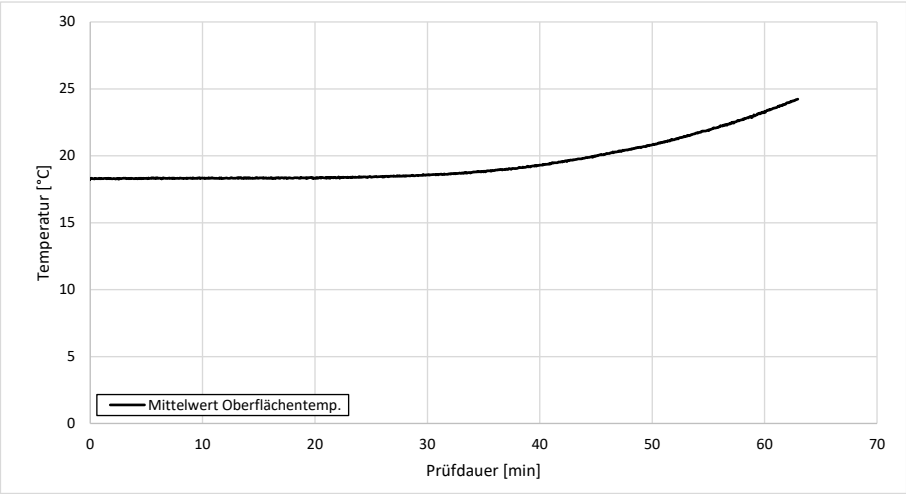


Abb. F. 63: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B7-W07 UV-175mm-200kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,175 m	Datum:	06.01.2023
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 2	Startzeit:	07:50
Versuchsnr.:	15	Endzeit:	08:52

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche und horizontale Risse im Putz auf Wandinnenseite im oberen und unteren Drittelspunkt; Wand beginnt sich auf Außeseite unten von Stahlträger abzulösen
17	Lastabfall um ~32 kN; horizontaler Riss im Putz in oberster Steinreihe auf der Innenseite und leicht auf der Außenseite
41	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
59	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
62	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) oberhalb der Wandmitte

F.8 B8-W07 UV-175mm-82kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (82 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben. Die Messung wurde erst gestartet, nachdem die Prüflast bereits auf die Wand aufgebracht war.

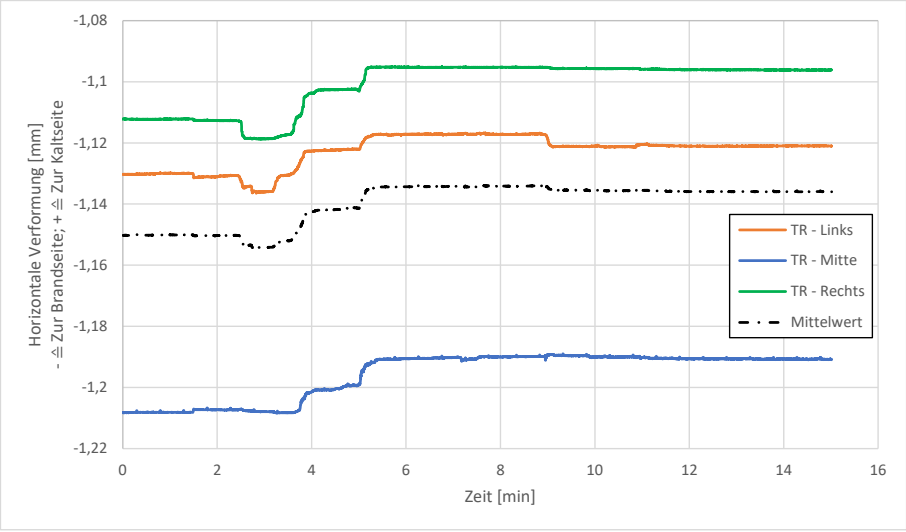


Abb. F. 64: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B8-W07 UV-175mm-82kN

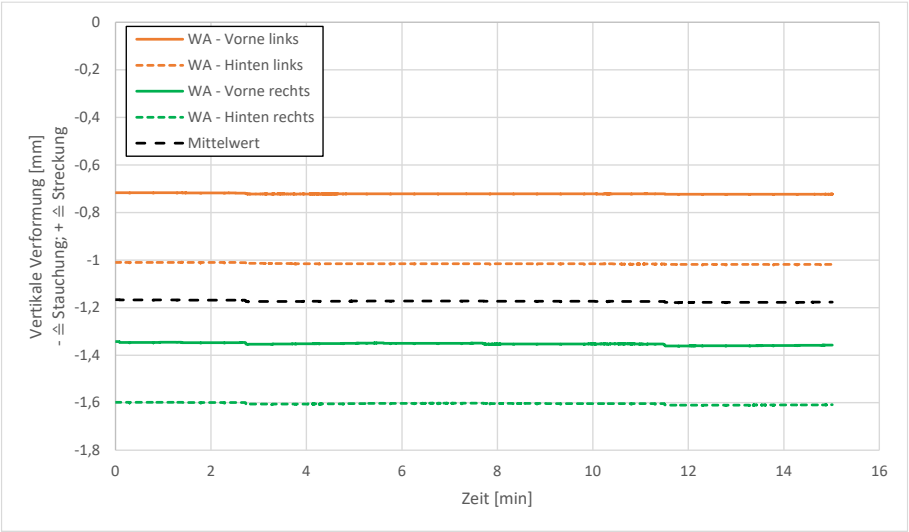


Abb. F. 65: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer B8-W07 UV-175mm-82kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

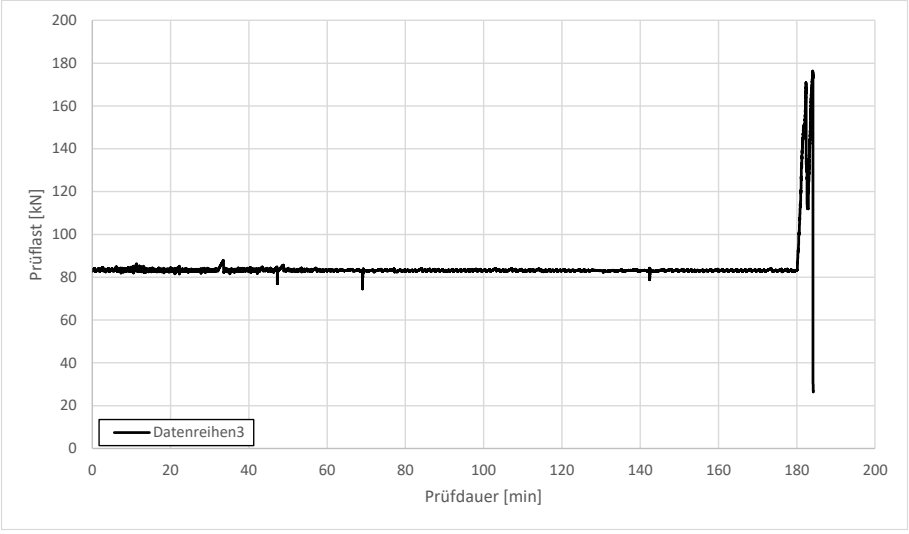


Abb. F. 66: Prüflast über die Prüfdauer B8-W07 UV-175mm-82kN

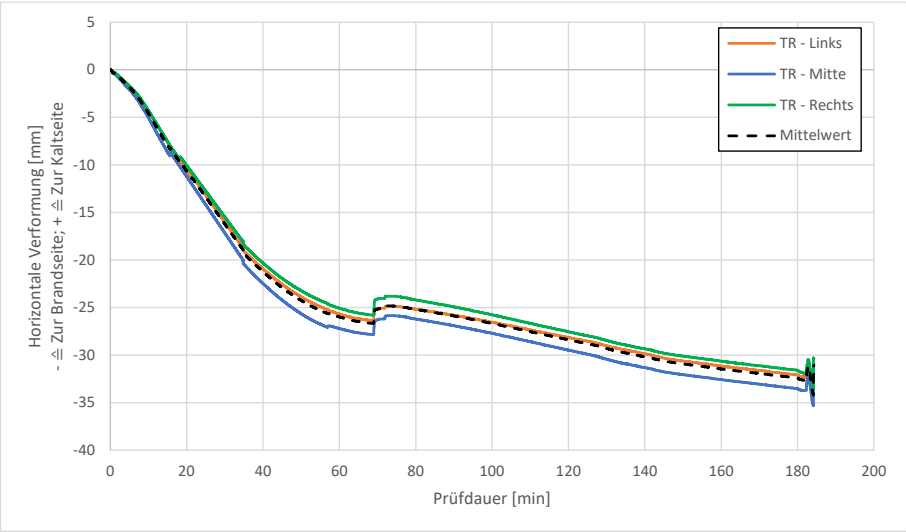


Abb. F. 67: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

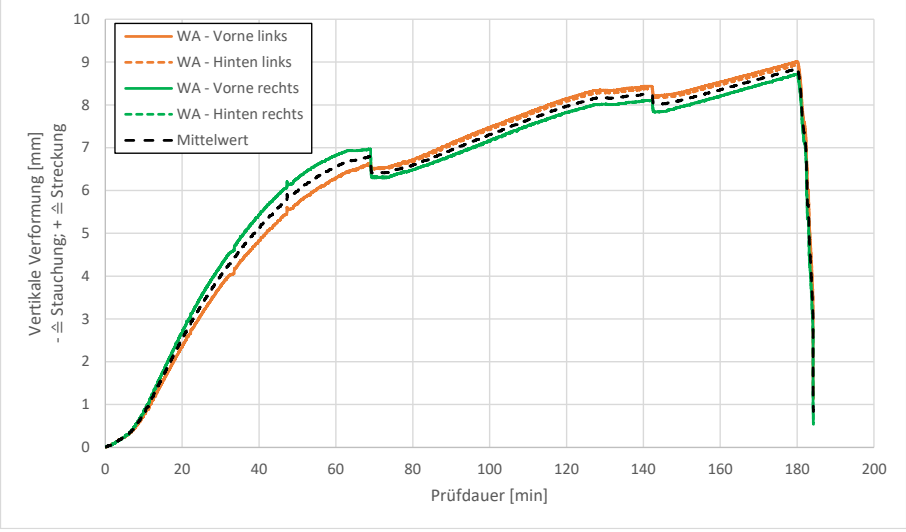


Abb. F. 68: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

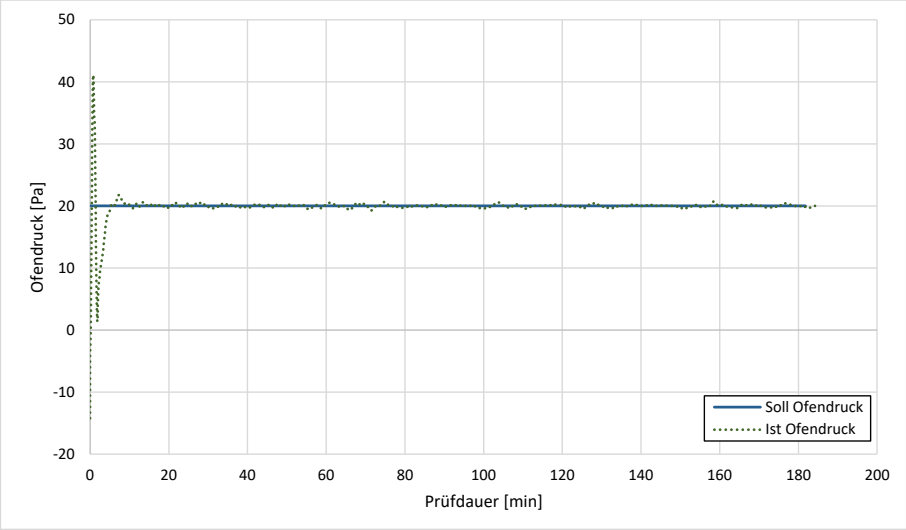


Abb. F. 69: Ofendruck während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

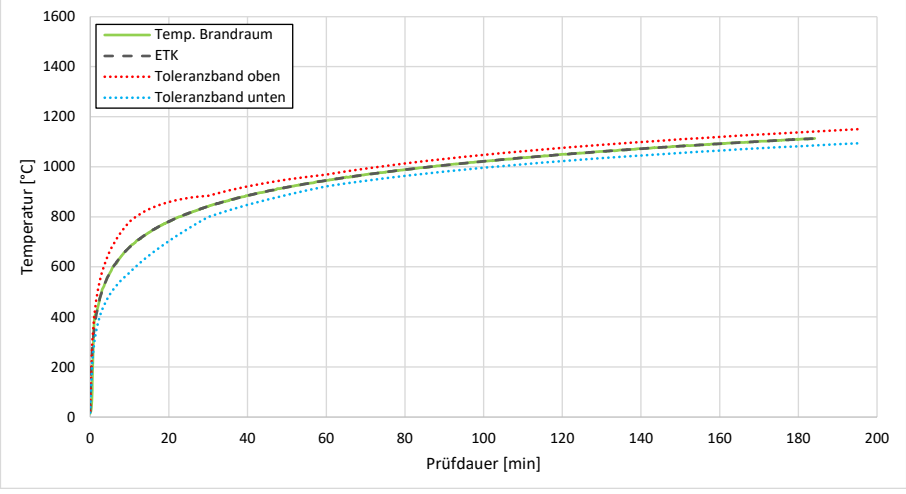


Abb. F. 70: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

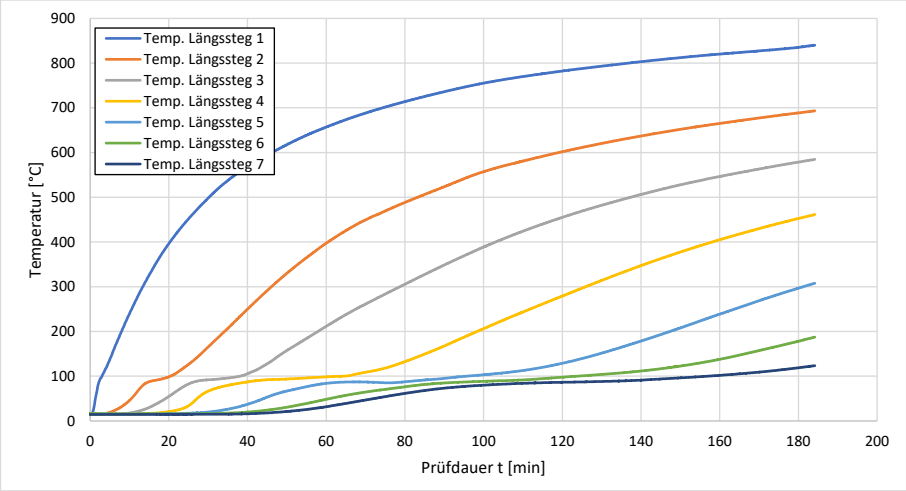


Abb. F. 71: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

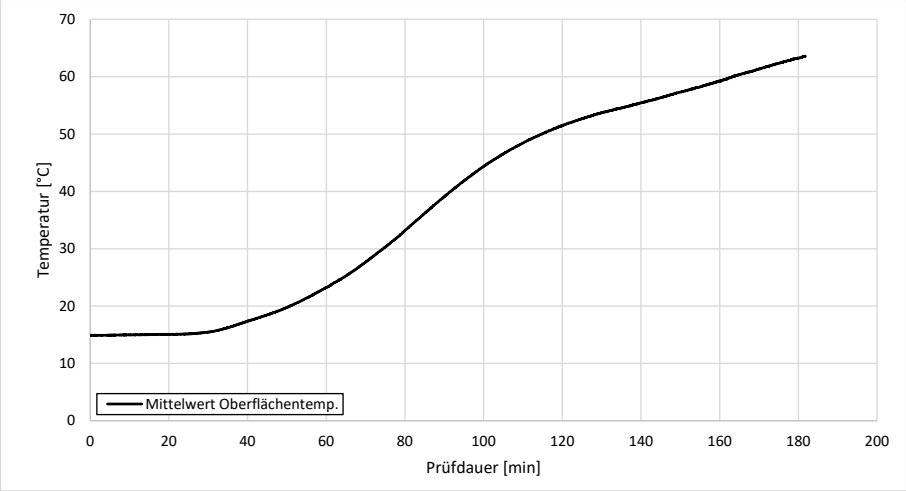


Abb. F. 72: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes B8-W07 UV-175mm-82kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,175 m	Datum:	19.12.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 1	Startzeit:	07:55
Versuchsnr.:	14	Endzeit:	11:00

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (82 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Last steigt sehr schnell an, ständiges Ablassen der Prüflast
3	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
20	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
33-34	Wegaufnehmer für horizontale Wegmessung neu justiert, da ab ~18.-20. Prüfminute maximum erreicht war
38	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
42	Wand auf Außeseite unten von Stahlträger abgelöst
46	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
47	Per Hand zu viel von der Prüflast abgelassen
64	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
69	Lastabfall um ~8 kN
90	Vertikaler Riss im Putz auf Außenseite in Wandmitte je 1 m nach oben und unten verlaufend
95	100 °C beim 5. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
119	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
123	100 °C beim 6. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
142	Lastabfall um ~4 kN während des erneuten aufbringends der Prüflast
156	100 °C beim 7. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
180	Bisher kein Bauteilversagen, Lasterhöhung bis Bauteilversagen
184	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) oberer Wandbereich sowie Materialversagen unterer Wandbereich bei 176,3 kN

Anlage G Messdaten der Versuchsserie C

Es folgen Informationen und Messdaten zu den durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen am IZF mit den Prüfkörpergeometrien 1,5 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge mit einer Nennmaßdicke von 0,365 m. Messdaten für die Verformungen während der Belastung und der 15-minütigen Vorbelastung liegen nicht vor. Die Messstellen für die Verformungs- und Temperaturmessungen sind Anlage A zu entnehmen. Die Messung der Verformungen erfolgte mittels einem optischen Messsystem namens GOM. Anders als bei den Versuchen in Kaiserslautern befinden sich die Hydraulikzylinder für die Aufbringung der Prüflast nicht am Wandkopf, sondern am Wandfuß. Aus diesem Grund zeigt das Diagramm mit der vertikalen Verformung meist eine Streckung der Wand zum Zeitpunkt des Versagens auf, da die Wand zum Zeitpunkt des Lastabfalls nach oben gehoben wird. In den Prüfprotokollen wurden bei niedergeschriebenen Beobachtungen am Prüfkörper immer die zugehörigen Ofentemperaturen notiert.

G.1 C1-MZ70-365mm-850kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

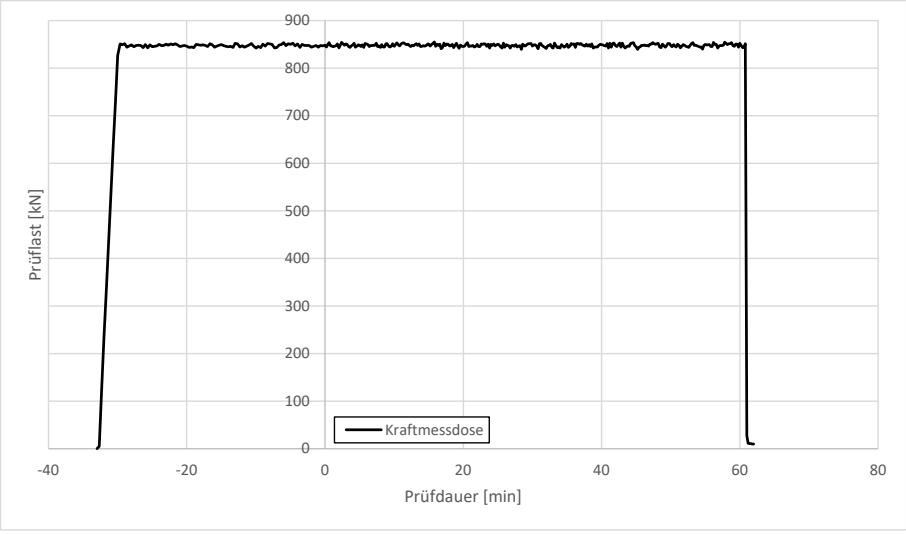


Abb. G. 1: Prüflast über die Prüfdauer C1-MZ70-365mm-850kN

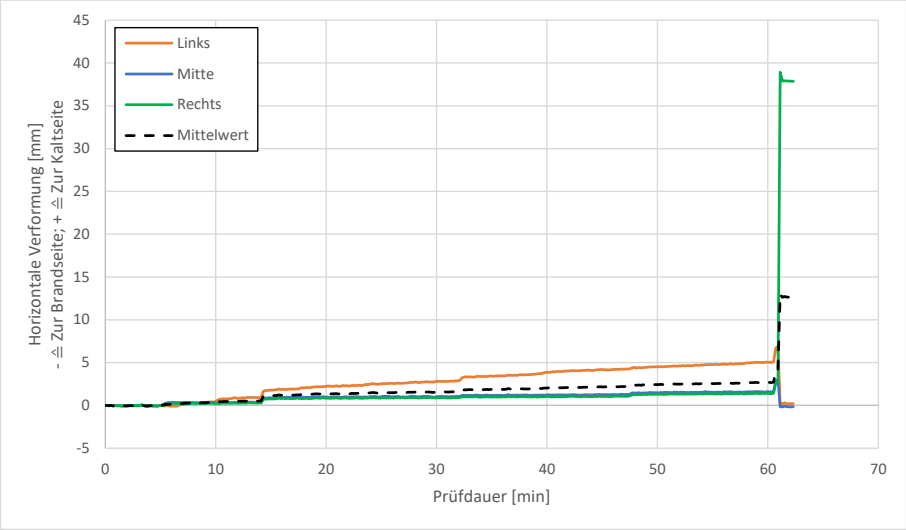


Abb. G. 2: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

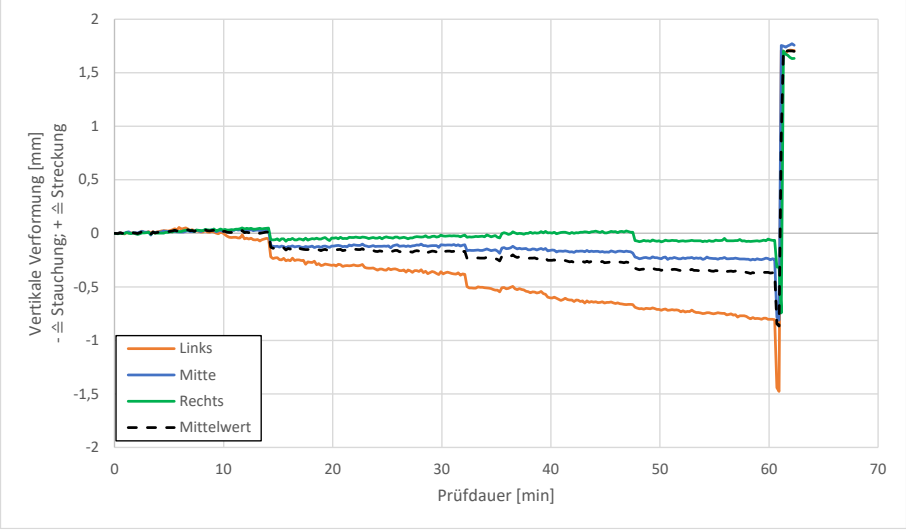


Abb. G. 3: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

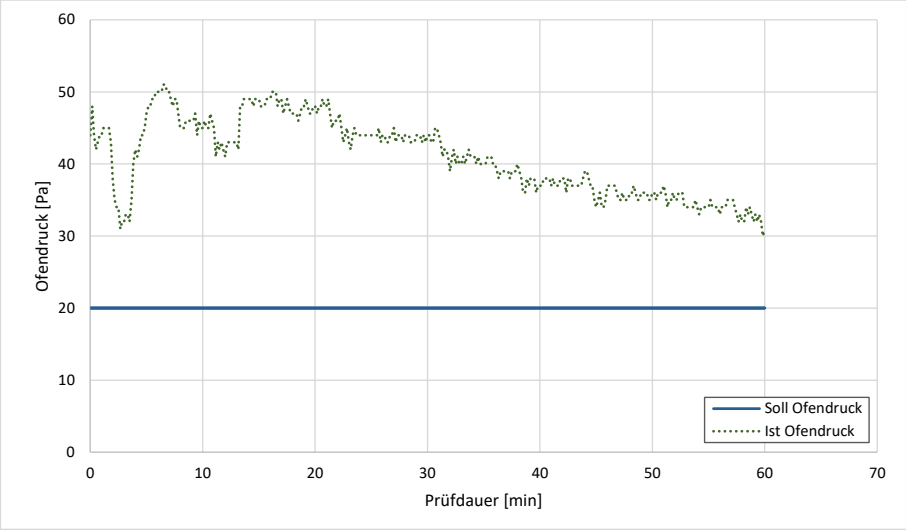


Abb. G. 4: Ofendruck während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

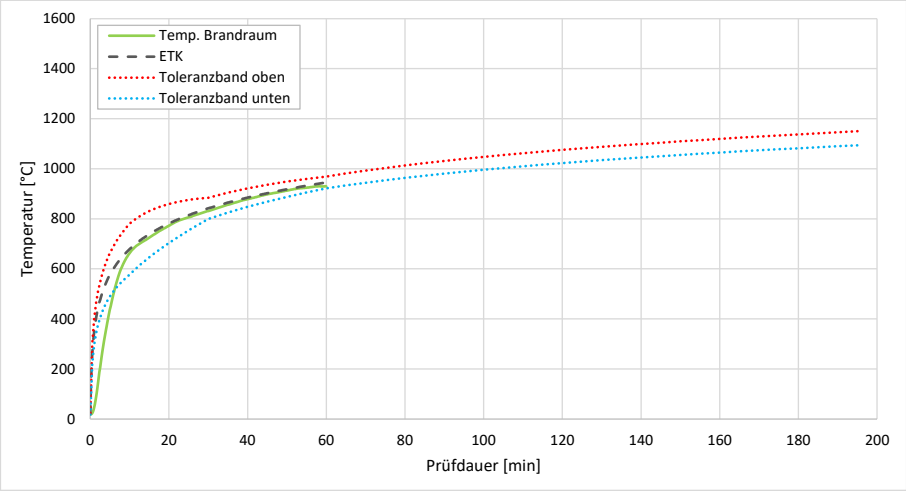


Abb. G. 5: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

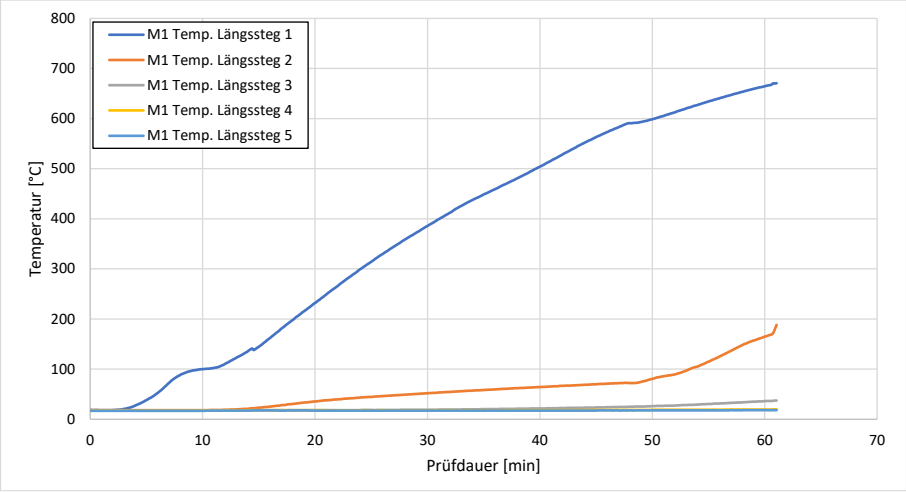


Abb. G. 6: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

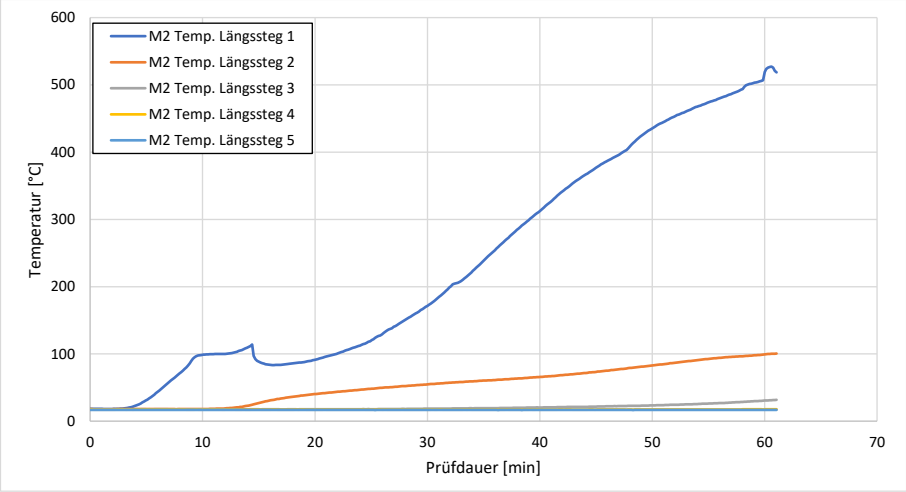


Abb. G. 7: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

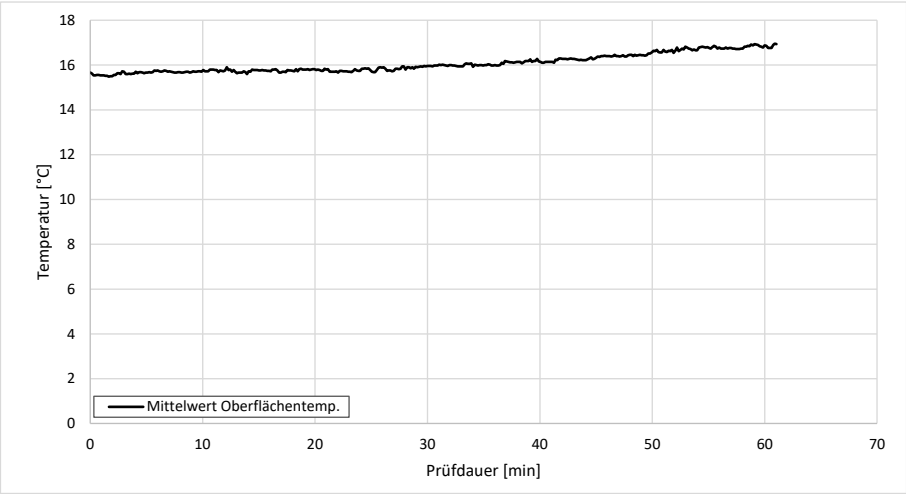


Abb. G. 8: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C1-MZ70-365mm-850kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	20.10.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 3	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	6	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (850 kN)
0	Beginn Brandversuch
0	Beim anfahren der Prüflast Riss auf der Kaltseite entstanden
13	Knackgeräusche, Rauchaustritt vorne seitlich, da nicht korrekt abgedichtet
14	Risse in der Wandmitte entstanden (754 °C)
34	Putz unterer rechter Wandbereich abgefallen (973 °C); Risse werden breiter (862 °C)
59	Knackgeräusche (933 °C)
60	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.2 C2-MZ70-365mm-700kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

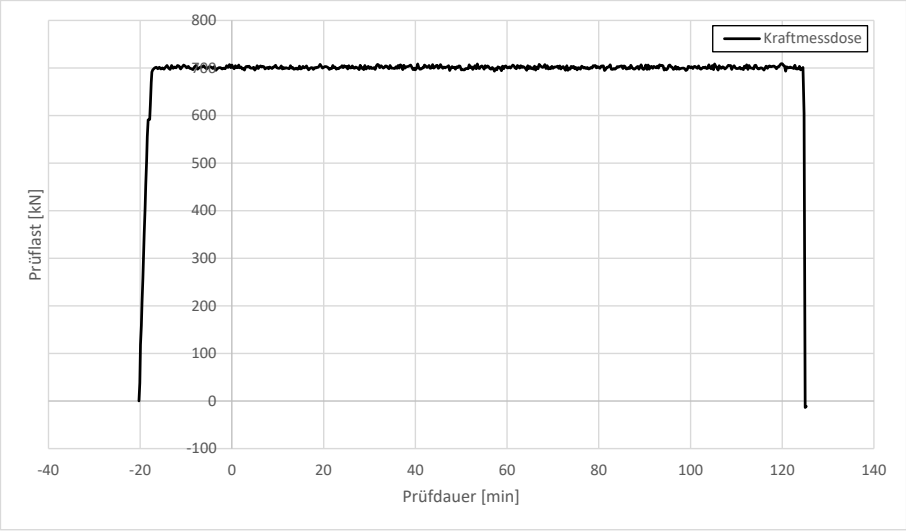


Abb. G. 9: Prüflast über die Prüfdauer C2-MZ70-365mm-700kN

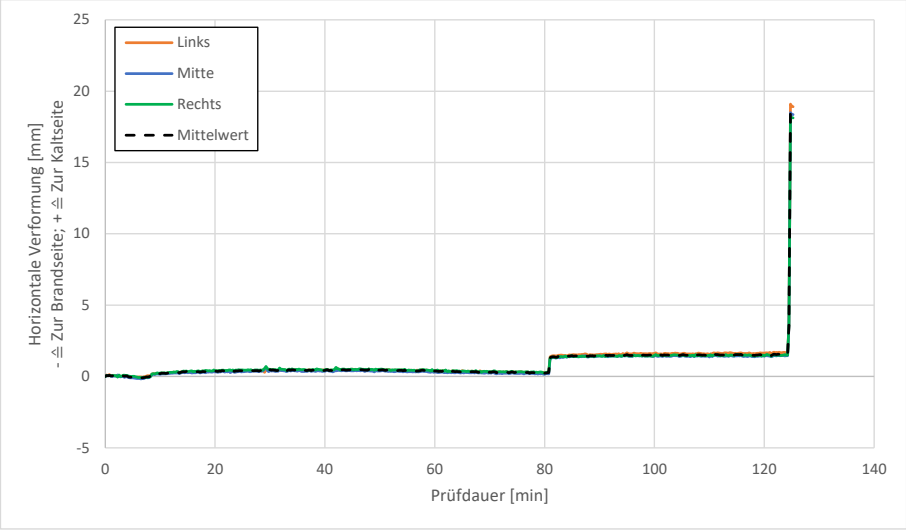


Abb. G. 10: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

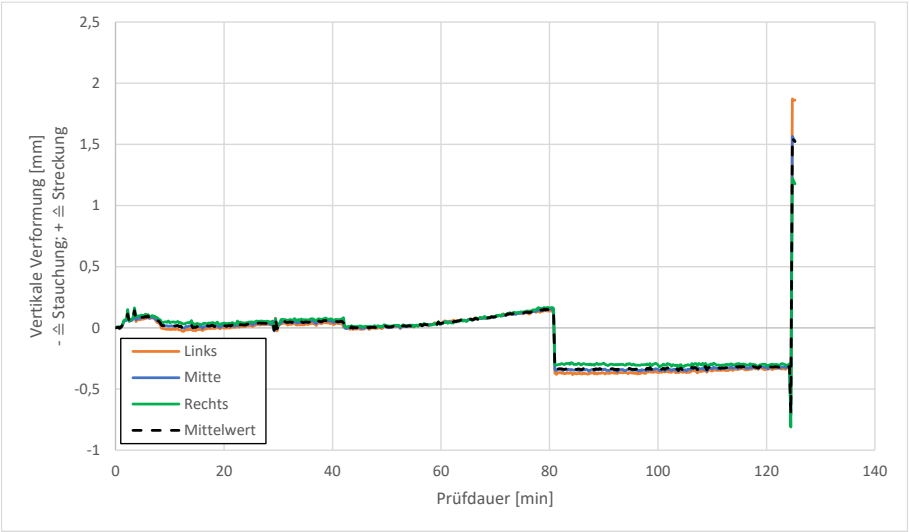


Abb. G. 11: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

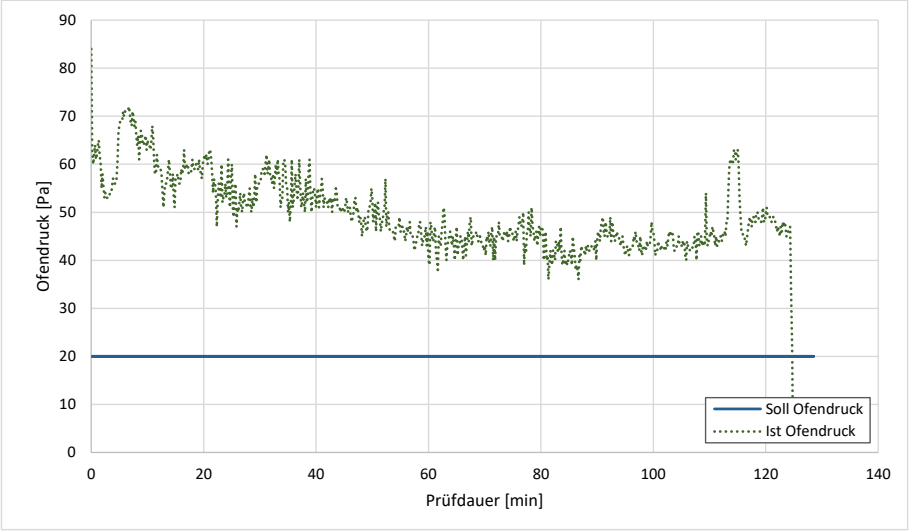


Abb. G. 12: Ofendruck während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

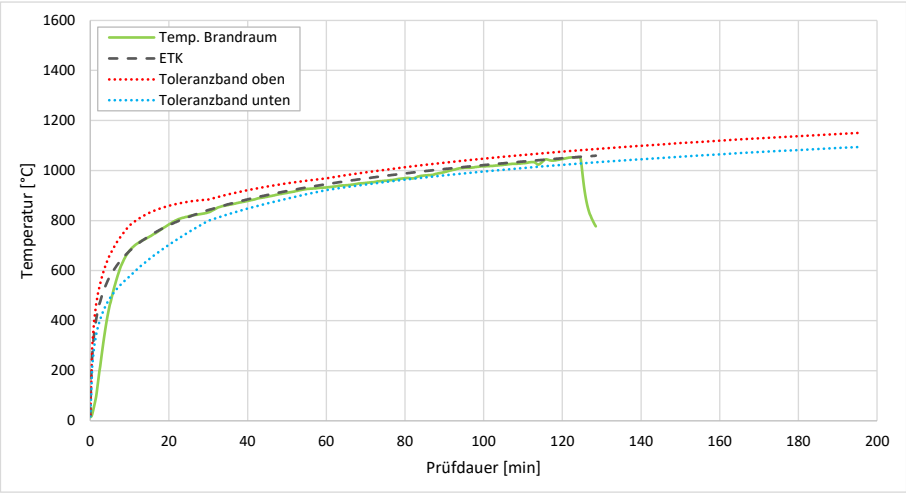


Abb. G. 13: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

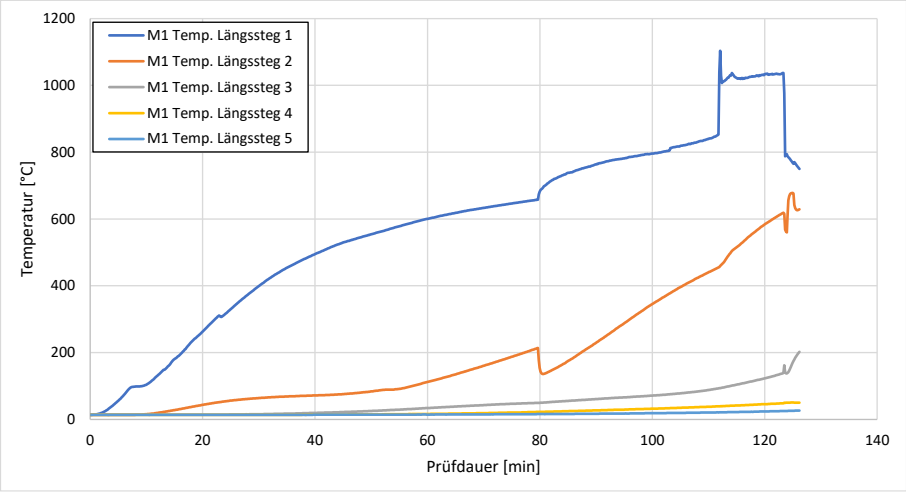


Abb. G. 14: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

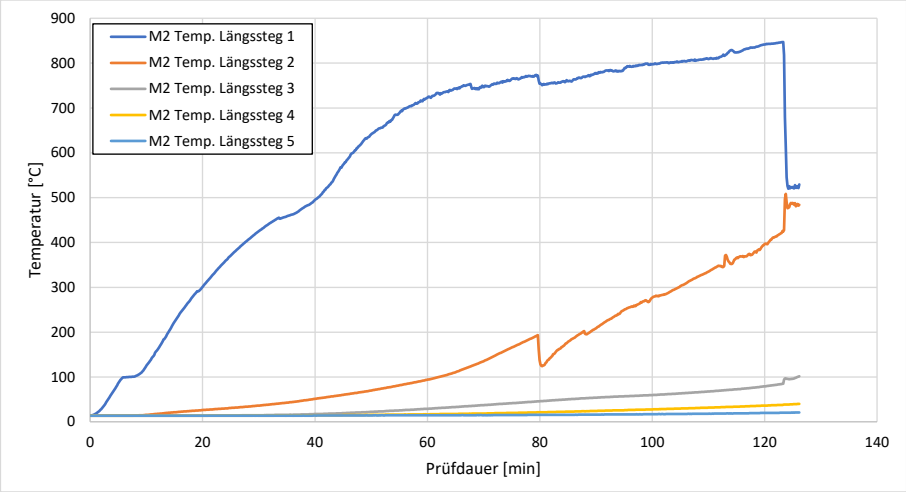


Abb. G. 15: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

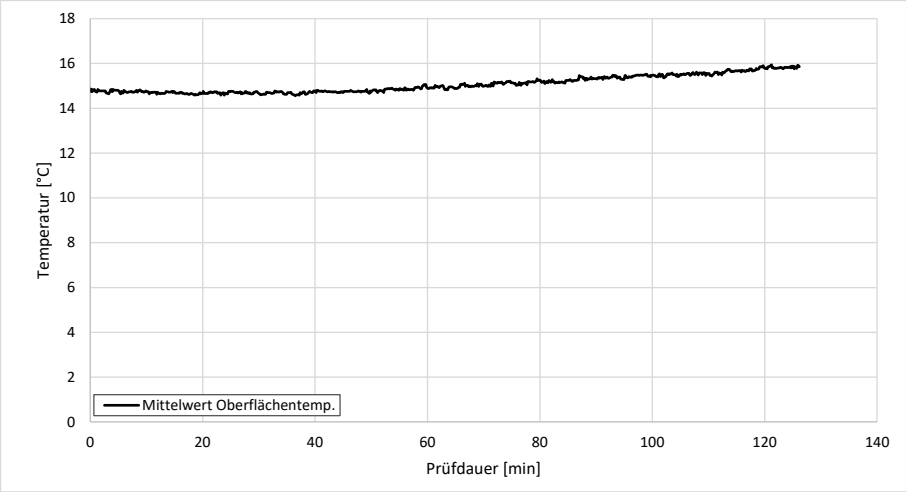


Abb. G. 16: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C2-MZ70-365mm-700kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	07.11.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 4	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	10	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (700 kN)
0	Beginn Brandversuch
0	Knackgeräusche beim Aufbringen der Prüflast
7	Knackgeräusche
25	Keine Schäden sichtbar
30	Schmaler Riss in der Mitte der Wand und unten (855 °C)
42	Risse breiter (892 °C)
80	Bruch Putz Brandseite, Putz noch dran (975 °C)
112	Mittlerer und oberer Wandbereich Putz ab (1039 °C)
123	Ziegelscherben fallen ab
124	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.3 C3-MZ70-365mm-512kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. Die negativen Prüflasten resultieren vermutlich aus dem Versuchsaufbau, weil dort nur eine Kraftmessdose für drei Pressen verwendet wird.

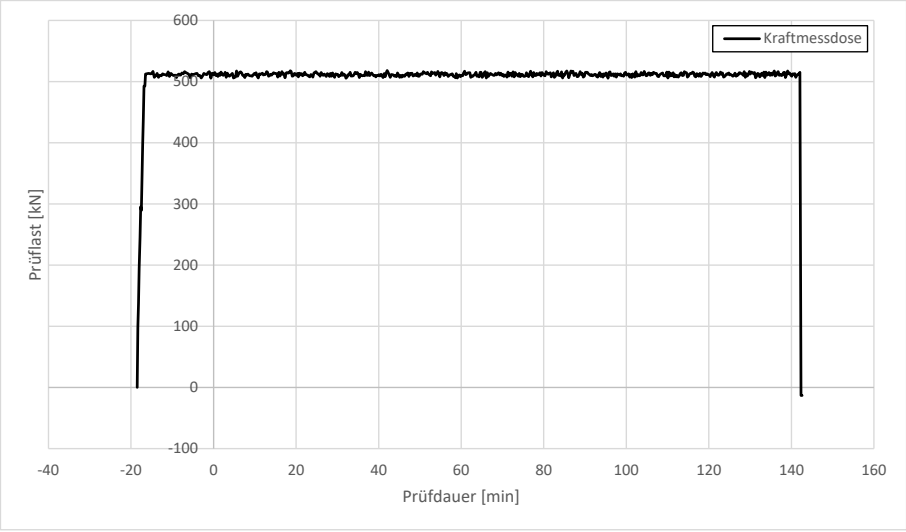


Abb. G. 17: Prüflast über die Prüfdauer C3-MZ70-365mm-512kN

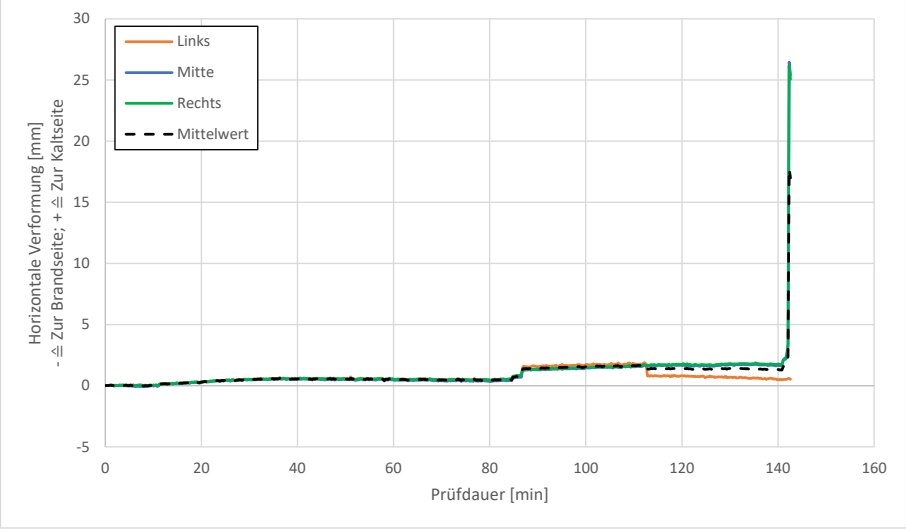


Abb. G. 18: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

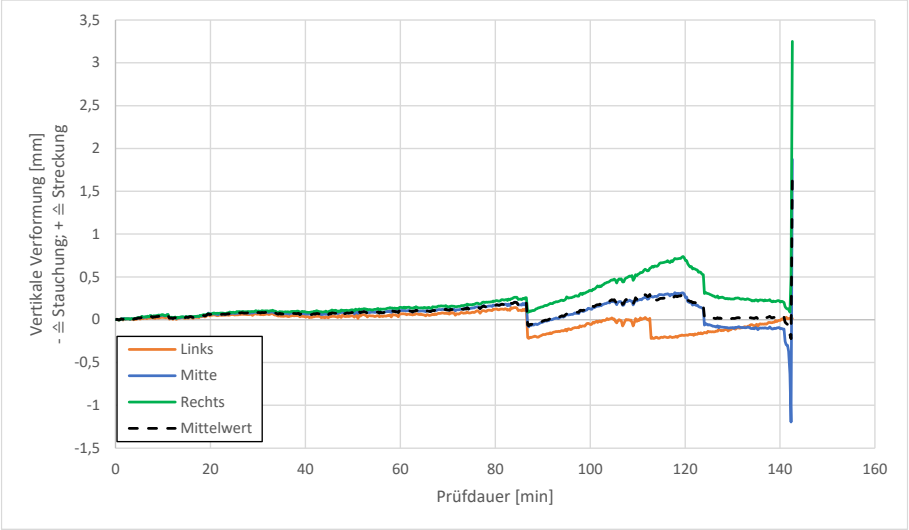


Abb. G. 19: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

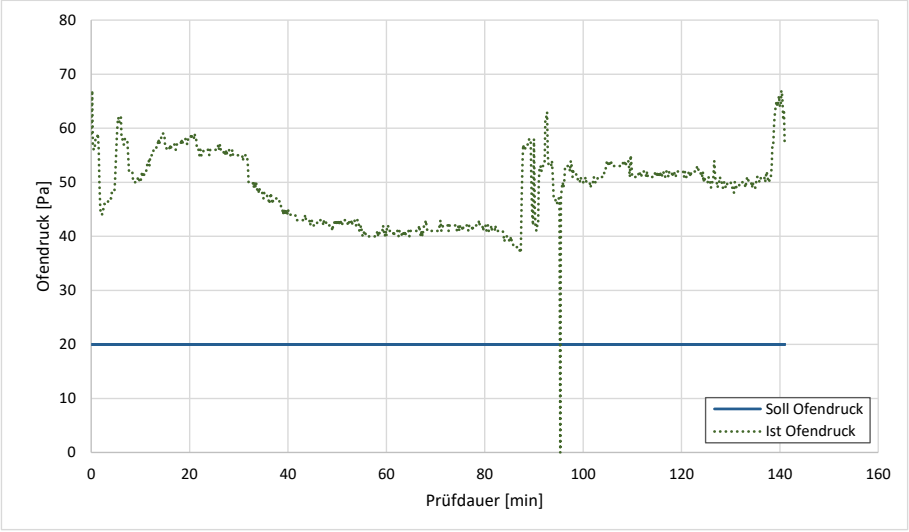


Abb. G. 20: Ofendruck während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

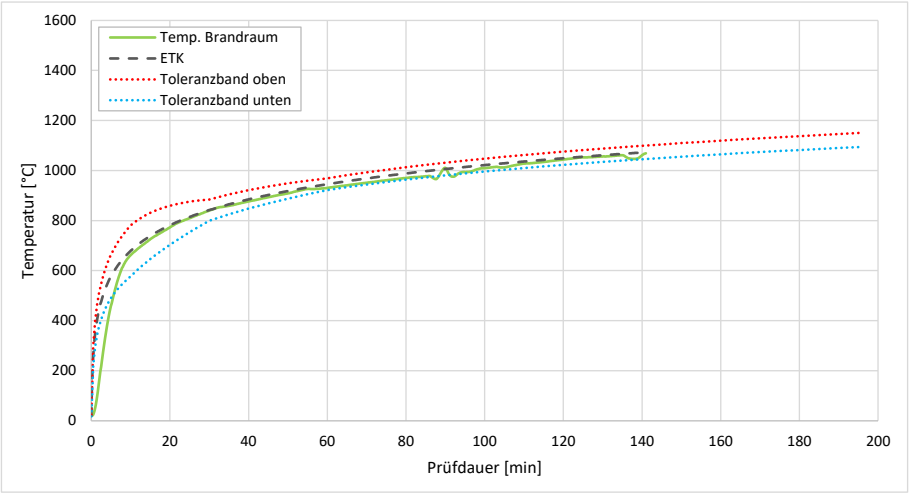


Abb. G. 21: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

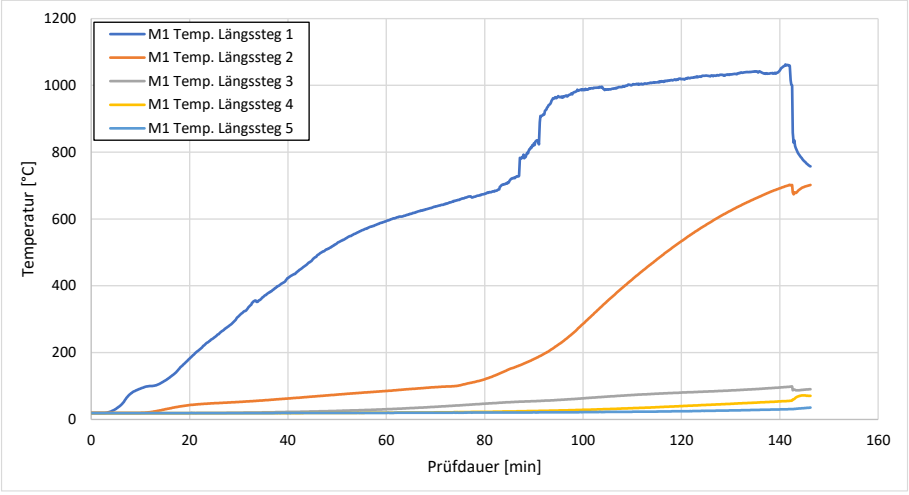


Abb. G. 22: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

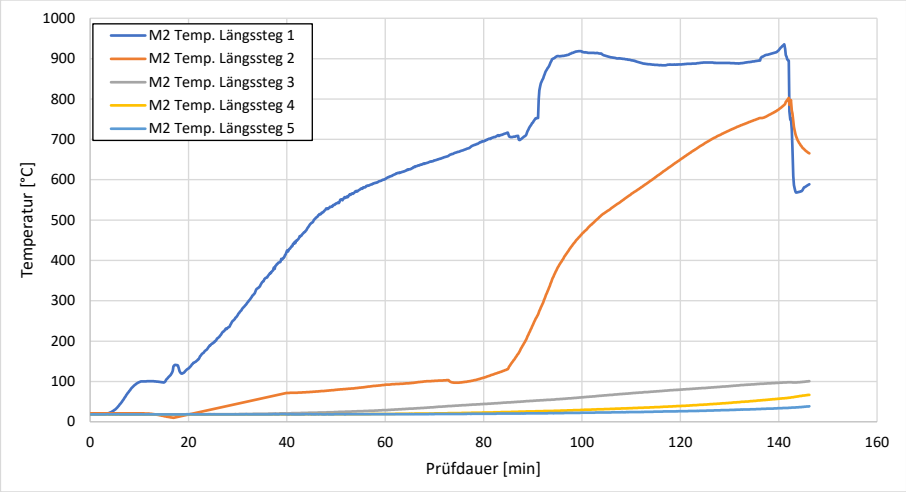


Abb. G. 23: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

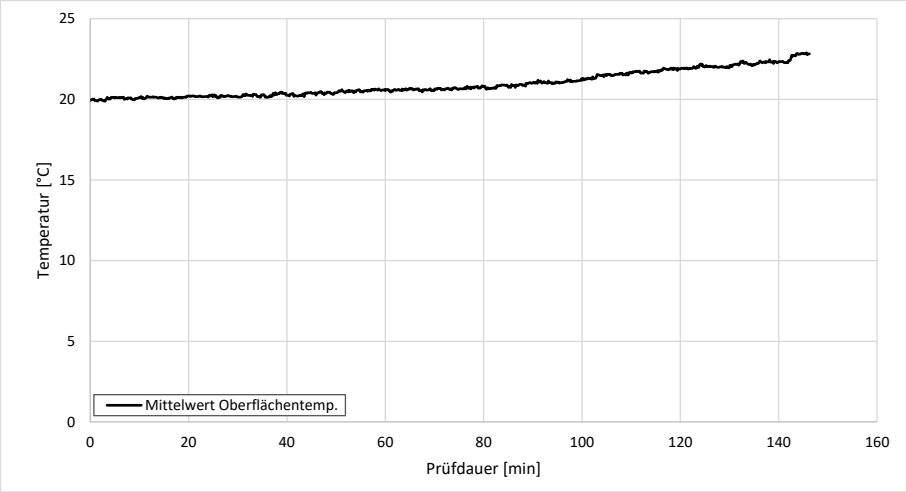


Abb. G. 24: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C3-MZ70-365mm-512kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	18.10.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 2	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	5	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (512 kN)
0	Beginn Brandversuch
30	Keine sichtbaren Schäden
60	Keine sichtbaren Schäden
86	Riss in Putz und Wand im oberen Wandbereich (883 °C)
89	Abplatzung von Ziegelscherben in der Wandmitte (991 °C)
111	Knackgeräusche (1035 °C)
129	Weitere Knackgeräusche (1061 °C)
141	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.4 C4-MZ70-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

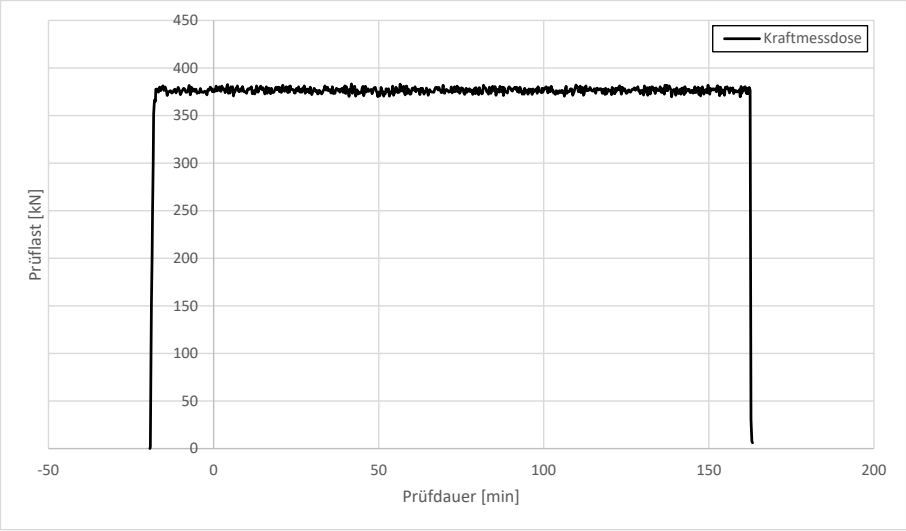


Abb. G. 25: Prüflast über die Prüfdauer C4-MZ70-365mm-375kN

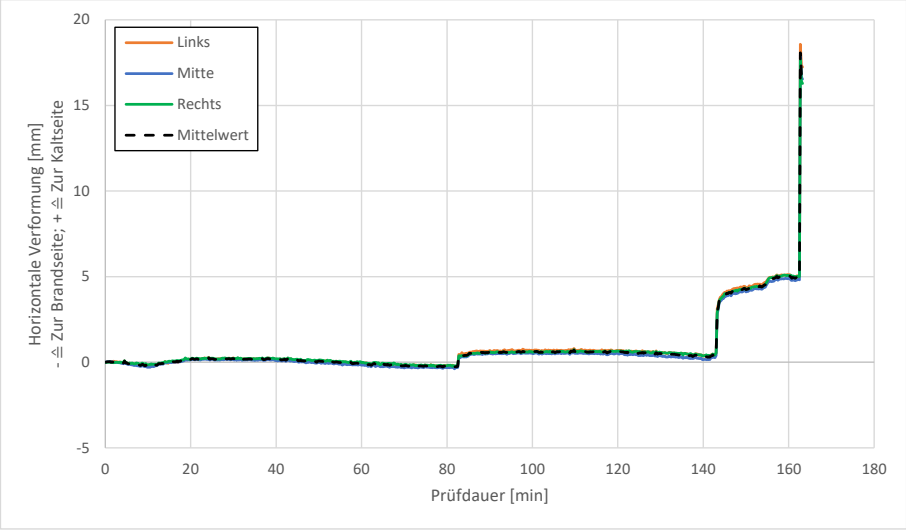


Abb. G. 26: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

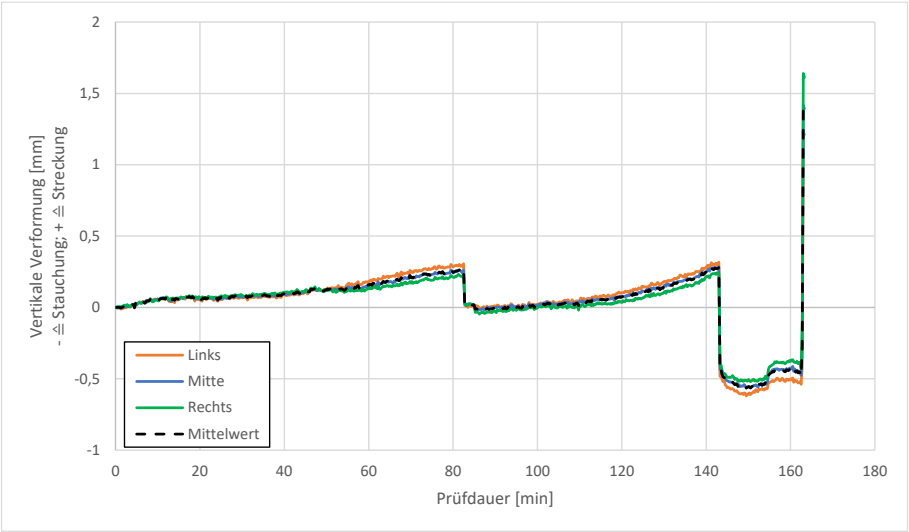


Abb. G. 27: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

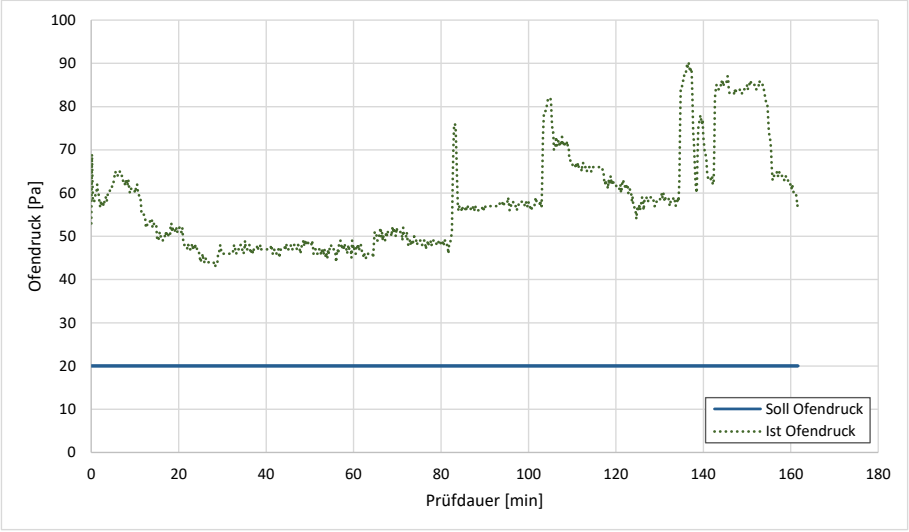


Abb. G. 28: Ofendruck während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

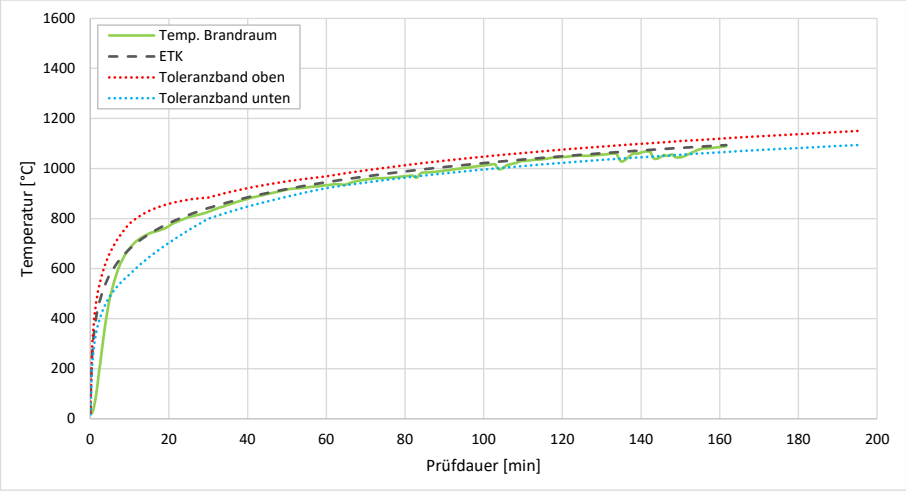


Abb. G. 29: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

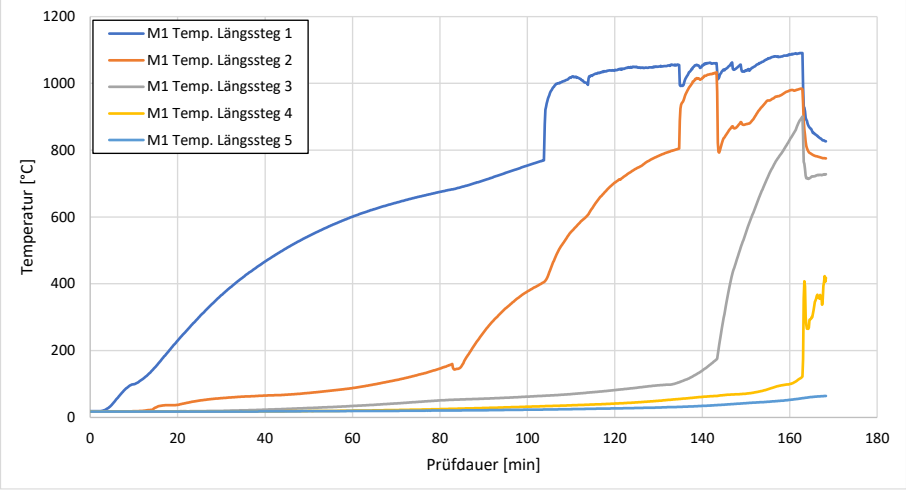


Abb. G. 30: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

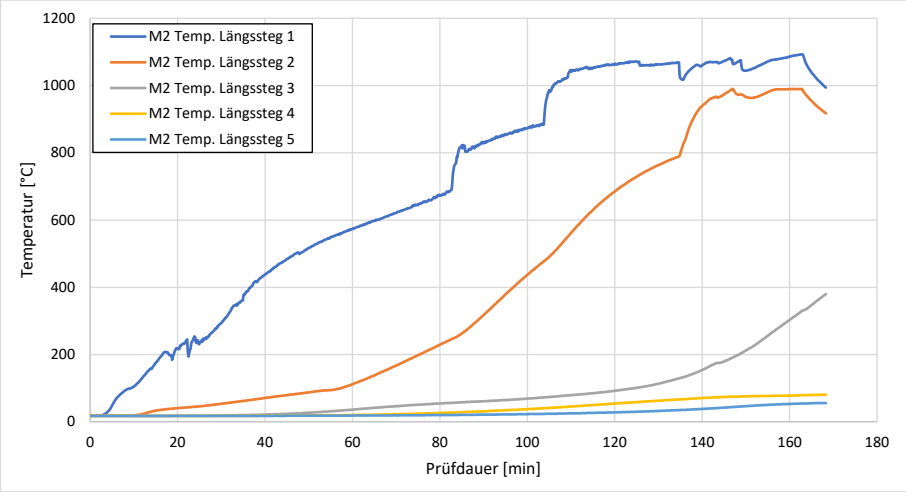


Abb. G. 31: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

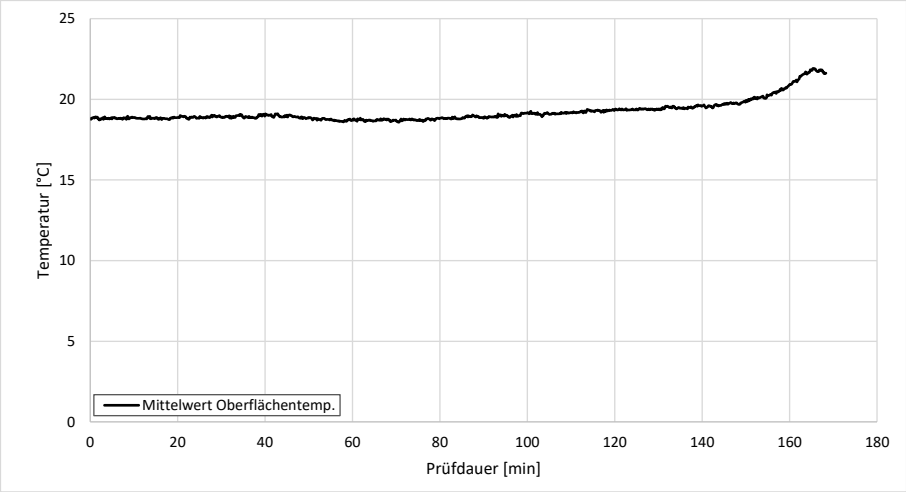


Abb. G. 32: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C4-MZ70-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	14.10.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer Wand 1	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	4	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
16	Schmaler Riss im Putz in Wandmitte rechts (753 °C)
26	Riss breiter (820 °C)
76	Riss unterer Wandbereich (967 °C)
81	Putz unterer rechter Wandbereich abgefallen (973 °C)
84	Ziegelscherben unterer Wandbereich fallen ab, oberer Wandbereich Riss (982 °C)
89	Oberer rechter Wandbereich Putzschicht abgefallen (993 °C)
102	Putzschicht kompletter Wandbereich ab, weitere Ziegelnscherben fallen ab (1017 °C)
140	Starke Knackgeräusche (1073 °C)
147	Schmaler Riss auf der Kaltseite oberer linker Wandbereich
160	Rauchaustritt, seitlich bei Dämmung, da Wand fast kaputt
161	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.5 C5-W07 V-365mm-512kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. Die negativen Prüflasten resultieren vermutlich aus dem Versuchsaufbau, weil dort nur eine Kraftmessdose für drei Pressen verwendet wird.

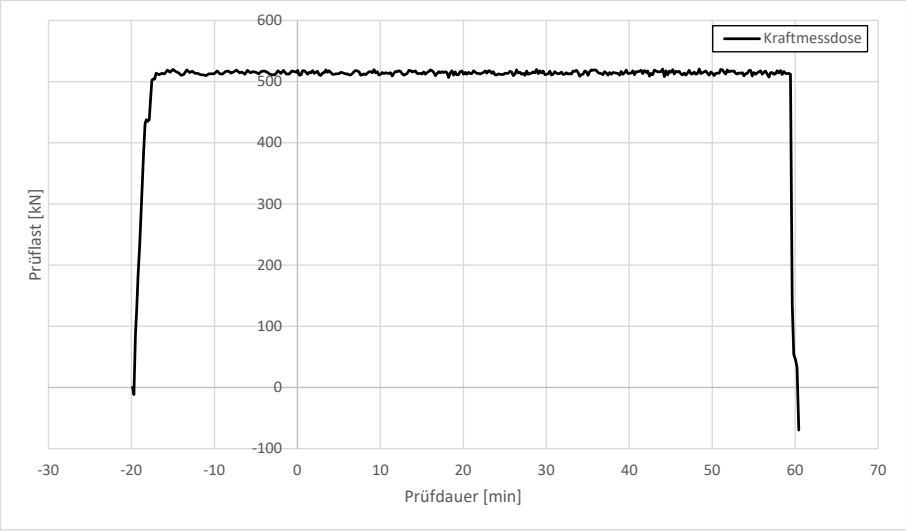


Abb. G. 33: Prüflast über die Prüfdauer C5-W07 V-365mm-512kN

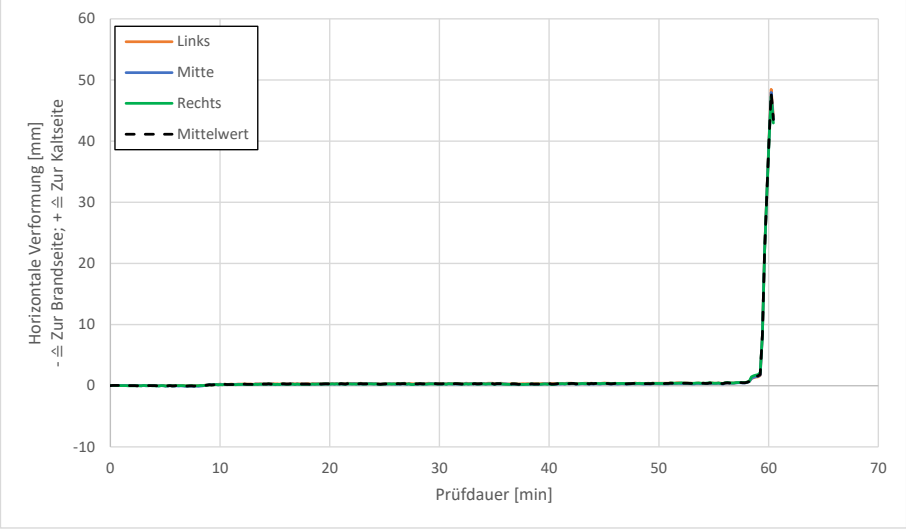


Abb. G. 34: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

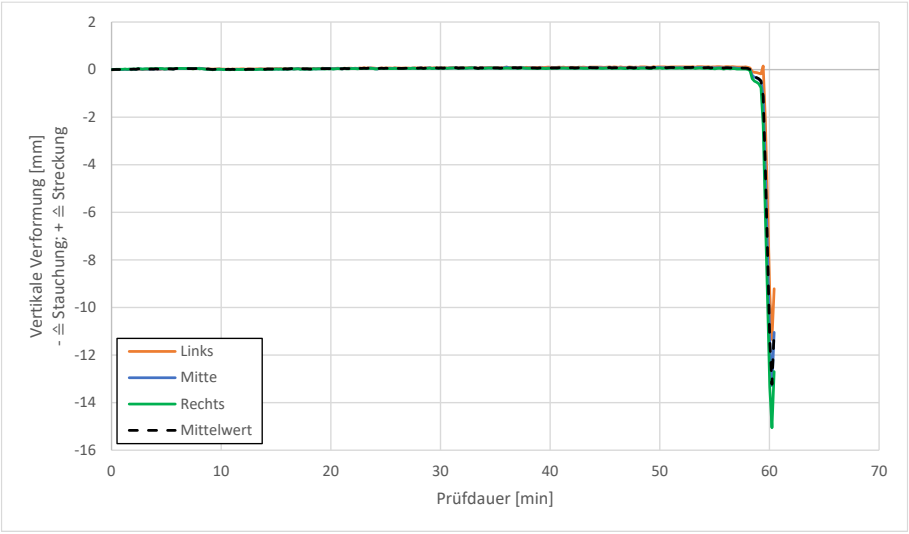


Abb. G. 35: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

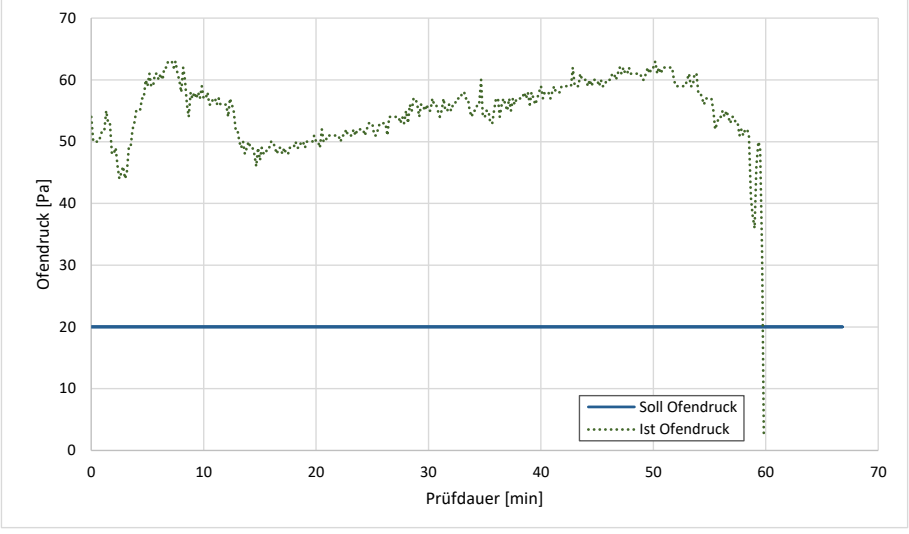


Abb. G. 36: Ofendruck während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

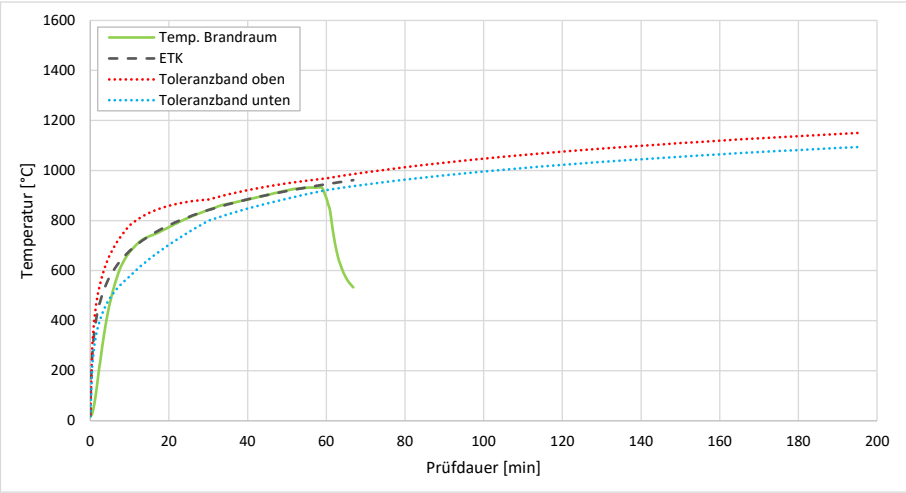


Abb. G. 37: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

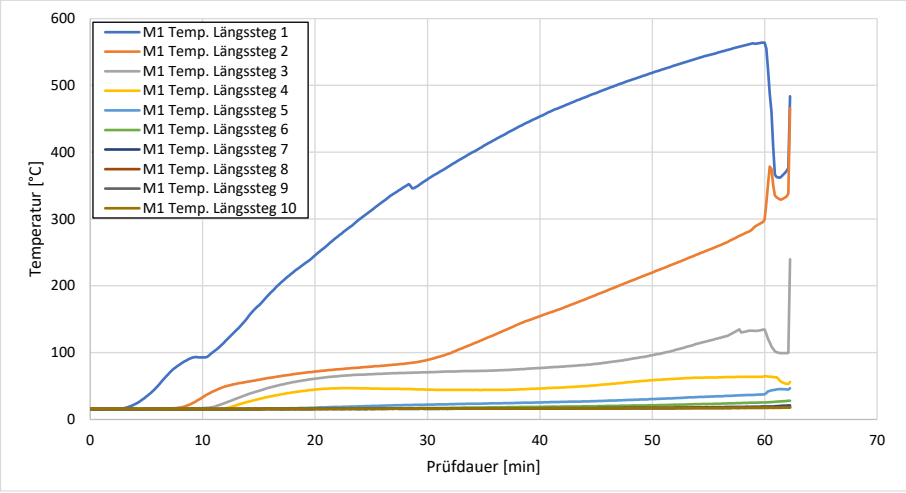


Abb. G. 38: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

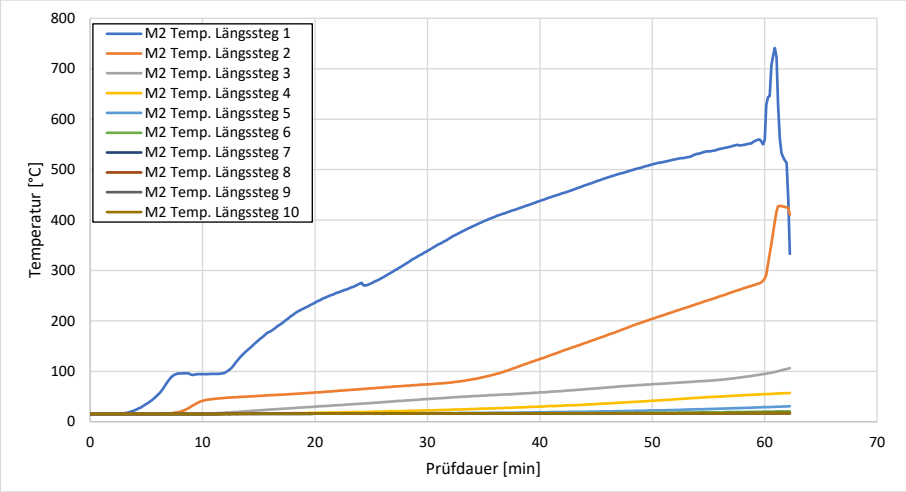


Abb. G. 39: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

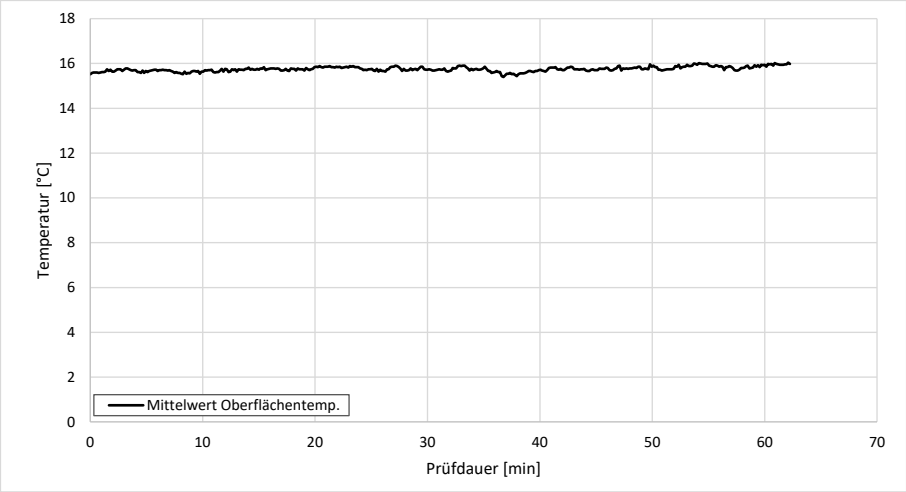


Abb. G. 40: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C5-W07 V-365mm-512kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	27.09.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 2	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	2	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (512 kN)
0	Beginn Brandversuch
17	Kleine Risse im unteren Wandbereich (760 °C)
20	Riss unterer Wandbereich breiter (795 °C)
32	Riss unterer Wandbereich breiter (860 °C), oberer und unterer Wandbereich keine Schäden sichtbar
40	Mittlerer Wandbereich schmaler Riss (890 °C)
52	Unterer Wandbereich Riss sehr breit (925°C)
56	Putz unterer Wandbereich ab (935 °C)
57	Die ersten Ziegelscherben fallen ab (935 °C)
58	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.6 C6-W07 V-365mm-460kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

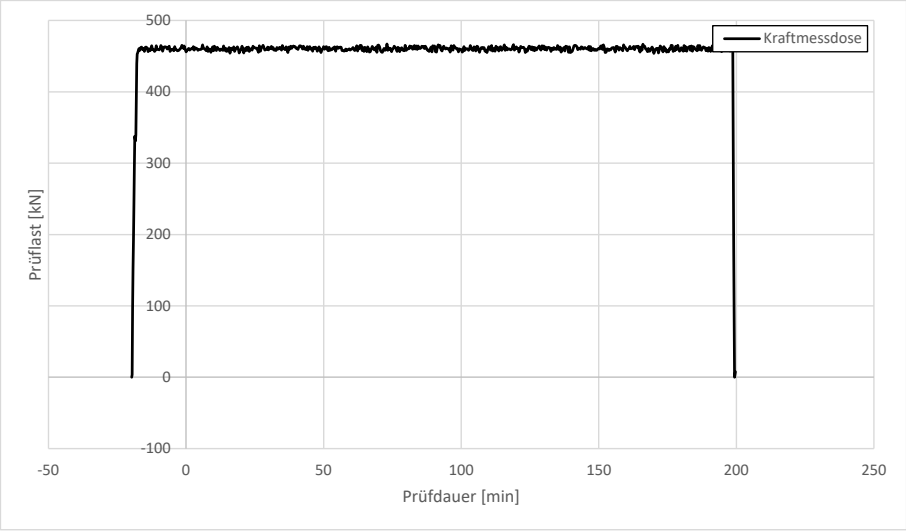


Abb. G. 41: Prüflast über die Prüfdauer C6-W07 V-365mm-460kN

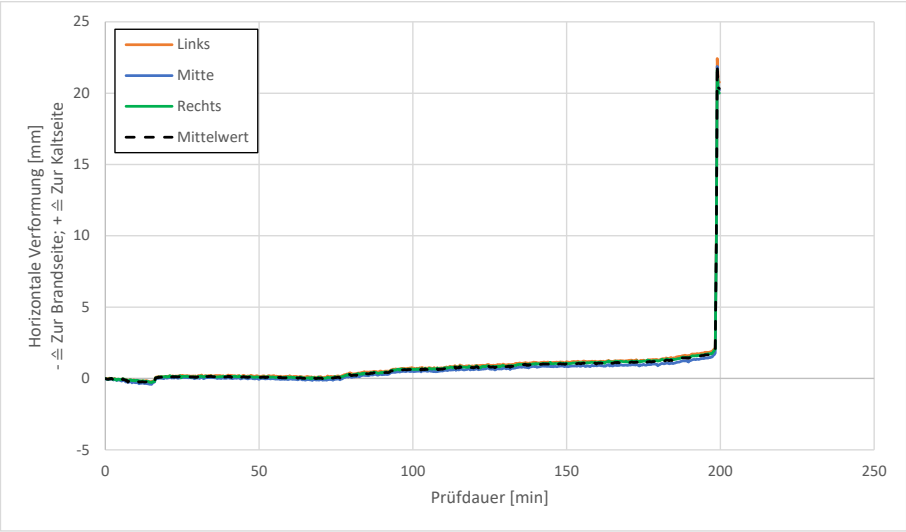


Abb. G. 42: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

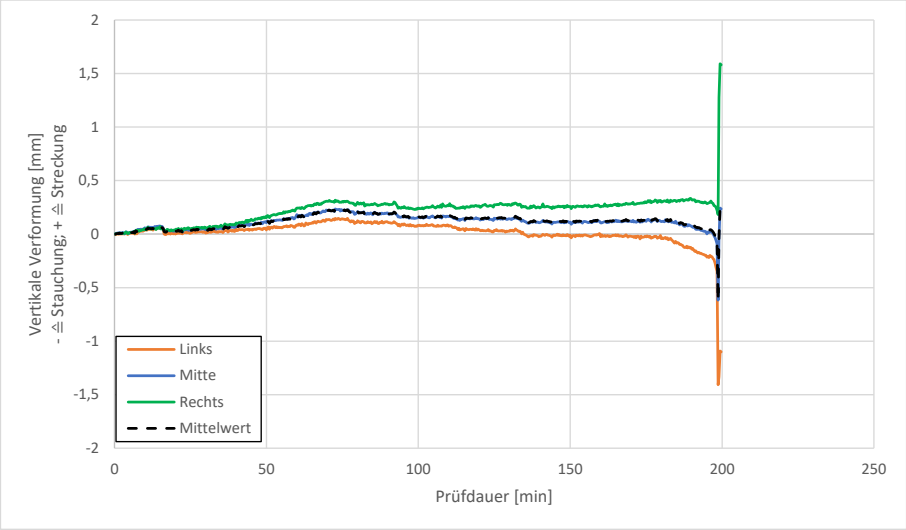


Abb. G. 43: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

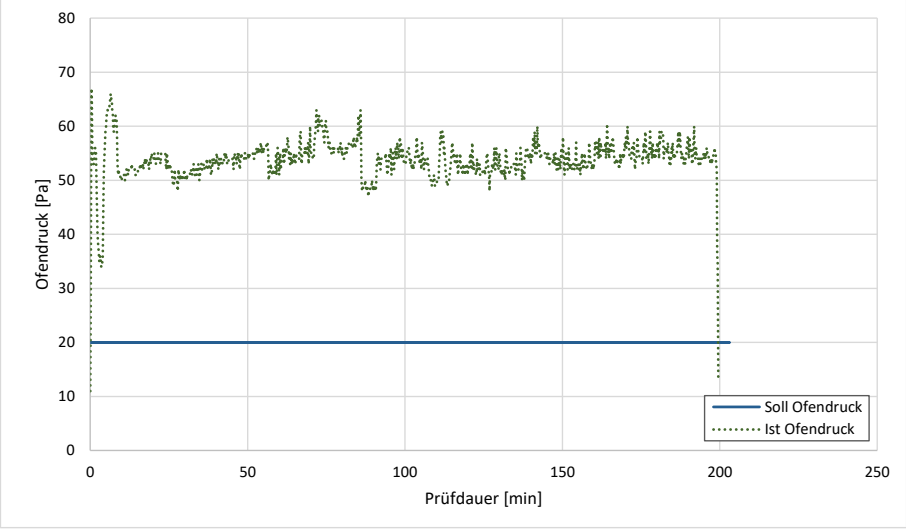


Abb. G. 44: Ofendruck während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

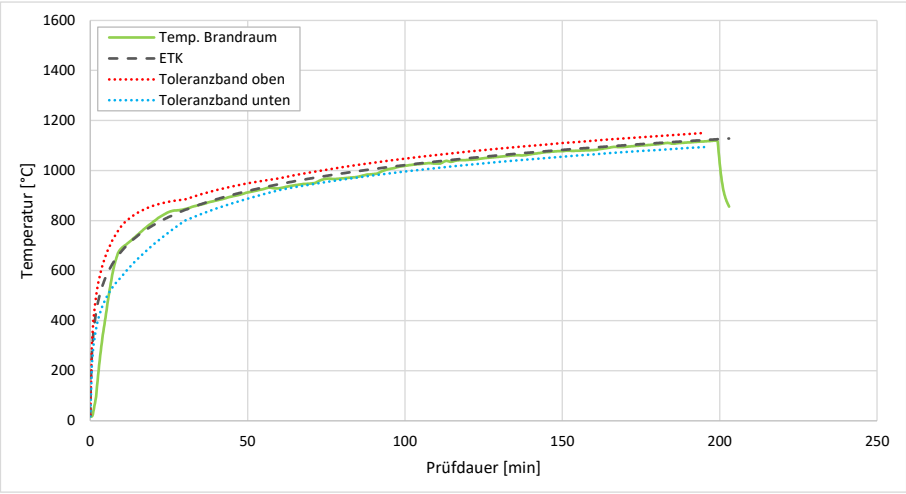


Abb. G. 45: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

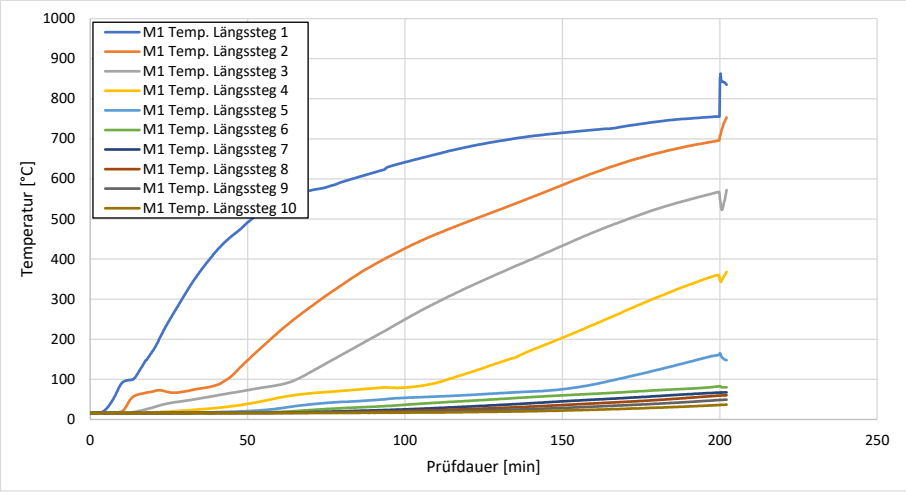


Abb. G. 46: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

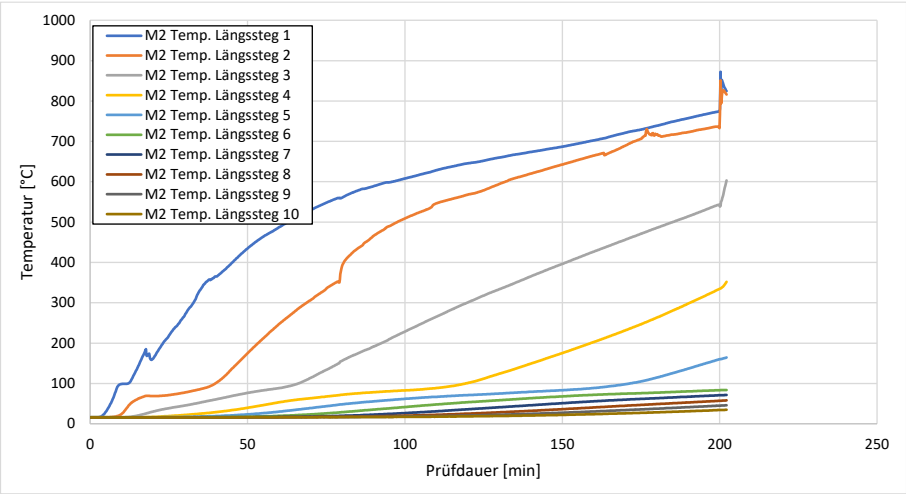


Abb. G. 47: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

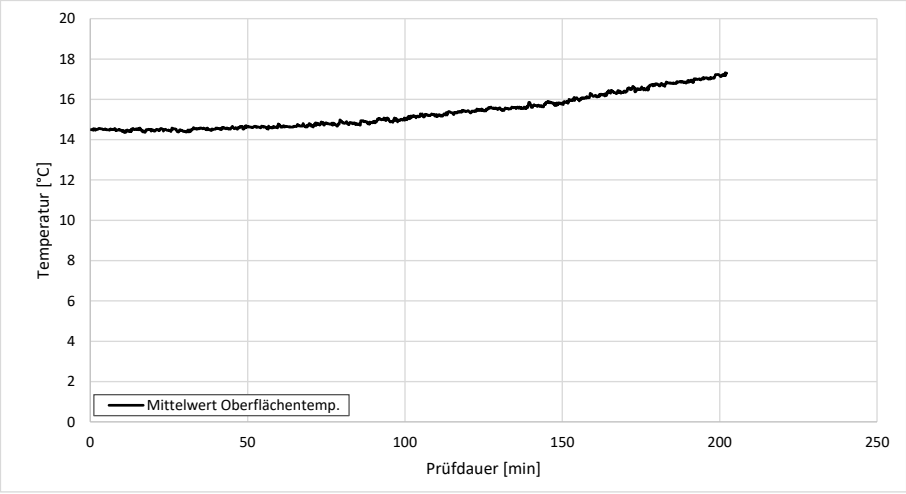


Abb. G. 48: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C6-W07 V-365mm-460kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	11.11.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 4	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	11	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (460 kN)
0	Beginn Brandversuch
18	Breiter Riss unterer Wandbereich (800 °C)
37	Riss unterer Wandbereich breiter (875 °C)
71	Riss unterer Wandbereich breiter (954 °C)
94	Riss unterer Wandbereich breiter (1006 °C)
123	Riss unterer Wandbereich sehr breit (1115 °C)
183	Riss unterer Wandbereich sehr breit (1050 °C)
198	Putz und Ziegelscherben fallen ab (1120 °C)
198	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.7 C7-W07 V-365mm-425kN

Aufgrund eines vollen Speichers bei der GOM Messung wurden nur Messdaten bis zur Prüfminute 133 aufgezeichnet. Ein Stabilitätsversagen (Knicken) der Wand erfolgte in der Prüfminute 145.

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. Die negativen Prüflasten resultieren vermutlich aus dem Versuchsaufbau, weil dort nur eine Kraftmessdose für drei Pressen verwendet wird.

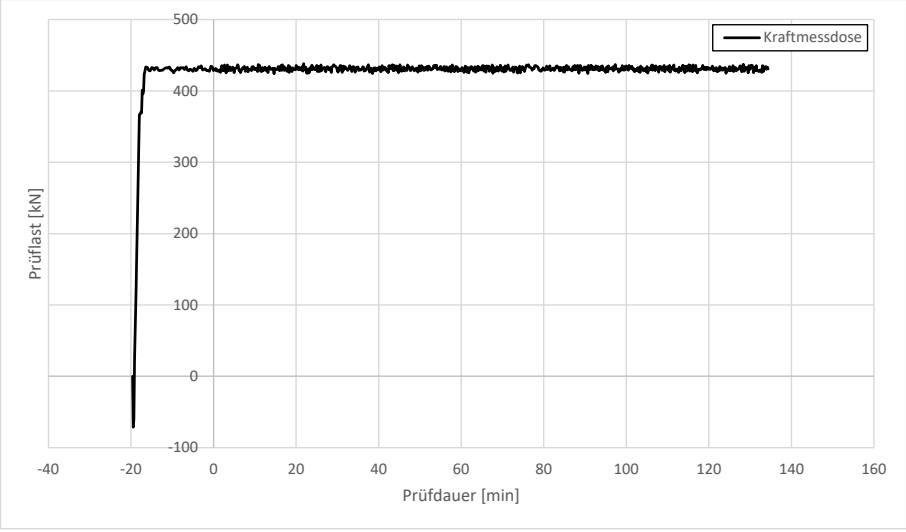


Abb. G. 49: Prüflast über die Prüfdauer C7-W07 V-365mm-425kN

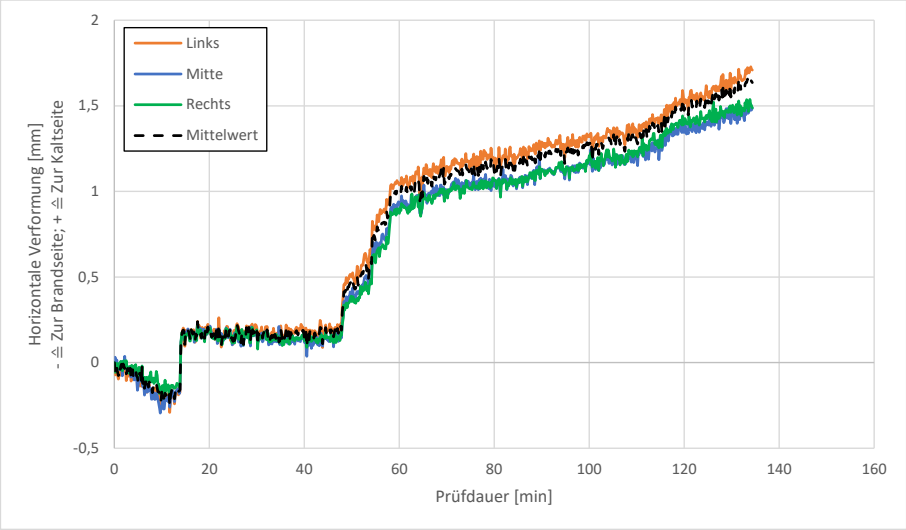


Abb. G. 50: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

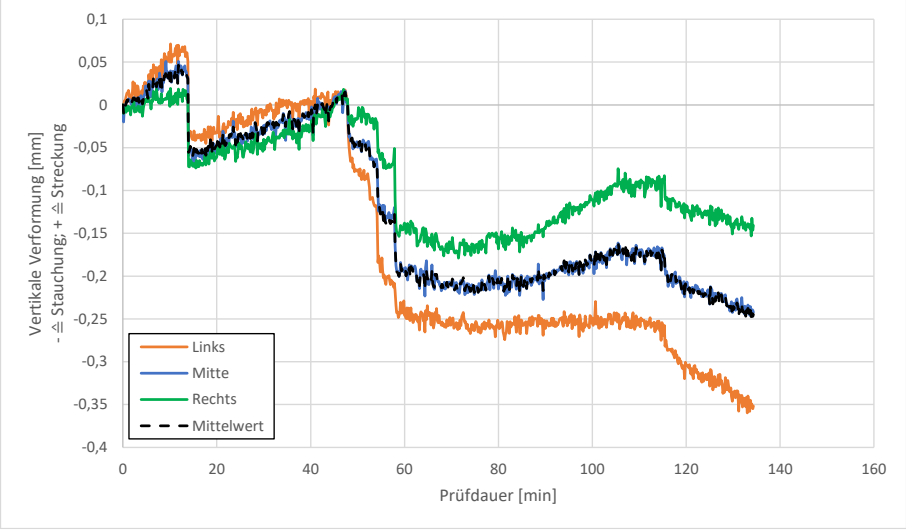


Abb. G. 51: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

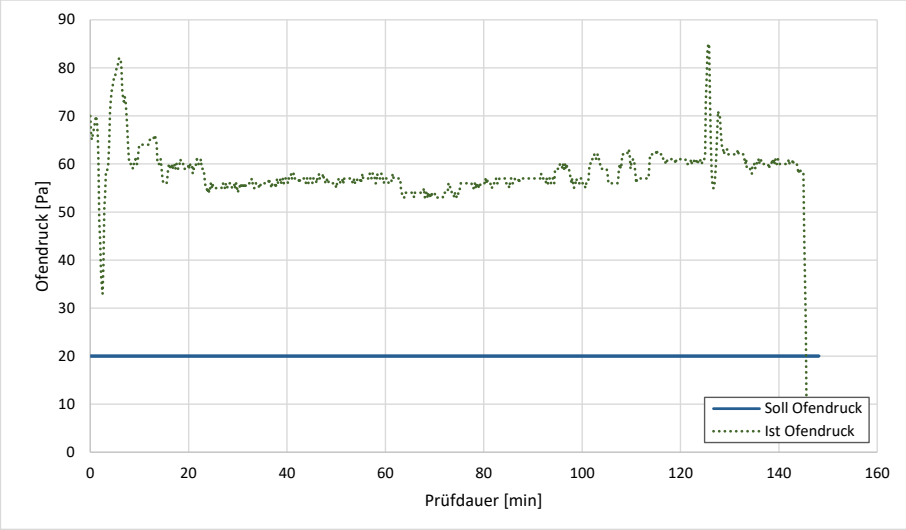


Abb. G. 52: Ofendruck während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

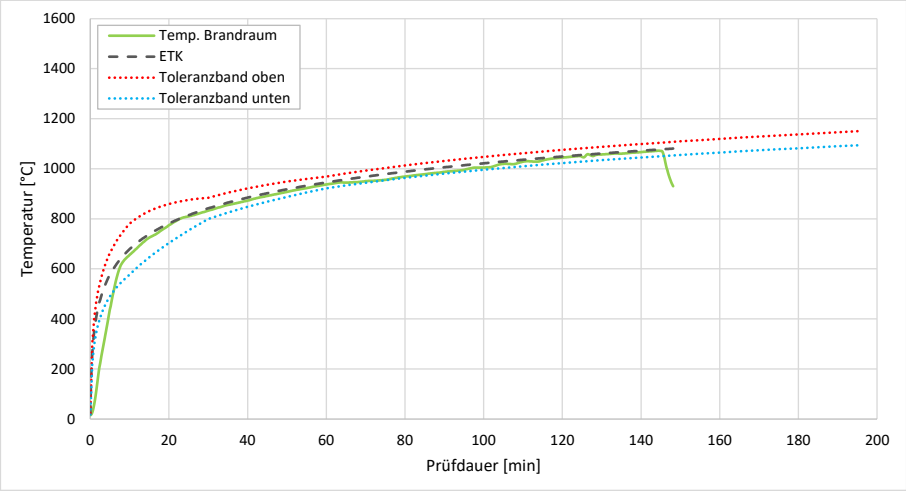


Abb. G. 53: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

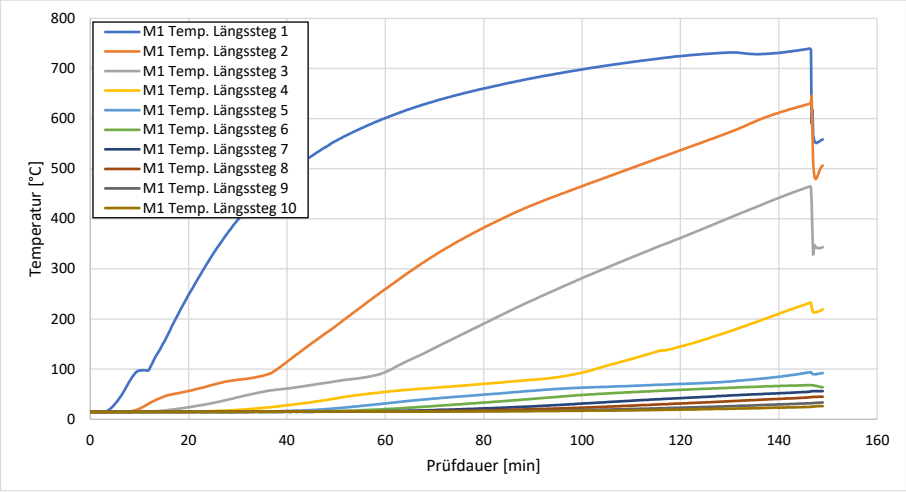


Abb. G. 54: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

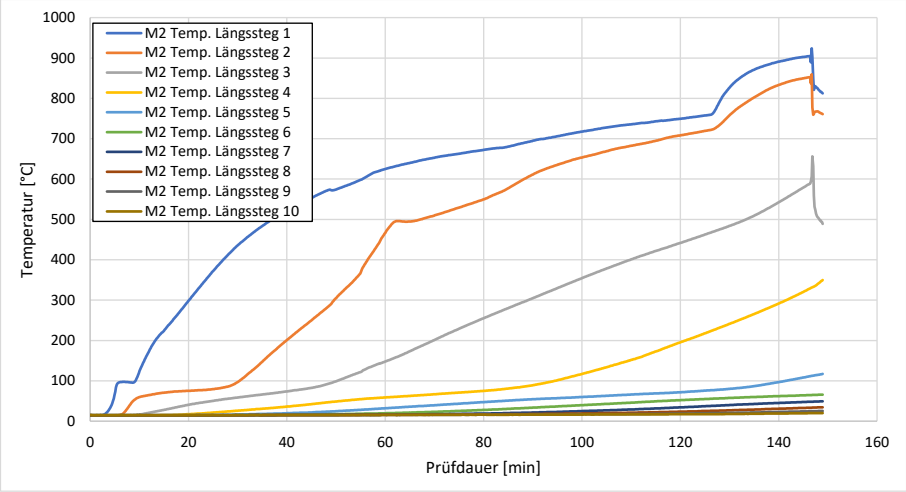


Abb. G. 55: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

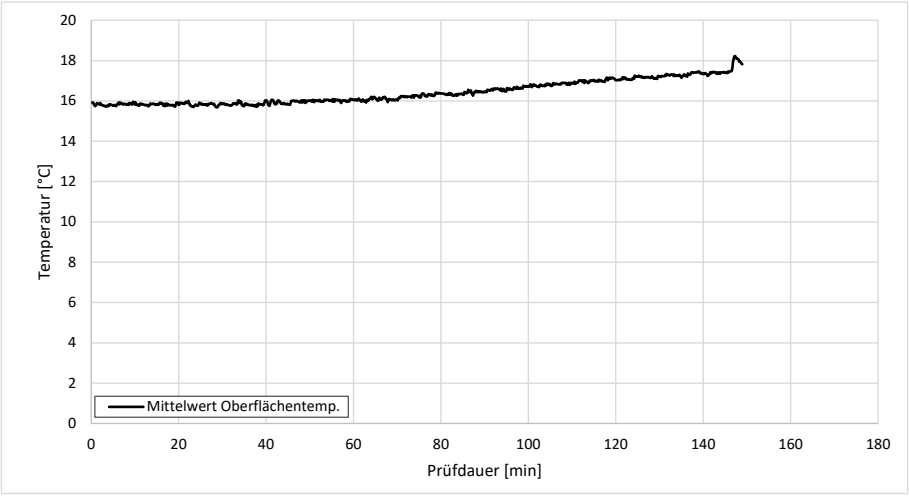


Abb. G. 56: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C7-W07 V-365mm-425kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	29.09.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 3	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	3	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (425 kN)
0	Beginn Brandversuch
12	Keine Schäden sichtbar
15	Riss unterer Wandbereich (745 °C)
25	Keine weiteren Schäden sichtbar (820 °C)
40	Unterer Wandbereich Riss breiter (882 °C)
55	Mittlerer Wandbereich schmaler Riss (930 °C)
59	Unterer Wandbereich Riss breiter (940 °C)
75	Mittlerer Wandbereich Riss breiter
100	Alle Risse breiter (1010 °C)
124	Mittlerer Wandbereich Putz abgefallen (1055 °C)
133	GOM Aufzeichnung zu Ende, Spiecher voll
145	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel (1075 °C)

G.8 C8-W07 V-365mm-365kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. Die negativen Prüflasten resultieren vermutlich aus dem Versuchsaufbau, weil dort nur eine Kraftmessdose für drei Pressen verwendet wird.

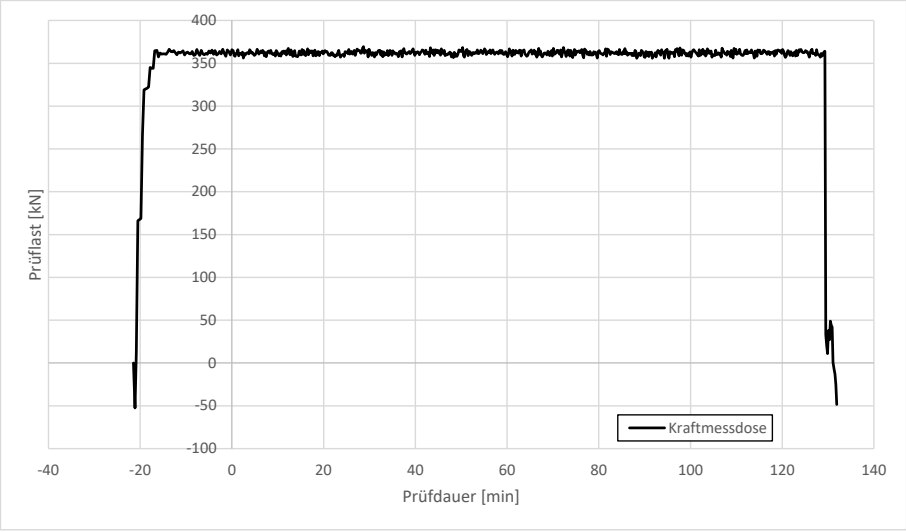


Abb. G. 57: Prüflast über die Prüfdauer C8-W07 V-365mm-365kN

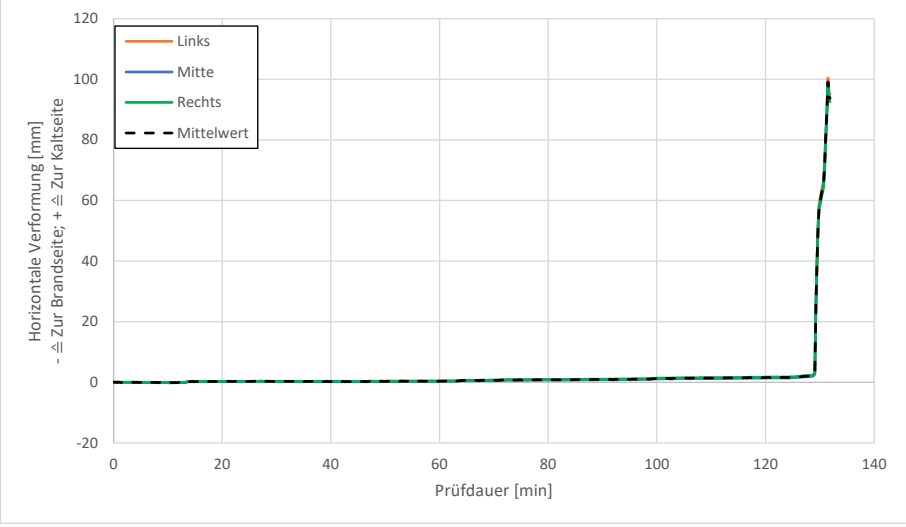


Abb. G. 58: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

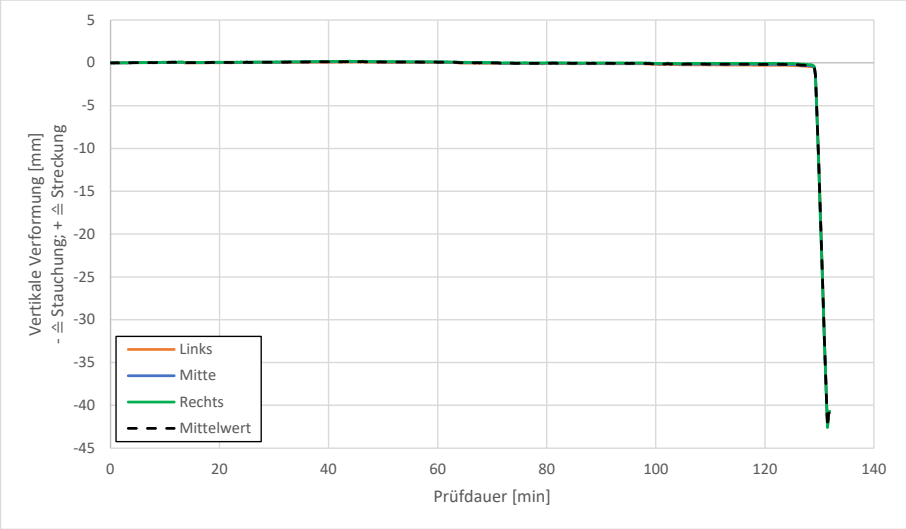


Abb. G. 59: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

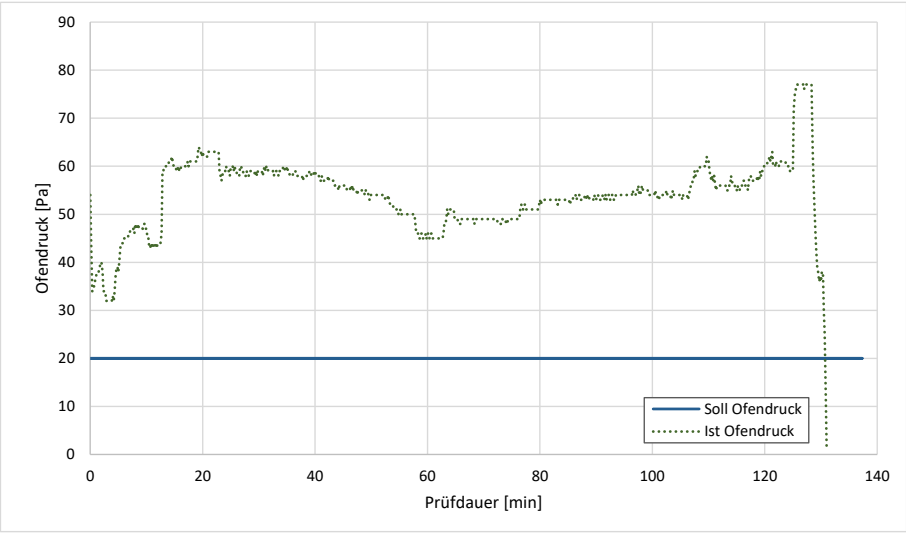


Abb. G. 60: Ofendruck während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

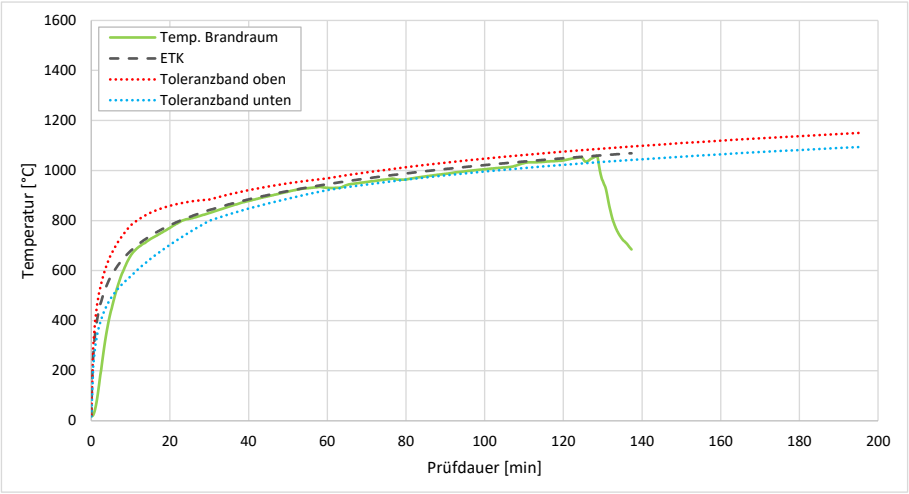


Abb. G. 61: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

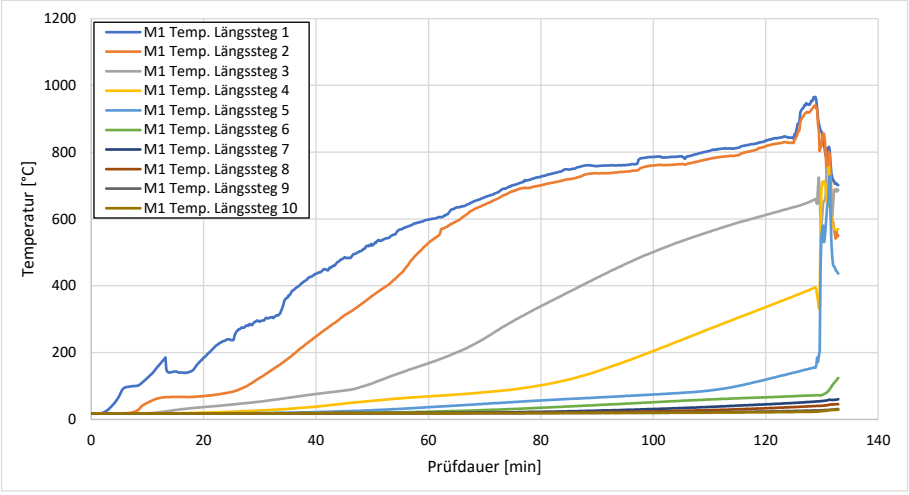


Abb. G. 62: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

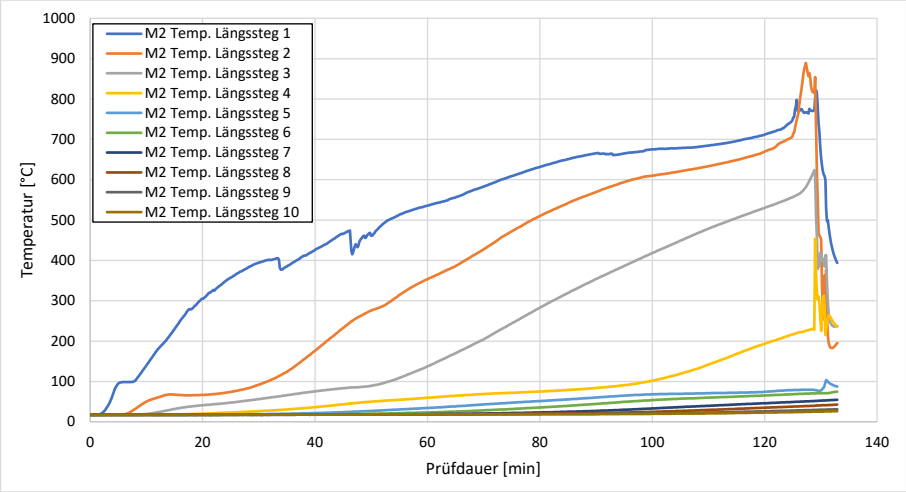


Abb. G. 63: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

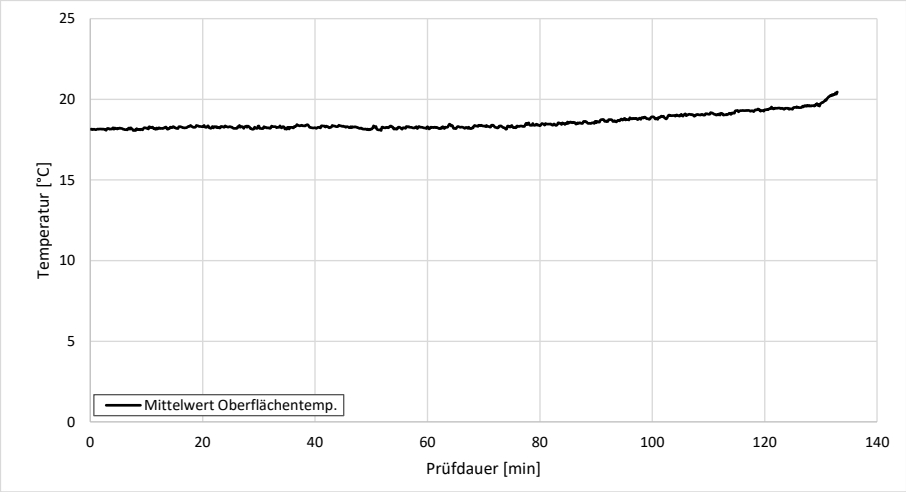


Abb. G. 64: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C8-W07 V-365mm-365kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	20.09.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht verfüllt Wand 1	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	1	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (365 kN)
0	Beginn Brandversuch
13	Riss im mittleren Wandbereich (720 °C)
35	Riss breiter
55	Riss breiter (930 °C)
76	Putzschale fällt im mittleren Wandbereich ab (965 °C), oberer Wandbereich Risse zu sehen
95	Keine weiteren Schäden sichtbar
113	Ziegelscherben in der Wandmitte fallen ab (1037 °C)
125	Putz komplett ab (1057 °C)
126	Weitere Ziegelscherben fallen ab
128	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.9 C9-W07 UV-365mm-512kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

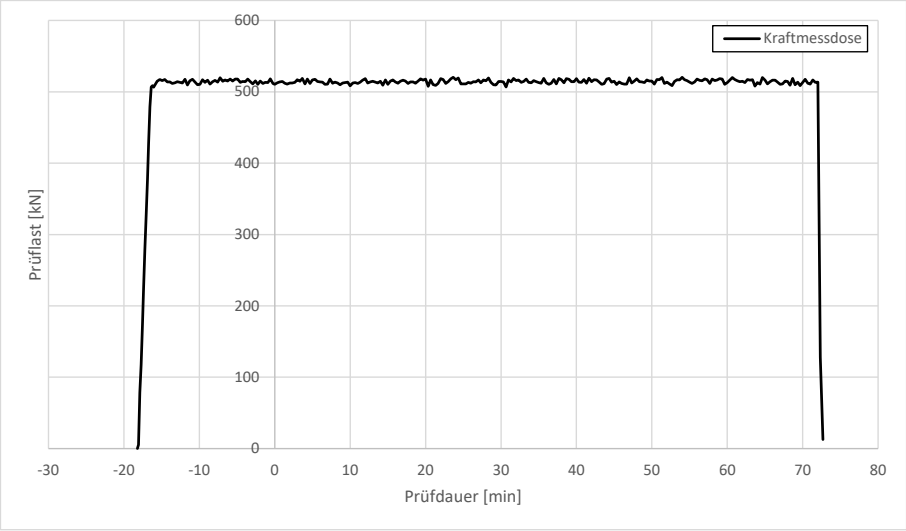


Abb. G. 65: Prüflast über die Prüfdauer C9-W07 UV-365mm-512kN

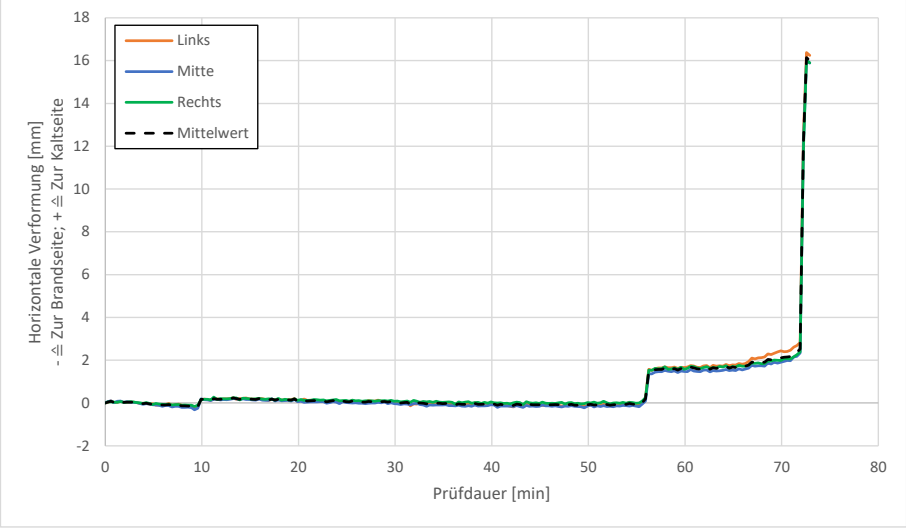


Abb. G. 66: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C9-W07 UV-365mm-512kN

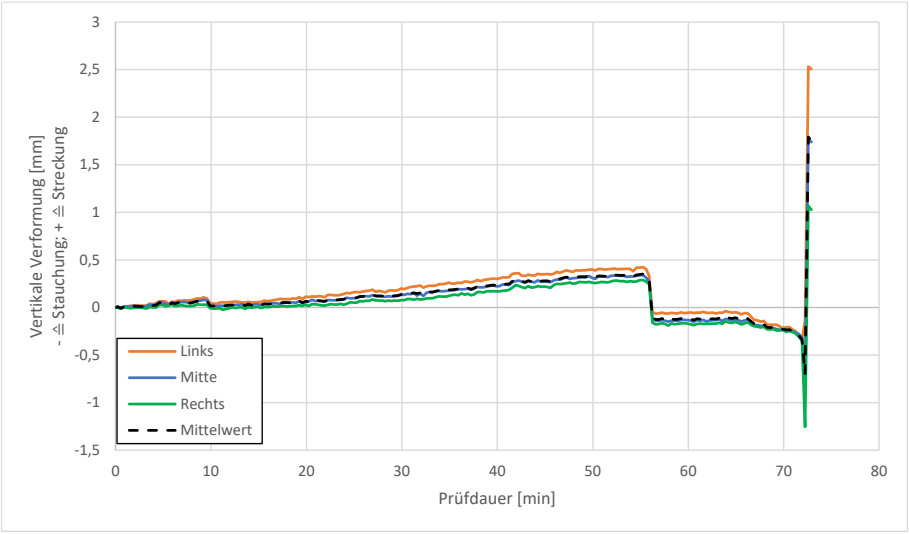


Abb. G. 67: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C9-W07 UV-365mm-512kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

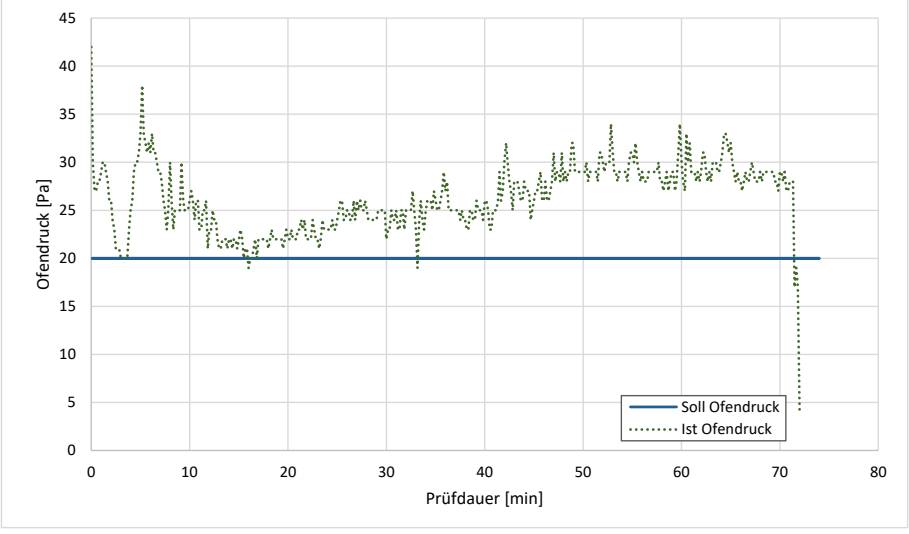


Abb. G. 68: Ofendruck während des Brandverlaufes C9-W07 UV-365mm-512kN

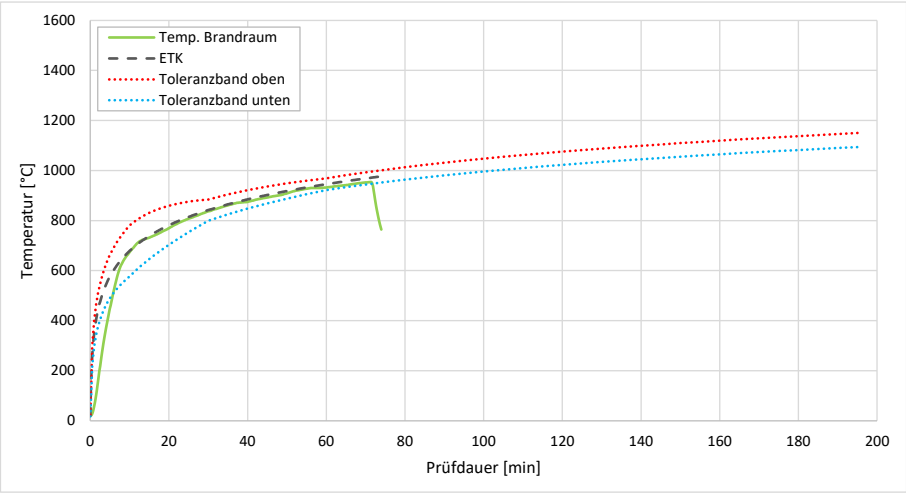


Abb. G. 69: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C9-W07 UV-365mm-512kN

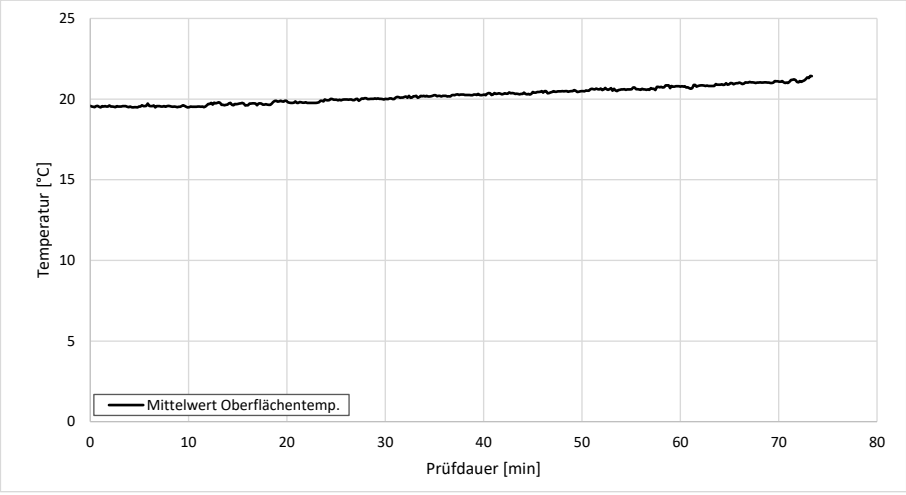


Abb. G. 70: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C9-W07 UV-365mm-512kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	27.10.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 2	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	8	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (512 kN)
0	Beginn Brandversuch
5	Knackgeräusche (570 °C)
13	Riss unterer Wandbereich (700 °C)
45	Riss unterer Wandbereich breiter (900 °C)
68	Schmaler Riss in der Wandmitte (953 °C)
70	Putz und Ziegelscherben fallen ab
71	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.10 C10-W07 UV-365mm-485kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

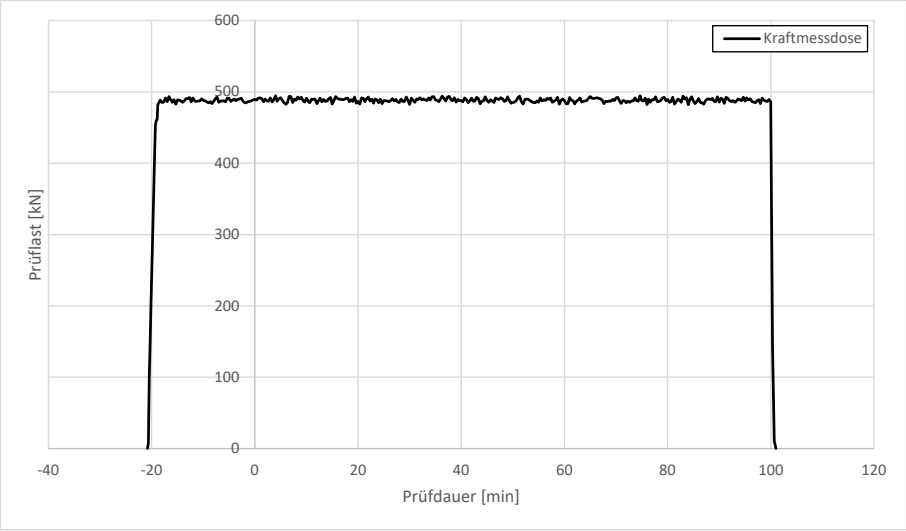


Abb. G. 71: Prüflast über die Prüfdauer C10-W07 UV-365mm-485kN

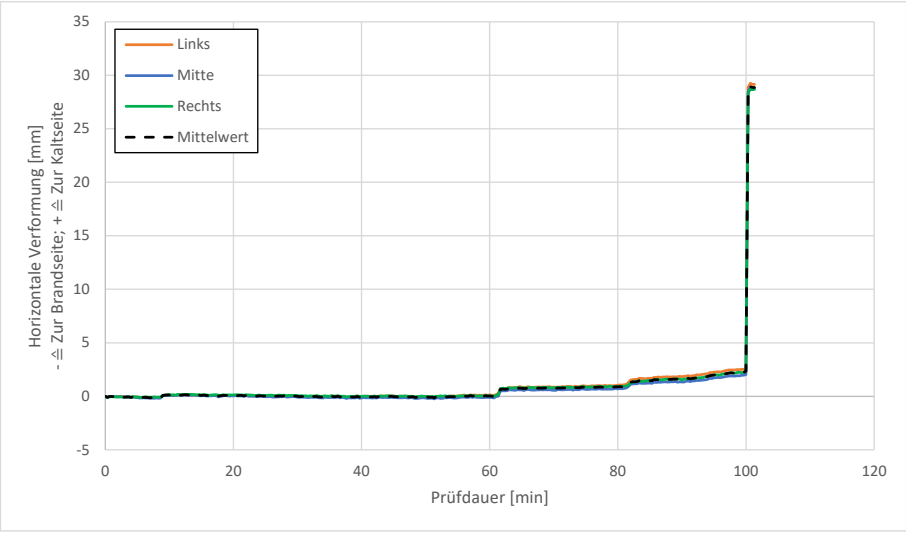


Abb. G. 72: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C10-W07 UV-365mm-485kN

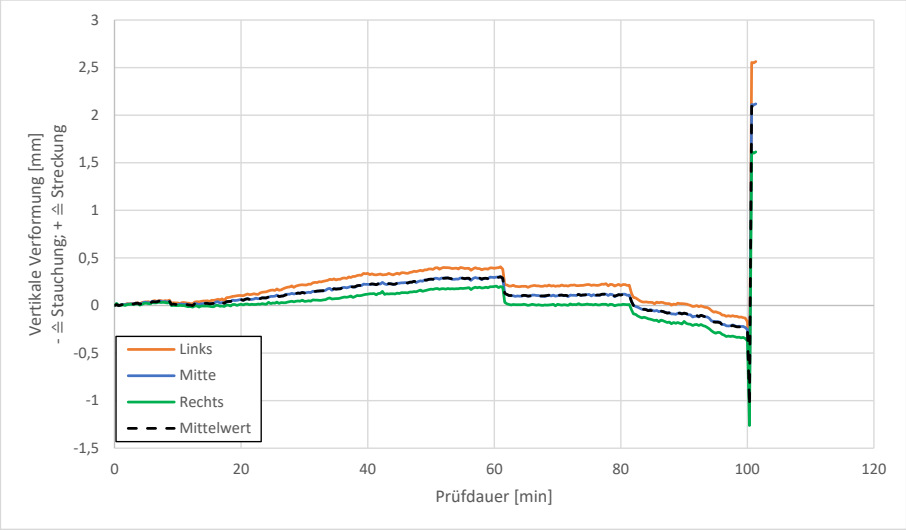


Abb. G. 73: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C10-W07 UV-365mm-485kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

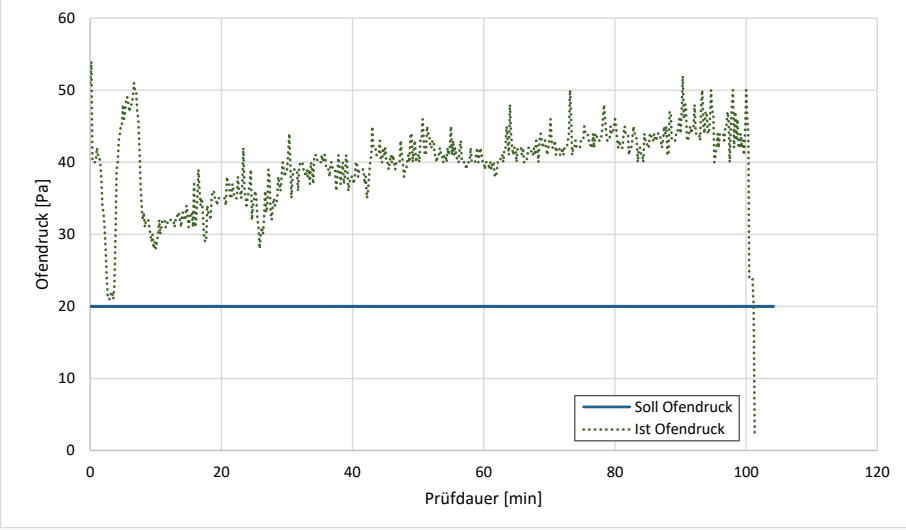


Abb. G. 74: Ofendruck während des Brandverlaufes C10-W07 UV-365mm-485kN

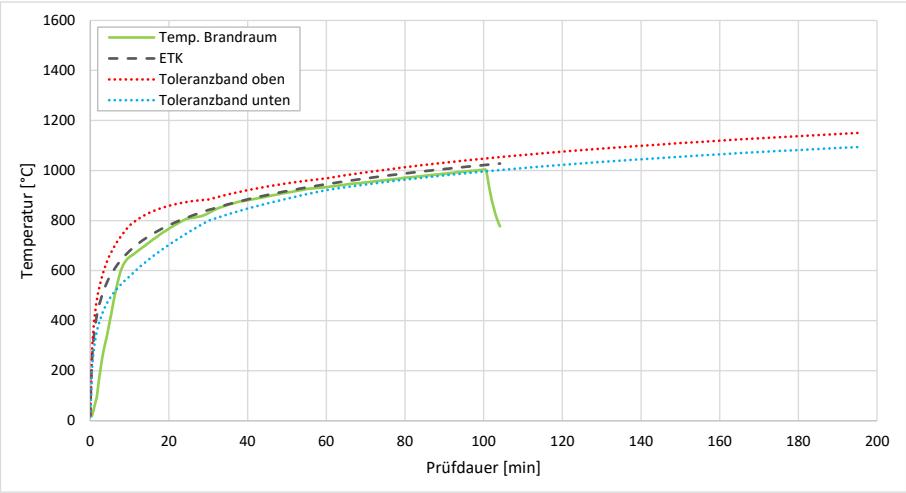


Abb. G. 75: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C10-W07 UV-365mm-485kN

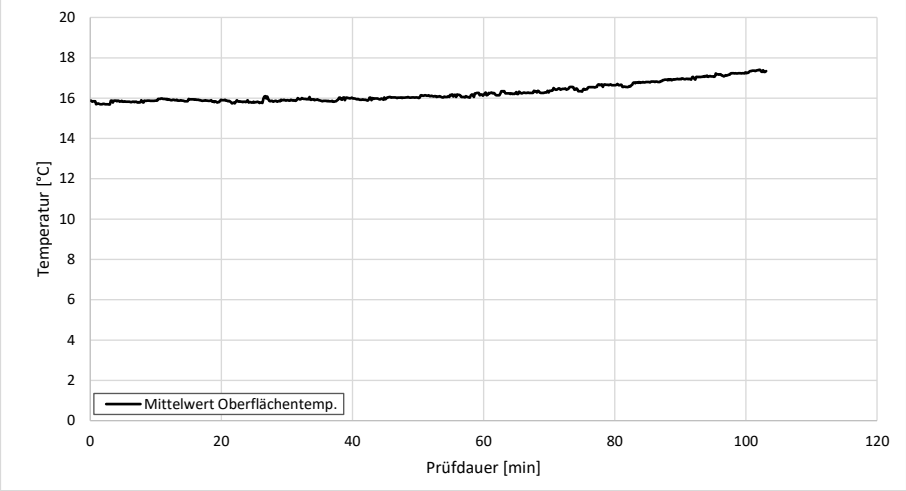


Abb. G. 76: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C10-W07 UV-365mm-485kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	17.11.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 4	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	12	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (485 kN)
0	Beginn Brandversuch
8	Knackgeräusche
15	Schmaler Riss unterer Wandbereich (745 °C)
21	Knackgeräusche (798 °C)
60	Riss unterer Wandbereich breiter (940 °C)
75	Weitere Risse unterer Wandbereich (965 °C)
99	Putz und Ziegelscherben fallen im mittleren und unteren Wandbereich ab (1012 °C)
99	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.11 C11-W07 UV-365mm-460kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer. Die negativen Prüflasten resultieren vermutlich aus dem Versuchsaufbau, weil dort nur eine Kraftmessdose für drei Pressen verwendet wird.

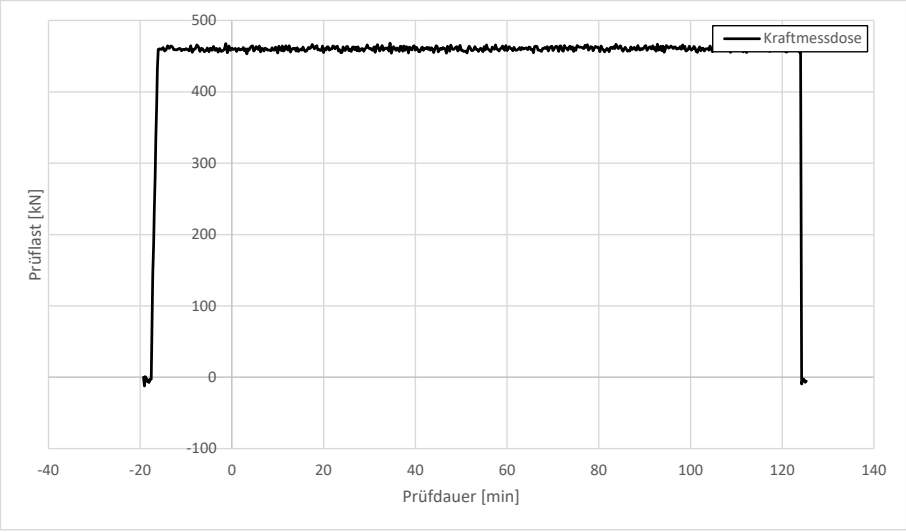


Abb. G. 77: Prüflast über die Prüfdauer C11-W07 UV-365mm-460kN

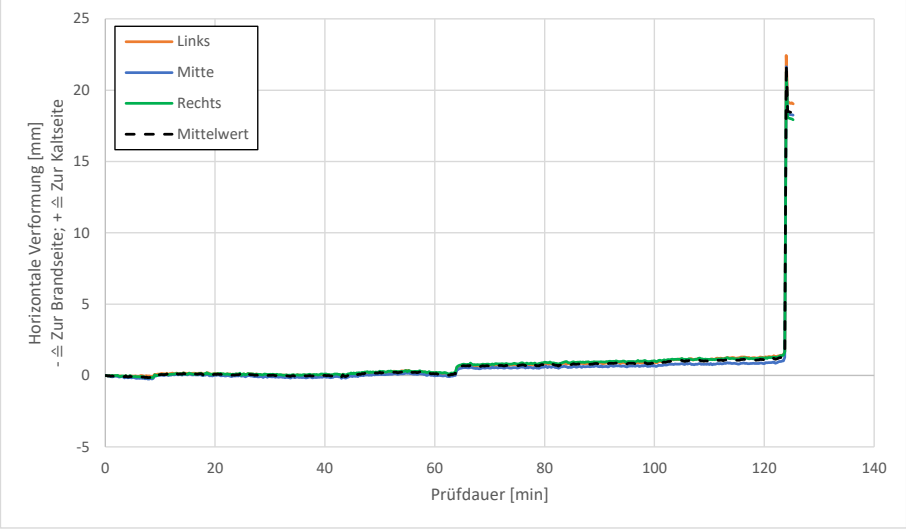


Abb. G. 78: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C11-W07 UV-365mm-460kN

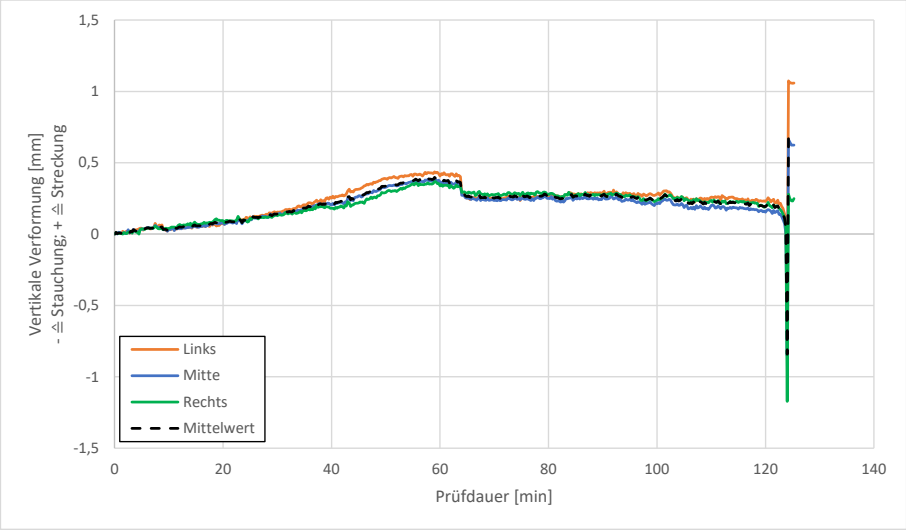


Abb. G. 79: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C11-W07 UV-365mm-460kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

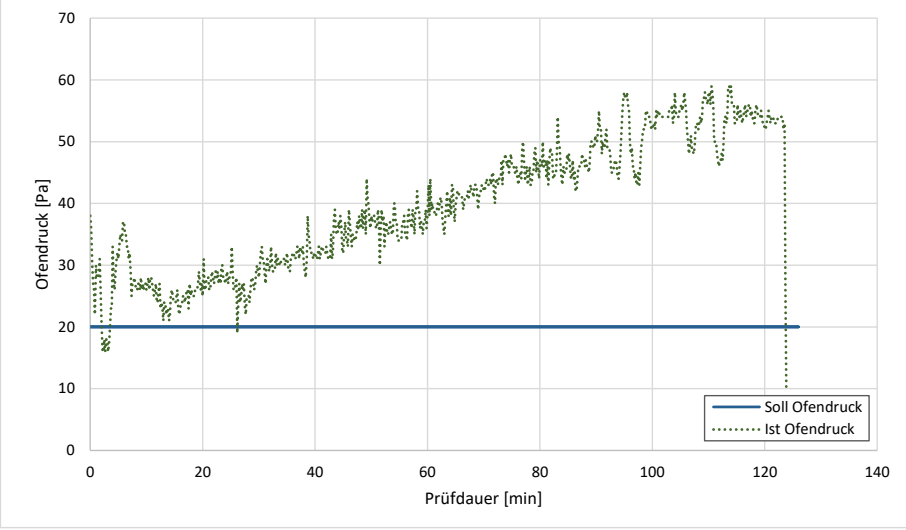


Abb. G. 80: Ofendruck während des Brandverlaufes C11-W07 UV-365mm-460kN

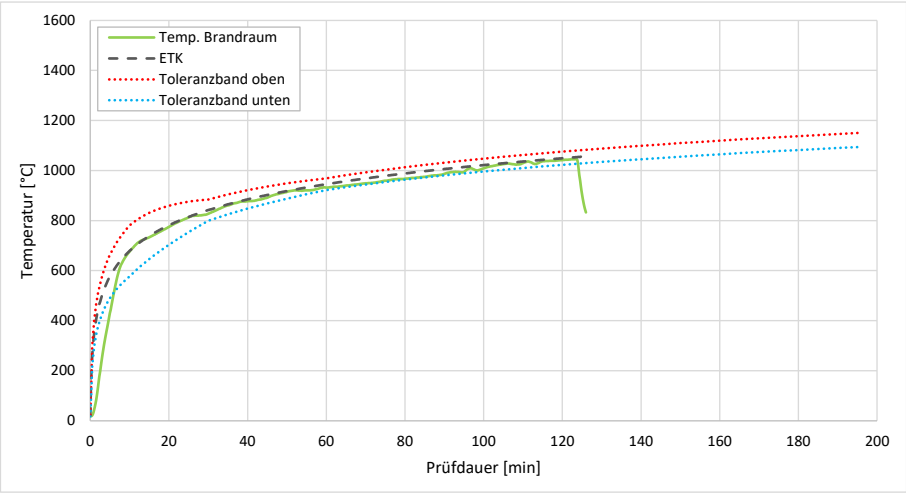


Abb. G. 81: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C11-W07 UV-365mm-460kN

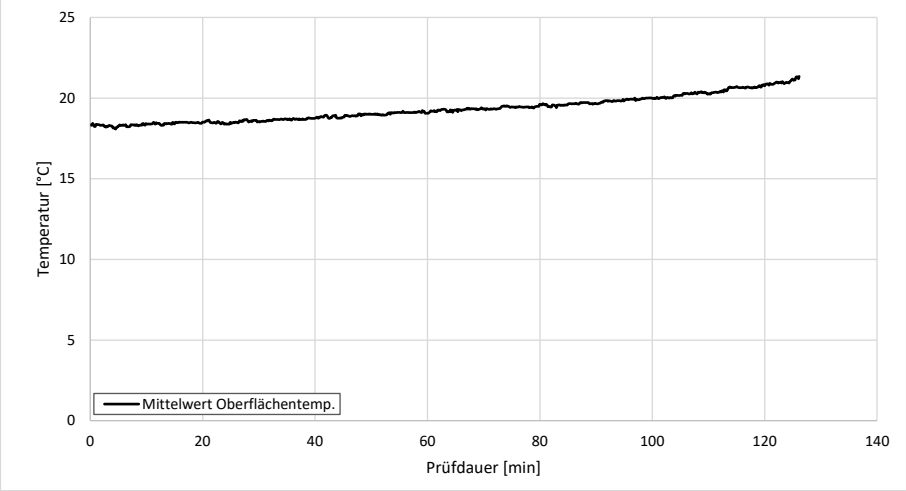


Abb. G. 82: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C11-W07 UV-365mm-460kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	02.11.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 3	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	9	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (460 kN)
0	Beginn Brandversuch
23	Keine sichtbaren Schäden
39	Knackgeräusche (882 °C)
52	Keine sichtbaren Schäden
63	Schmaler Riss in der Wandmitte (944 °C)
74	Weiterer Riss in der Wandmitte (965 °C)
79	Risse werden größer (972 °C)
96	Schmaler Riss unterer Wandbereich (1010 °C)
121	Knackgeräusche (1050 °C)
122	Mittlerer und oberer Wandbereich fällt Putz ab, Ziegelscherben fallen ab (1050 °C)
123	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

G.12 C12-W07 UV-365mm-375kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

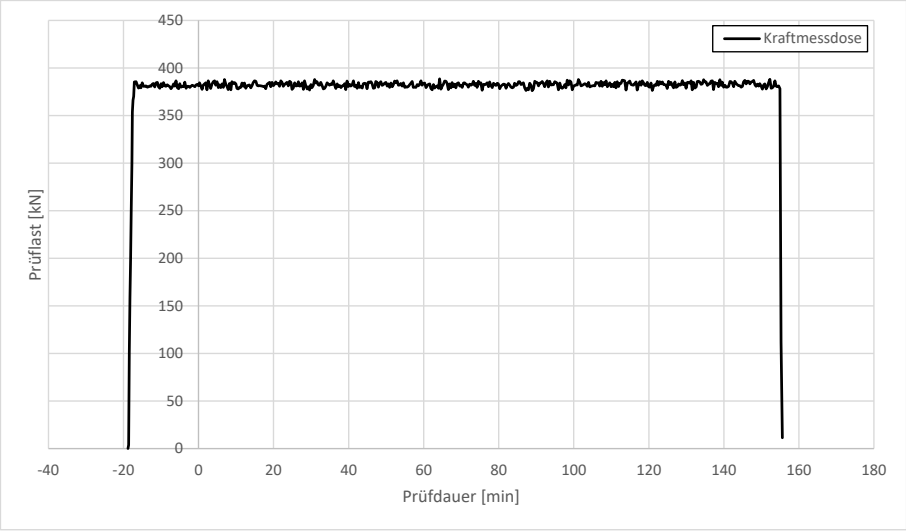


Abb. G. 83: Prüflast über die Prüfdauer C12-W07 UV-365mm-375kN

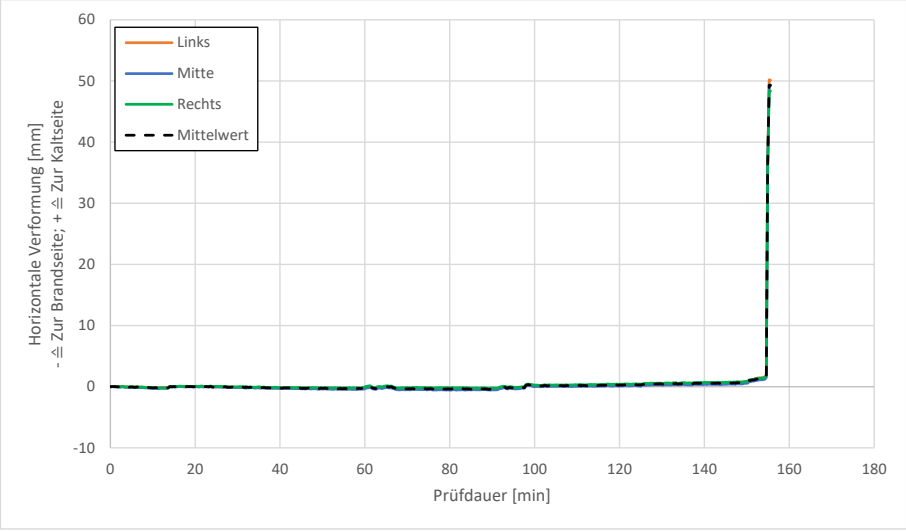


Abb. G. 84: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes C12-W07 UV-365mm-375kN

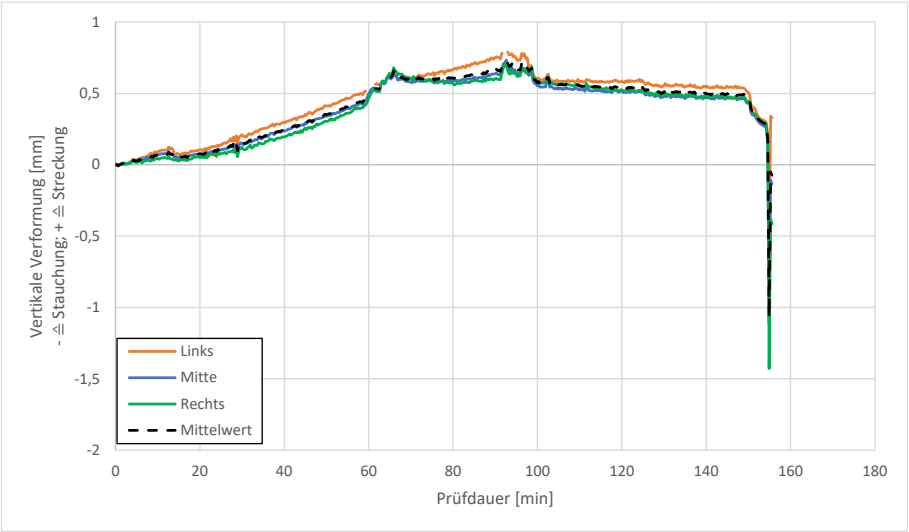


Abb. G. 85: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes C12-W07 UV-365mm-375kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt. Es erfolgten keine Temperaturmessungen auf den Ziegellängsstegen.

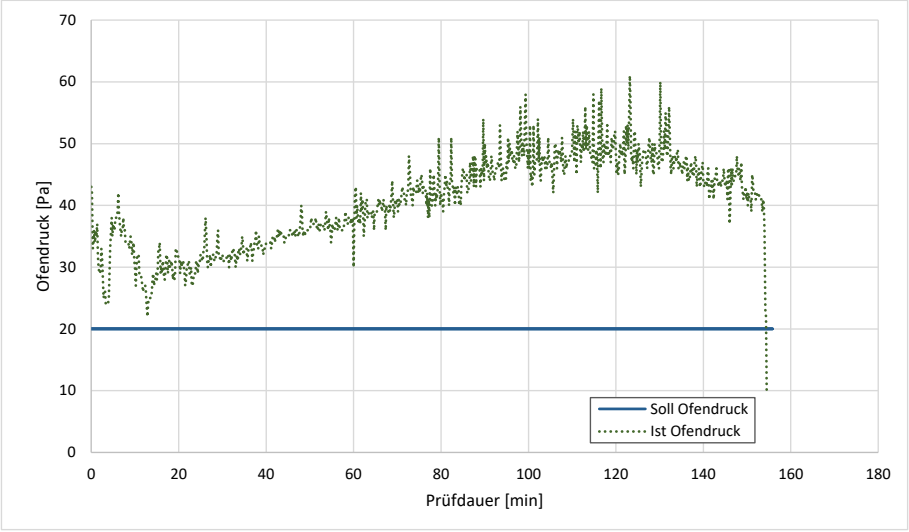


Abb. G. 86: Ofendruck während des Brandverlaufes C12-W07 UV-365mm-375kN

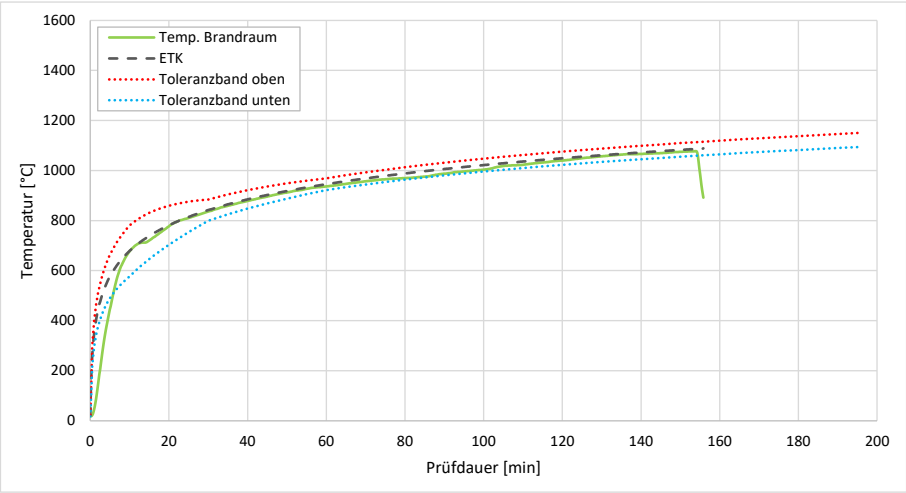


Abb. G. 87: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes C12-W07 UV-365mm-375kN

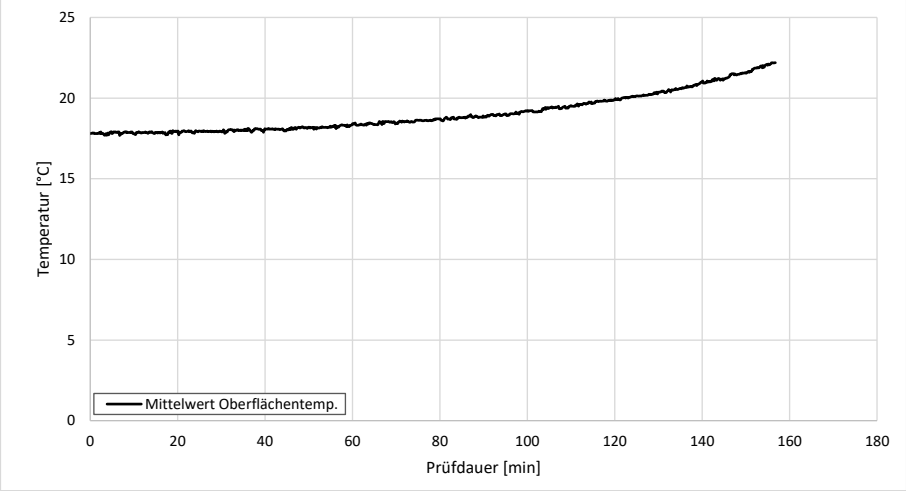


Abb. G. 88: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes C12-W07 UV-365mm-375kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Etscheid	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	24.10.2022
Versuchsbez.:	W07 Kleingelocht unverfüllt Wand 1	Startzeit:	-
Versuchsnr.:	7	Endzeit:	-

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (375 kN)
0	Beginn Brandversuch
20	Keine sichtbaren Schäden
45	Keine sichtbaren Schäden
80	Keine sichtbaren Schäden
87	Schmaler Riss in der Wandmitte, unterer Wandbereich Riss (977 °C)
110	Mittlerer Wandbereich weitere Risse (1031 °C)
120	Mittlerer Wandbereich Risse breiter (1048 °C)
143	Oberer Wandbereich schmaler Riss (1074 °C)
153	Putz und Ziegelscherben fallen ab
154	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) im oberen Wanddrittel

Anlage H Messdaten des Versuchs D1-MZ70-365mm-200kN/m

Es folgen Informationen und Messdaten zu der an der RPTU durchgeführten Feuerwiderstandsprüfung D1-MZ70-365mm-200kN/m mit der Prüfkörpergeometrie 3,0 m in der Höhe und 3,0 m in der Länge und einer Nennmaßdicke von 0,365 m. Die Messstellen für die Verformungs- und Temperaturmessungen sind Anlage A zu entnehmen. Ausgehend von den Überlegungen des Kapitels 6.4 wurde in dem Protokoll vermerkt, wann ein Längssteg 100 °C und 600 °C aufweist.

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN/m) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

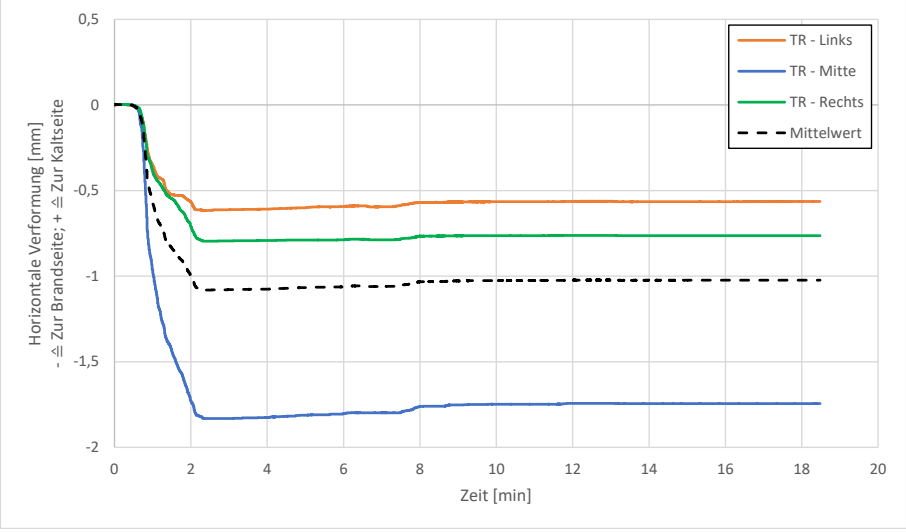


Abb. H. 1: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer D1-MZ70-365mm-200kN/m

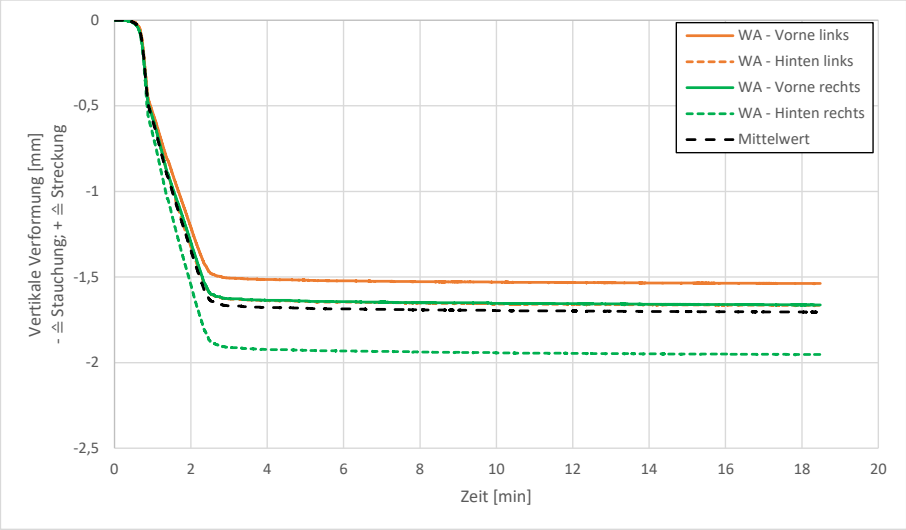


Abb. H. 2: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer D1-MZ70-365mm-200kN/m

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

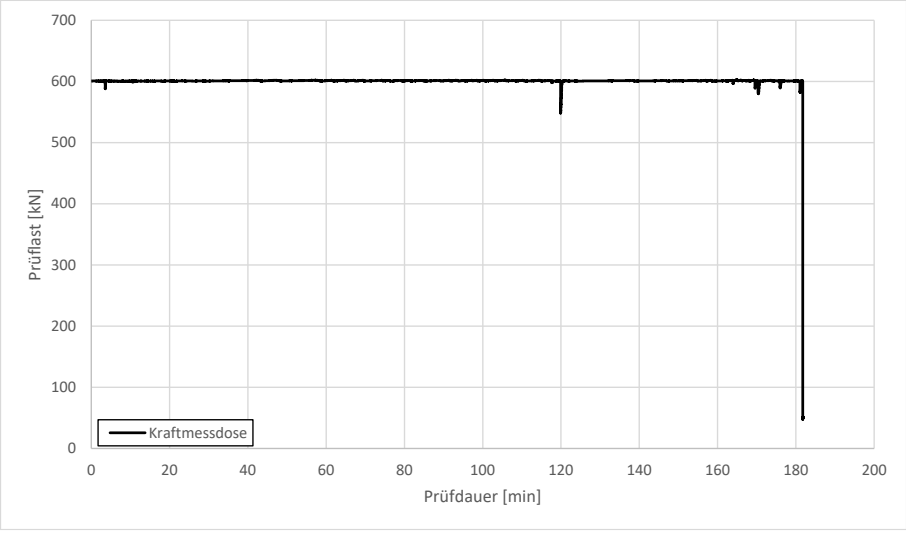


Abb. H. 3: Prüflast über die Prüfdauer D1-MZ70-365mm-200kN/m

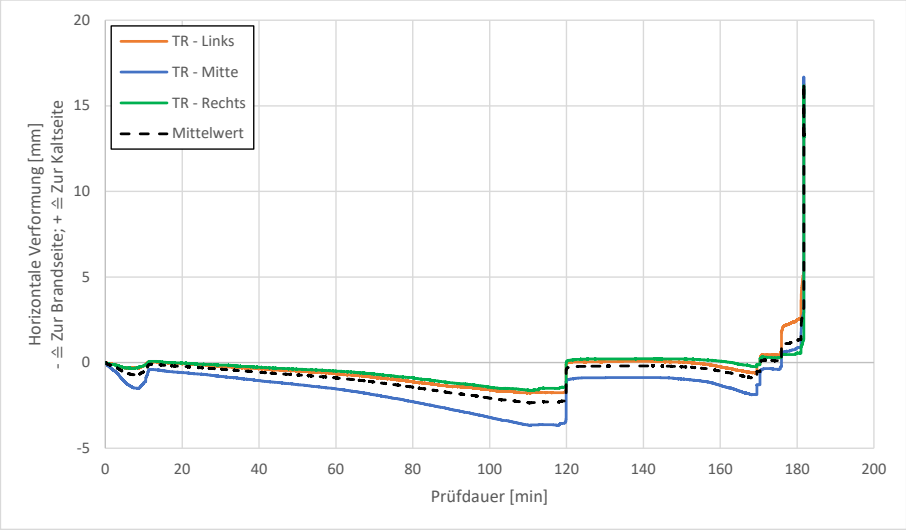


Abb. H. 4: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

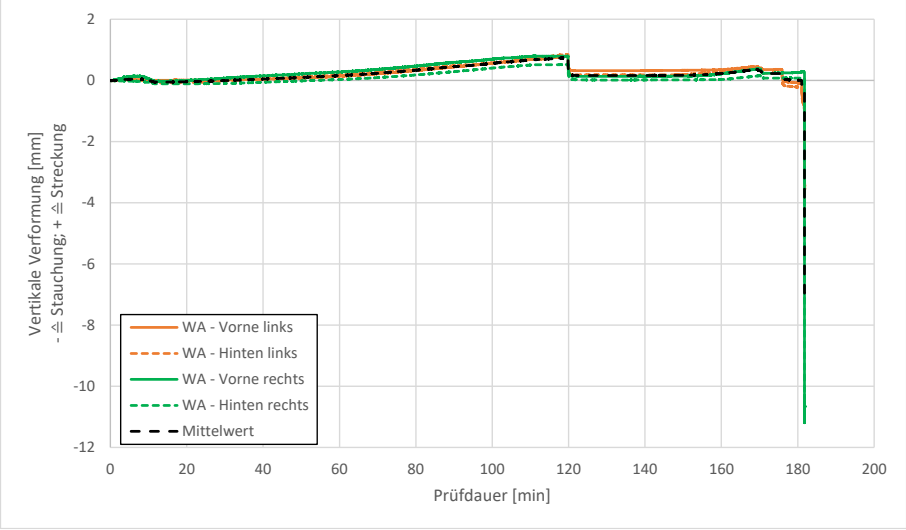


Abb. H. 5: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

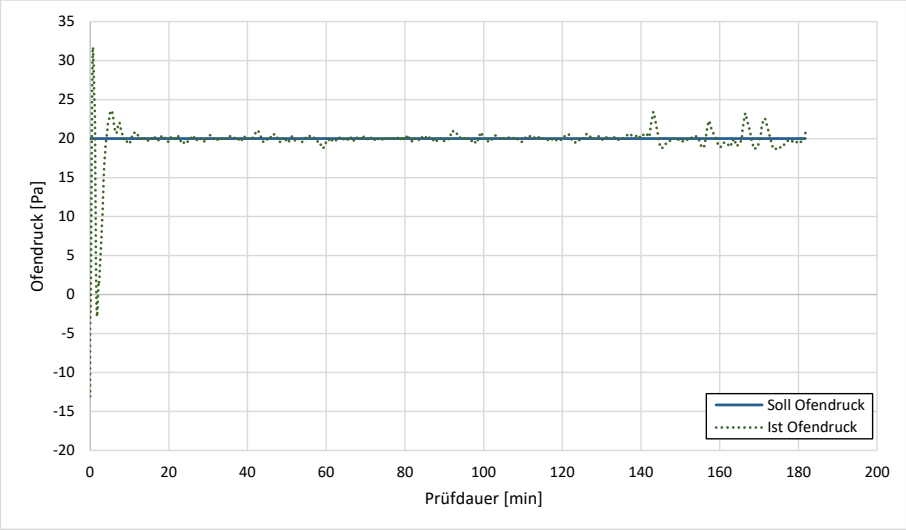


Abb. H. 6: Ofendruck während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

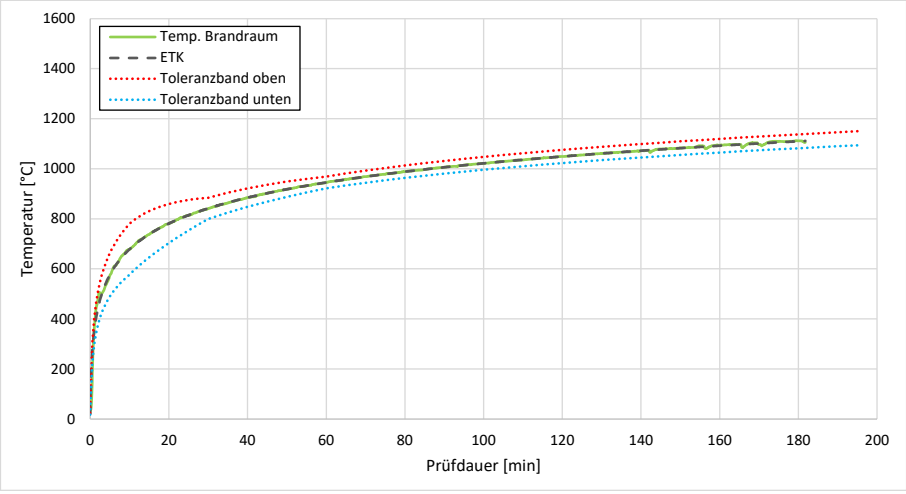


Abb. H. 7: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

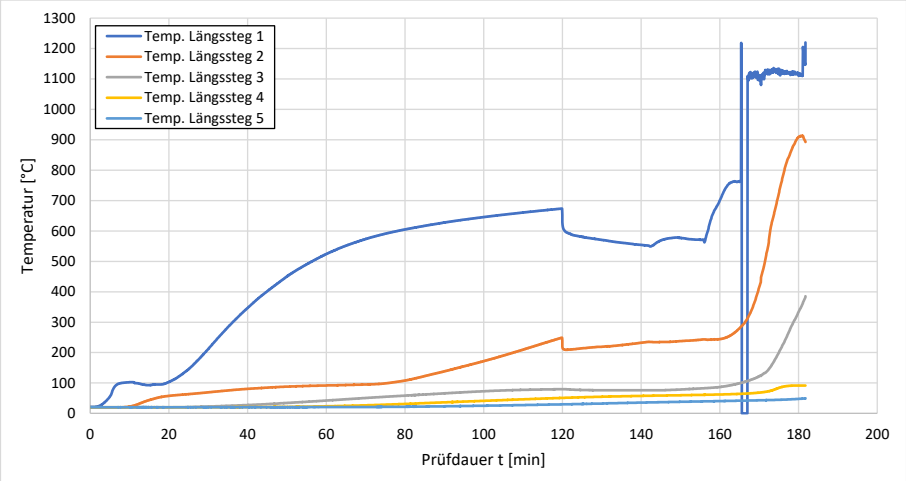


Abb. H. 8: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

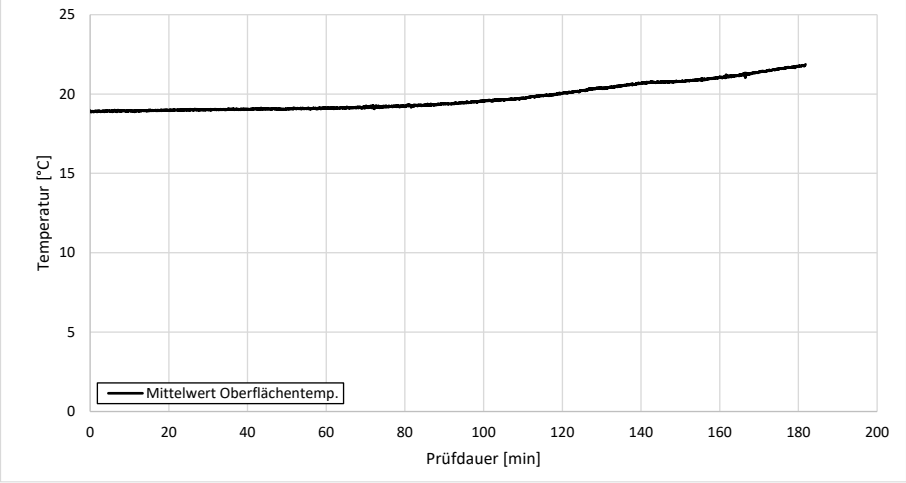


Abb. H. 9: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes D1-MZ70-365mm-200kN/m

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF Mindestfeuerwiderstand	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 3,0 m x 0,365 m	Datum:	26.10.2022
Versuchsbez.:	MZ70 Großkammer 3x3 m Wand 1	Startzeit:	08:13
Versuchsnr.:	10	Endzeit:	11:16

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (600 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Per Hand zu viel Last abgelassen ~12 kN
7	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte, Knackgeräusche
14	Weniger Knackgeräusche
45	Knackgeräusche, immer schnellerer Lastanstieg
75	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
78	600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
98	Weitere Zunahme Knackgeräusche
117	Per Hand zu viel Last abgelassen
119	Lautes Knacken, Lastabfall um ~52 kN, Riss im Putz im oberen Wanddrittel über gesamte Breite und vereinzelte Risse im unteren Wandbereich sowie Abfall einer Ziegelscherbe
136	Putzabfall und Abfall vereinzelter Ziegelscherben im unteren Wandbereich
139	Weitere Risse im Putz im oberen Wandbereich
140	Weitere Risse im Putz im unteren Wandbereich
142	Abfall von Putz und von Außenstegen im oberen Wandbereich
143	Abfall von weiteren Ziegelscherben im oberen Wandbereich und weitere Abplatzungen von Putz und Ziegelscherben im unteren Wandbereich
146	Weitere Ziegelabplatzungen im oberen Wandbereich
151	Risse vom unteren Wandbereich hin zum mittleren Wandbereich
155	Rechter oberer und mittlerer Wandbereich Putzabplatzungen
156	Rechter oberer und mittlerer Wandbereich Ziegelabplatzungen
164	Per Hand zu viel Last abgelassen
165	Weiterer Abfall von Putz und Ziegelscherben im mittleren Wandbereich, 100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
169	Lastabfall um ~12 kN, Ziegelabplatzungen im oberern rechten Wandbereich
170	Lastabfall um ~21 kN, Abplatzungen im oberen mittigen und rechten Wandbereich
172	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinneren in Wandmitte
175	Lastabfall um ~11 kN, Ziegelabplatzungen im oberen rechten Wandbereich und weitere Rissbildung im Putz im oberen Wandbereich, Riss über gesamte Breite im Putz im oberen Wandbereich auf der brandabgewandten Seite
180	Weiterer Abfall von Ziegelscherben im oberen mittleren Wandbereich
181	Lastabfall um ~19 kN, weiterer Abfall von Ziegelscherben im oberen mittleren Wandbereich
182	Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

Anlage I Protokolle Resttragfähigkeit nach Brandbeanspruchung

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**13.04.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV NG mit 60 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**1**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
30	Keine Schäden sichtbar
60	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
61	Knackgeräusche bei 400 KN
62	Versagen der Wand bei 452,42 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**19.04.2022**
Versuchsbez.:	**W07 V mit 60 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**2**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
30	Keine Schäden sichtbar
60	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
61	Riss mittlerer Wandbereich auf beflammter Wandseite
62	Knackgeräusche ab 500 kN; Schale in Wandmitte abgefallen
63	Versagen der Wand bei 681,79 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**20.04.2022**
Versuchsbez.:	**MZ70 mit 60 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**3**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
30	Keine Schäden sichtbar
35	Riss im mittleren Wandbereich auf brandzugewandter Seite (870 °C)
41	Knackgeräusche ab 892 °C
50	Riss im unteren Wandbereich auf brandzugewandter Seite (919 °C)
60	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
64	Versagen der Wand bei 771,94 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**21.04.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV NG mit 90 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**4**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
10	Knackgeräusche ab 720 °C
40	Keine Schäden sichtbar
57	Riss unterer Wandbereich der brandzugewandten Seite
90	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
92	Versagen der Wand bei 349,13 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**22.04.2022**
Versuchsbez.:	**W07 V mit 90 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**5**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
10	Knackgeräusche bei 680 °C
30	Keine Schäden sichtbar
60	Keine Schäden sichtbar
90	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
91	Knackgeräusche ab 600 kN und Riss auf beflammter Wandseite ab 620 kN
92	Versagen der Wand bei 660,03 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**25.04.2022**
Versuchsbez.:	**MZ70 mit 90 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**6**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
13	Knackgeräusche bei 768 °C
30	Keine Schäden sichtbar
90	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
91	Schale im unteren Wandbereich auf brandzugewandter Seite abgefallen (980 °C)
93	Schale im oberen Wandbereich auf brandzugewandter Seite abgefallen
94	Versagen der Wand kN 1094,38kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**05.05.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV NG mit 120 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**7**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
13	Rauchaustritt bei 710 °C
15	Knackgeräusche bei 755 °C
45	Keine Schäden sichtbar
90	Keine Schäden sichtbar
120	Keine Schäden sichtbar, ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
123	Bruch auf der Brandseite unterer Bereich bei 519,81 kN (Versagen der Wand)

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**11.05.2022**
Versuchsbez.:	**W07 V mit 120 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**8**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
60	Keine Schäden sichtbar
120	Keine Schäden sichtbar und ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
124	Versagen der Wand bei 563,53 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**16.05.2022**
Versuchsbez.:	**MZ70 mit 120 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**9**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
10	Knackgeräusche ab 650 °C
26	Riss im untreren Wandbereich auf brandzugewandter Seite (820 °C)
60	Riss im untreren Wandbereich auf brandzugewandter Seite öffnet sich
93	Riss im untreren Wandbereich auf brandzugewandter Seite öffnet sich noch weiter und Riss im mittleren Wandbereich auf brandzugewandter Seite (1000 °C)
110	Unten Schale abgefallen bei 1030 °C
120	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
123	Versagen der Wand bei 200,81 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**05.10.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV mit 60 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**10**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
25	Keine Schäden sichtbar
30	Keine Schäden sichtbar
40	Keine Schäden sichtbar
50	Keine Schäden sichtbar
60	Keine Schäden sichtbar, ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
63	Versagen der Wand bei 628,55 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**07.10.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV mit 90 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**11**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
20	Keine Schäden sichtbar
30	Keine Schäden sichtbar
40	Keine Schäden sichtbar
60	Keine Schäden sichtbar
90	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
92	Riss im unteren Wandbereich
95	Versagen der Wand bei 609,51 kN

Projekt:	**AIF IGF Mindestfeuerwiderstand**	**Prüfofen:**	**Brandofen**
Projektleitung:	**Etscheid**	**Ofensteuerung:**	**IZF**
Versuchsreihe:	**Resttragfähigkeit 1,5 m x 1,0 m x 0,365 m**	**Datum:**	**12.10.2022**
Versuchsbez.:	**W07 UV mit 120 Minuten ETK**	**Startzeit:**	**-**
Versuchsnr.:	**12**	**Endzeit:**	**-**

Prüfdauer (min)	**Allgemeine Beobachtungen am Probekörper** (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (100 kN)
0	Beginn Brandversuch
20	Keine Schäden sichtbar
30	Keine Schäden sichtbar
45	Keine Schäden sichtbar
60	Keine Schäden sichtbar
82	Leichter Riss im unteren Wandbereich auf der brandzugewandten Seite (983 °C)
120	Ende Beflammung mit ETK → ETK Belastung halten und Prüflast weiter erhöhen
124	Versagen der Wand bei 507,60 kN

Anlage J Messdaten der Versuchsserie E

Es folgen Informationen und Messdaten zu dem durchgeführten Feuerwiderstandsprüfungen an der RPTU (Versuchsserie E1 bis E3) und am IZF (Versuchsserie E4 bis E6) mit dem Ziegel UNIPOR WS09 CORISO PLUS. Die Feuerwiderstandsprüfungen E1 bis E3 wurden mit den Prüfkörpergeometrien 3,0 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge durchgeführt. Die Feuerwiderstandsprüfungen E4 bis E6 wurden mit Prüfkörperabmessungen von 1,5 m in der Höhe und 1,0 m in der Länge durchgeführt. Bei allen Versuchen betrug die Nennmaßdicke 0,365 m. Die Messstellen für die Verformungs- und Temperaturmessungen sind Anlage A zu entnehmen. Ausgehend von den Überlegungen des Kapitels 6.4 wurde jeweils in den Protokollen vermerkt, wann ein Längssteg 100 °C und 600 °C aufweist.

J.1 E1-WS09 V-365mm-500kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (500 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

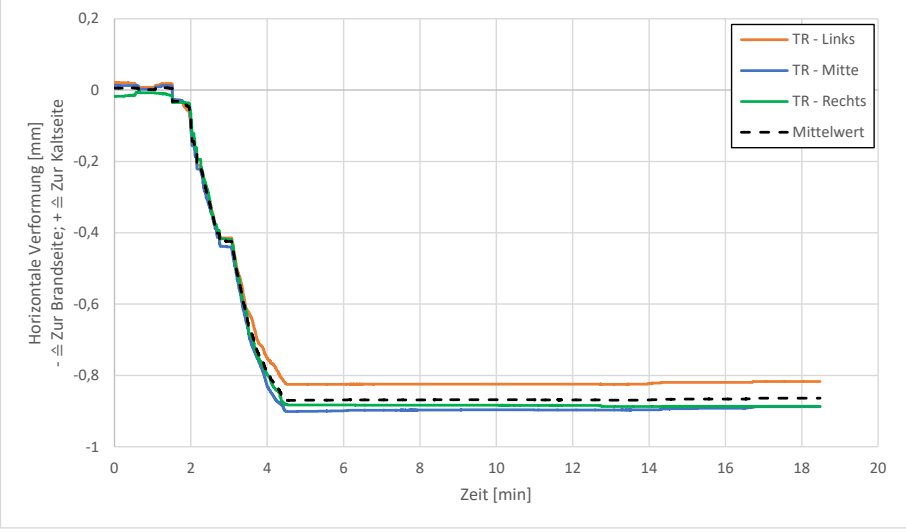


Abb. J. 1: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E1-WS09 V-365mm-500kN

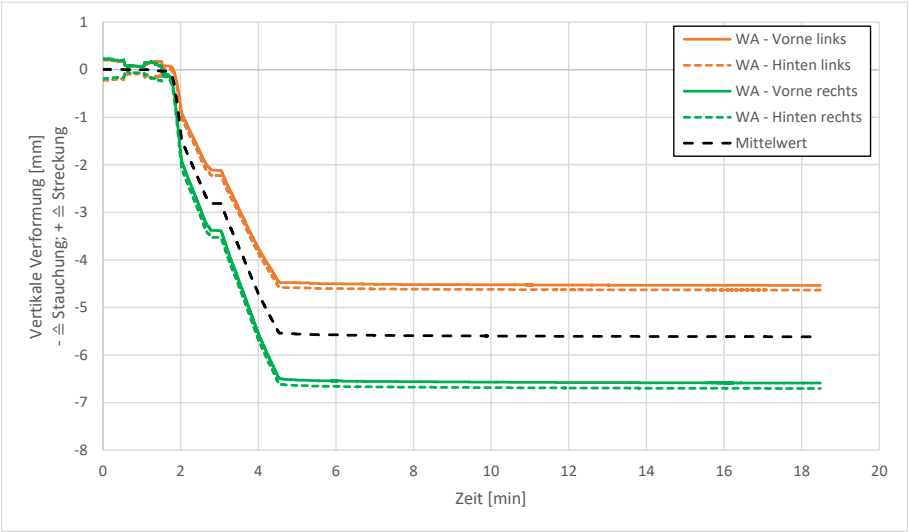


Abb. J. 2: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E1-WS09 V-365mm-500kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

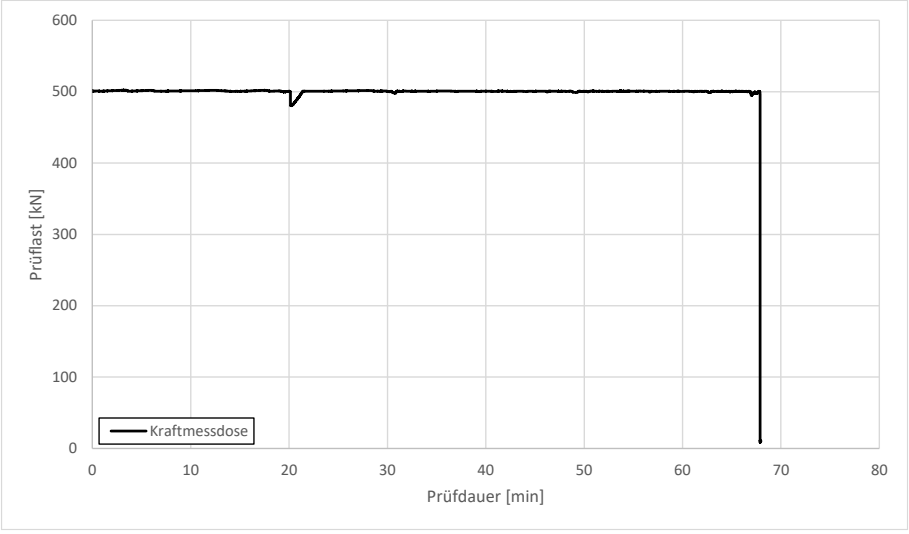


Abb. J. 3: Prüflast über die Prüfdauer E1-WS09 V-365mm-500kN

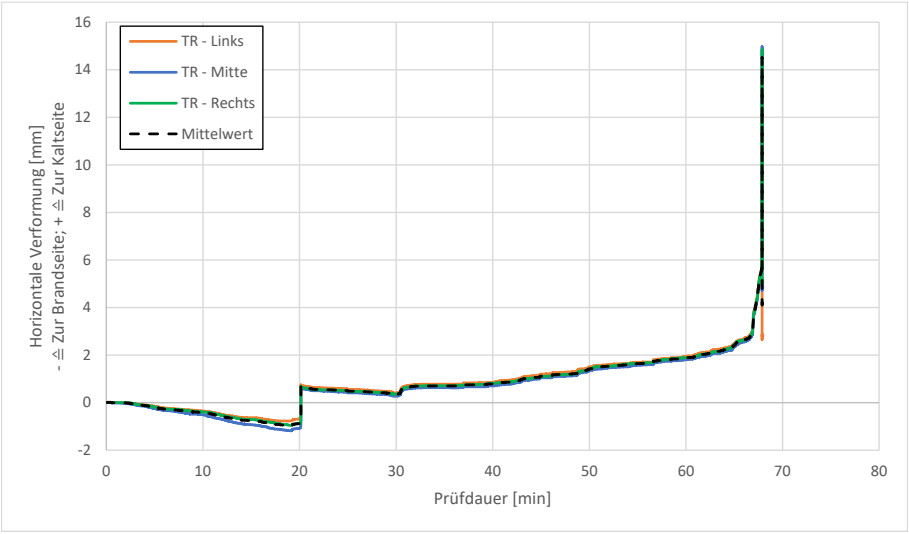


Abb. J. 4: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

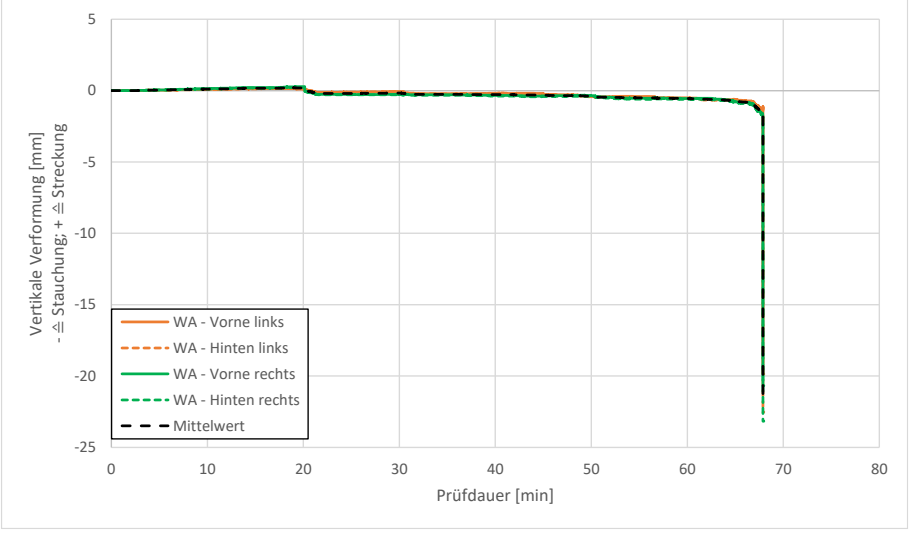


Abb. J. 5: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt. Abschließend ist ein Diagramm mit gemessenen Temperaturen unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite dargestellt.

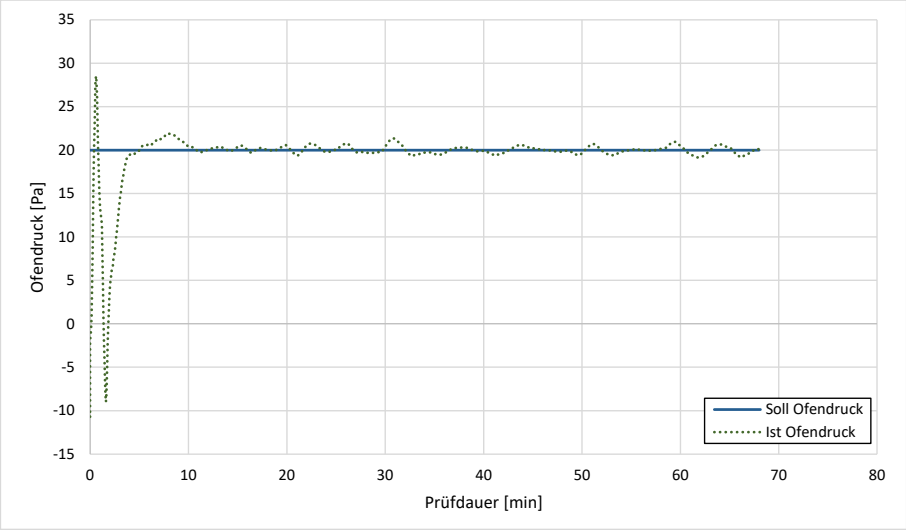


Abb. J. 6: Ofendruck während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

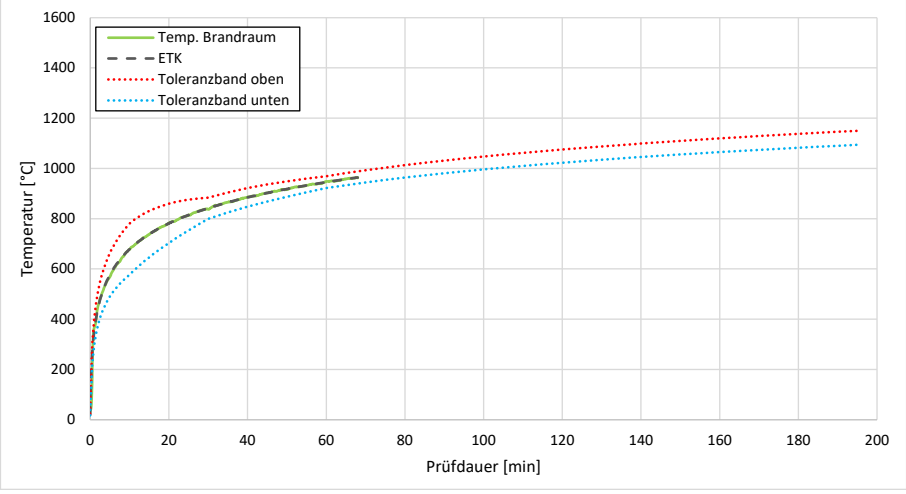


Abb. J. 7: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

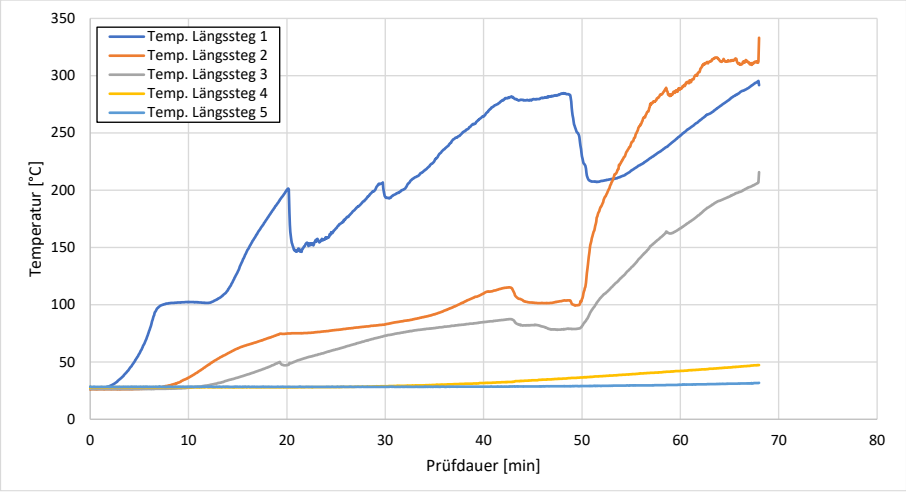


Abb. J. 8: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

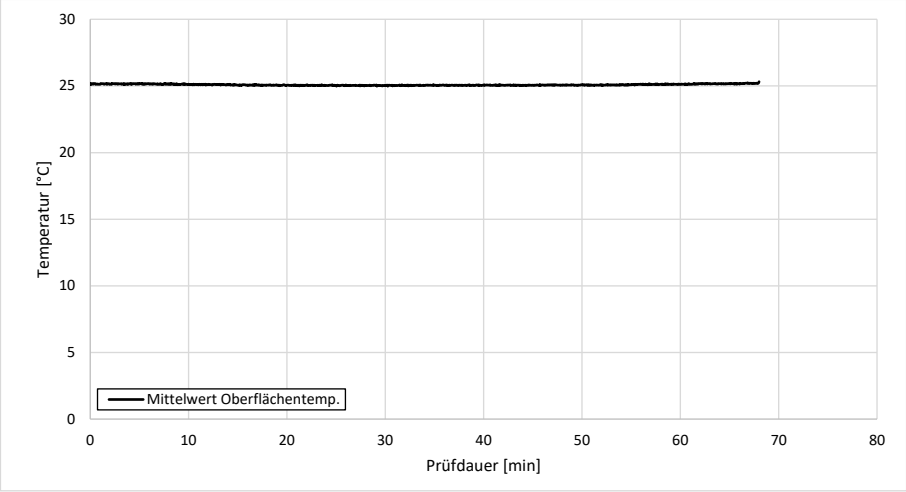


Abb. J. 9: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

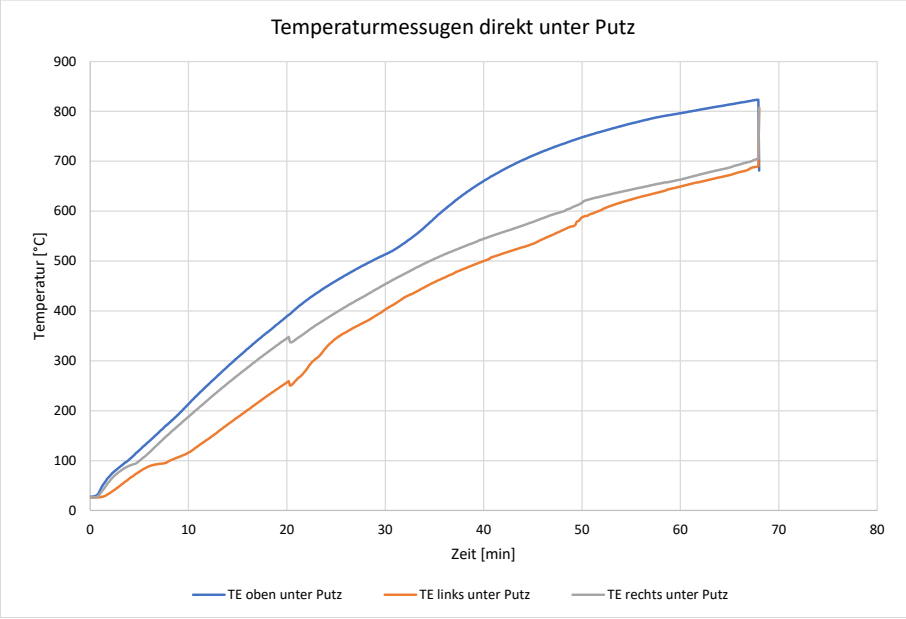


Abb. J. 10: Temperaturen auf der Wandoberfläche unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite während des Brandverlaufes E1-WS09 V-365mm-500kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	24.08.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch Wand 2	Startzeit:	07:55
Versuchsnr.:	1	Endzeit:	09:03

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (500 kN)
0	Beginn Brandversuch
9	100°C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
20	Lastabfall um ~20 kN sowie Riss im Putz im oberen Wandbereich
25	Abfall von Putz von der Größe von ca. 2 Ziegelreihen unterhalb vom Riss
29	Abfall vom Putz und vom Außensteg im oberen Wanddrittel
37	100°C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
45	Abfall vereinzelter Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
49	Lastabfall um ~2 kN sowie Abfall weiterer Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
51	100°C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte. Temperatur von 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte ist zu gering → inkorrekt
63	Abfall weiterer Ziegelscherben im oberen Wanddrittel, die Prüflast fällt schneller ab
67	Lastabfall um ~5 kN sowie schnellerer Abfall der Prüflast, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

J.2 E2-WS09 V-365mm-350kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (350 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

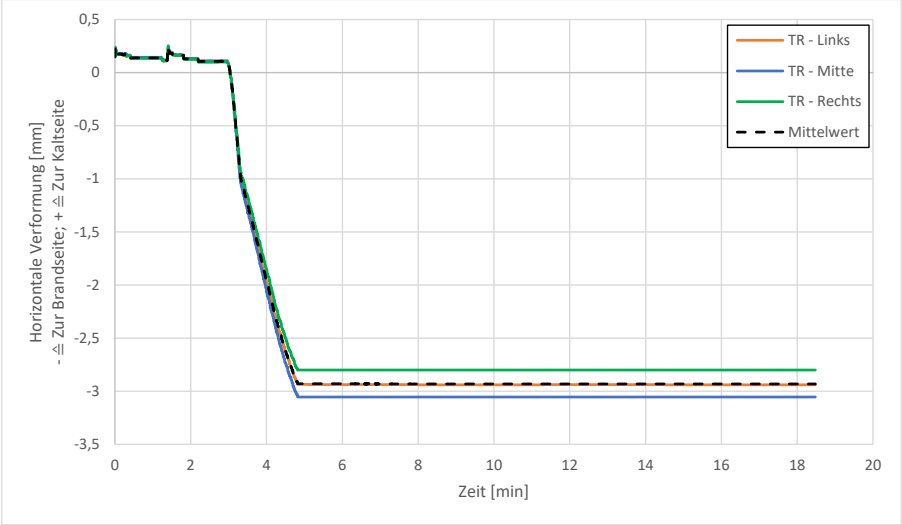


Abb. J. 11: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E2-WS09 V-365mm-350kN

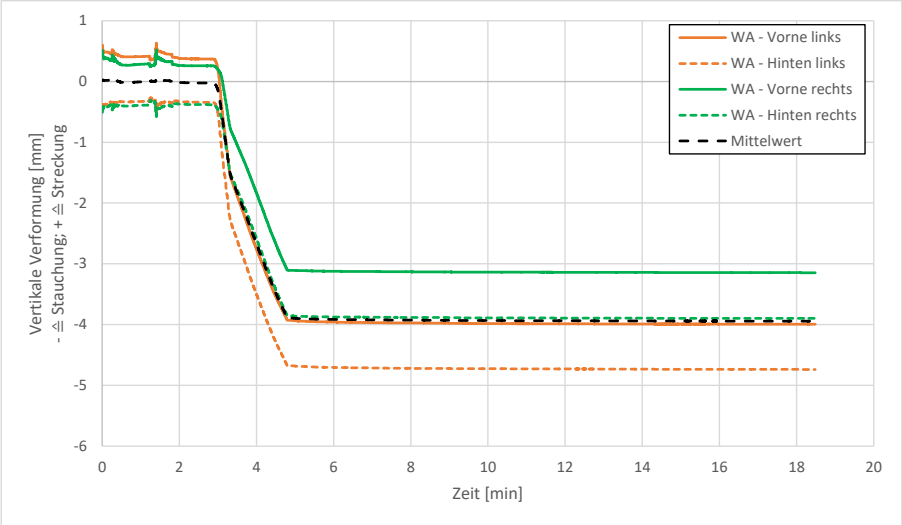


Abb. J. 12: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E2-WS09 V-365mm-350kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

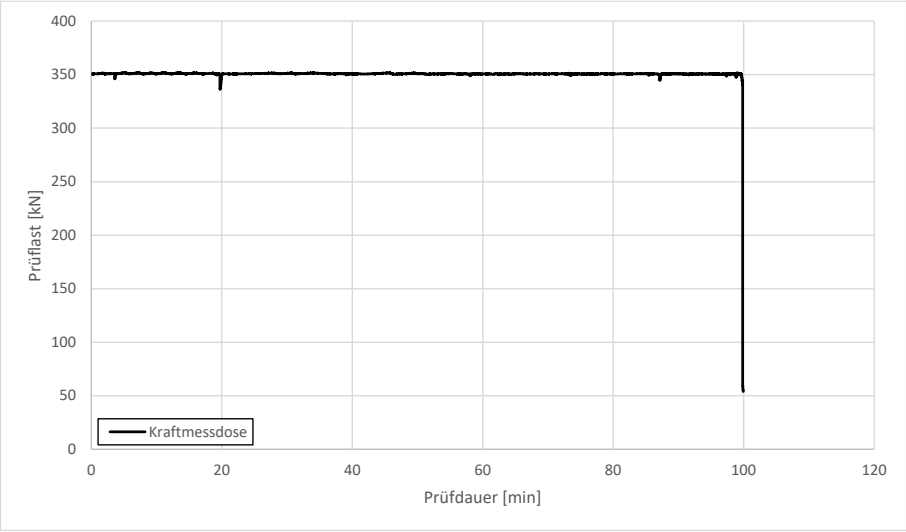


Abb. J. 13: Prüflast über die Prüfdauer E2-WS09 V-365mm-350kN

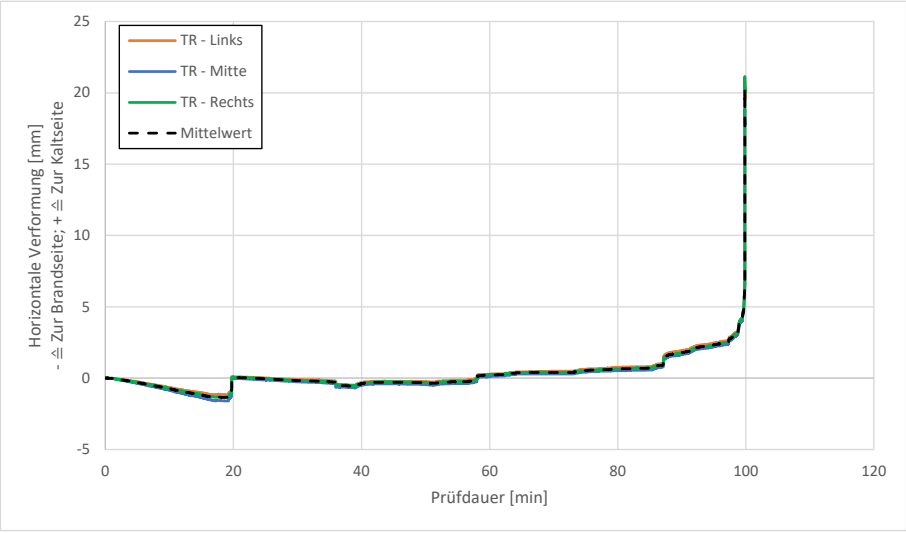


Abb. J. 14: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

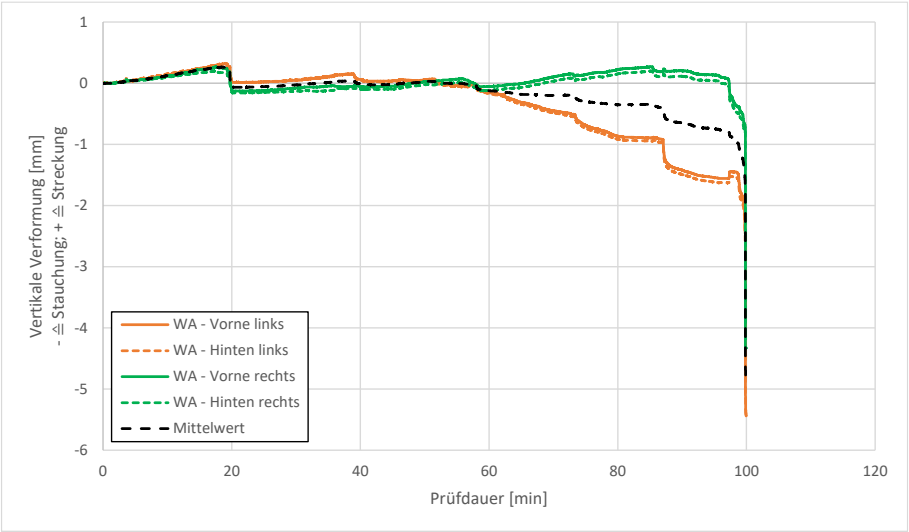


Abb. J. 15: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt. Abschließend ist ein Diagramm mit gemessenen Temperaturen unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite dargestellt.

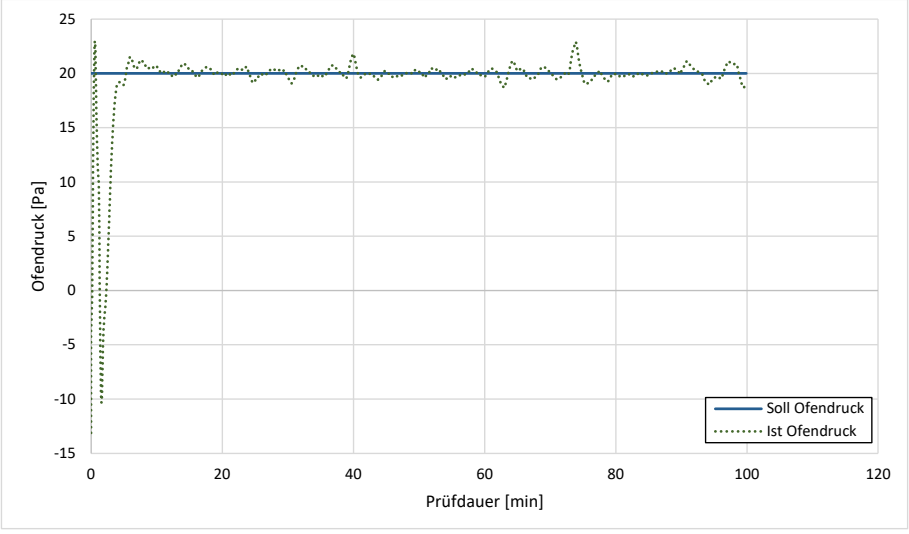


Abb. J. 16: Ofendruck während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

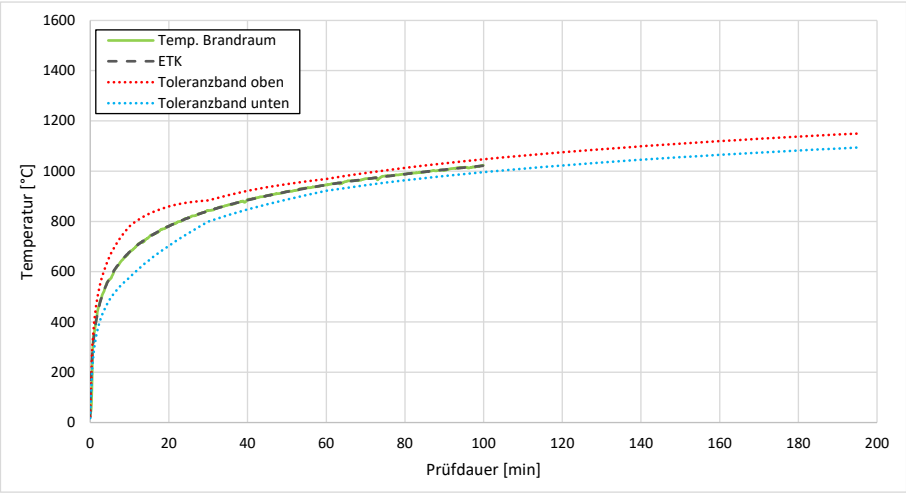


Abb. J. 17: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

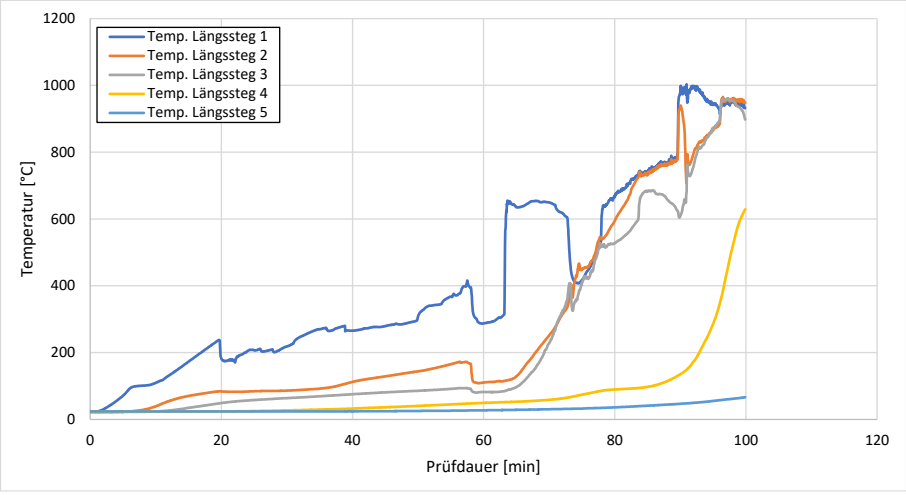


Abb. J. 18: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

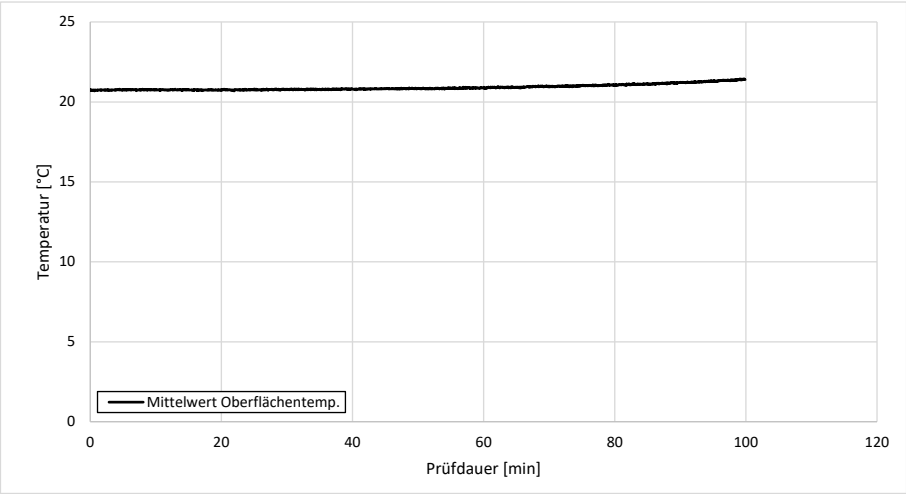


Abb. J. 19: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

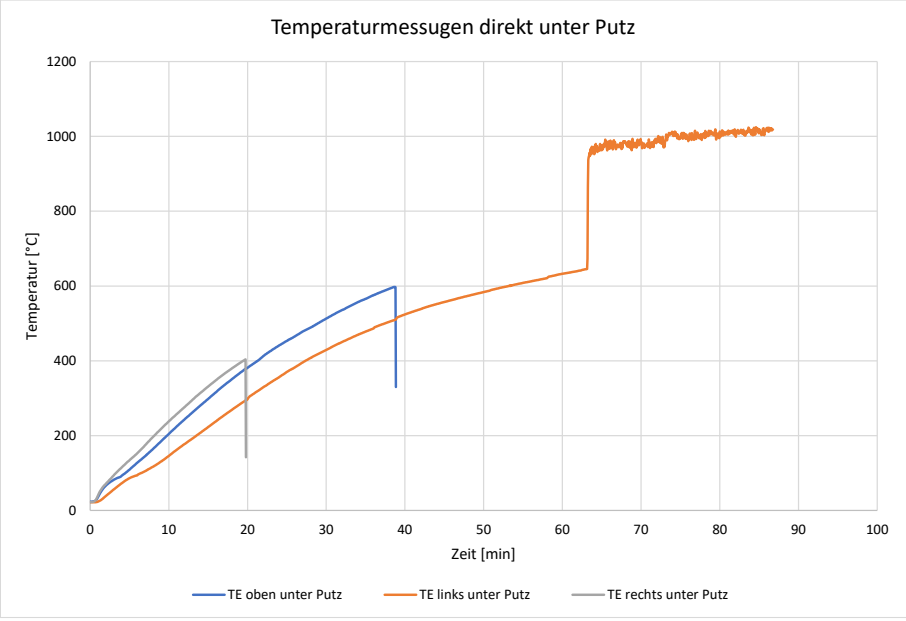


Abb. J. 20: Temperaturen auf der Wandoberfläche unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite während des Brandverlaufes E2-WS09 V-365mm-350kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	04.09.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch Wand 1	Startzeit:	07:51
Versuchsnr.:	2	Endzeit:	09:31

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (350 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Per Hand zu viel Last abgelassen
7	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
19	Lastabfall um ~14 kN und horizontaler Riss im oberen Wanddrittel
20	Thermoelement rechts unter Putz defekt
37	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
38	Abfall vom Putz im oberen Wanddrittel; Thermoelement oben unter Putz defekt
50	Abfall von Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
63	Abfall von Putz und Ziegelscherben immittleren Wanddrittel und 600 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
65	100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
72	Abfall vom Putz im unteren Wanddrittel
80	600 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
83	600 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
85	100 °C beim 4. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
87	Abfall von Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
89	Abfall von Ziegelscherben im mittleren Wanddrittel
96	Abfall von Ziegelscherben im mittleren Wanddrittel
97	Abfall von Ziegelscherben im mittleren und oberen Wanddrittel
98	Abfall von Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
99	Schneller Lastabfall und Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

J.3 E3-WS09 V-365mm-600kN

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (600 kN) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

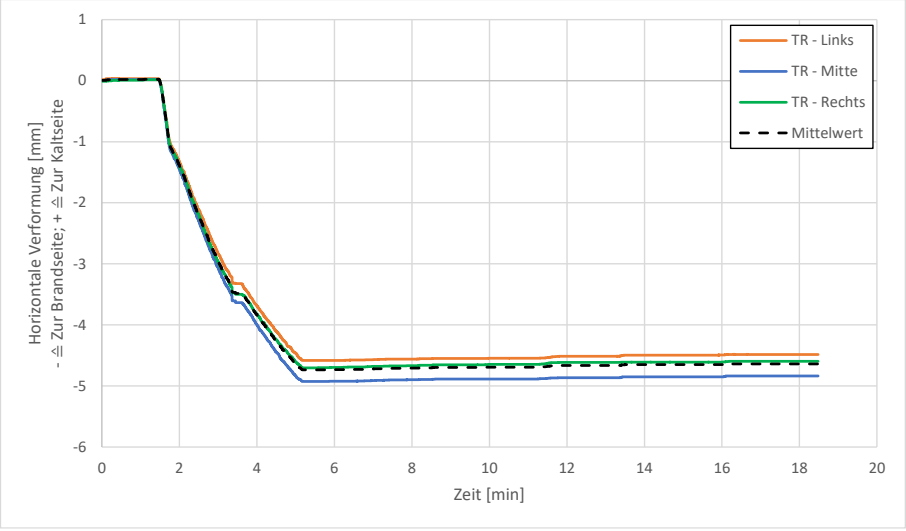


Abb. J. 21: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E3-WS09 V-365mm-600kN

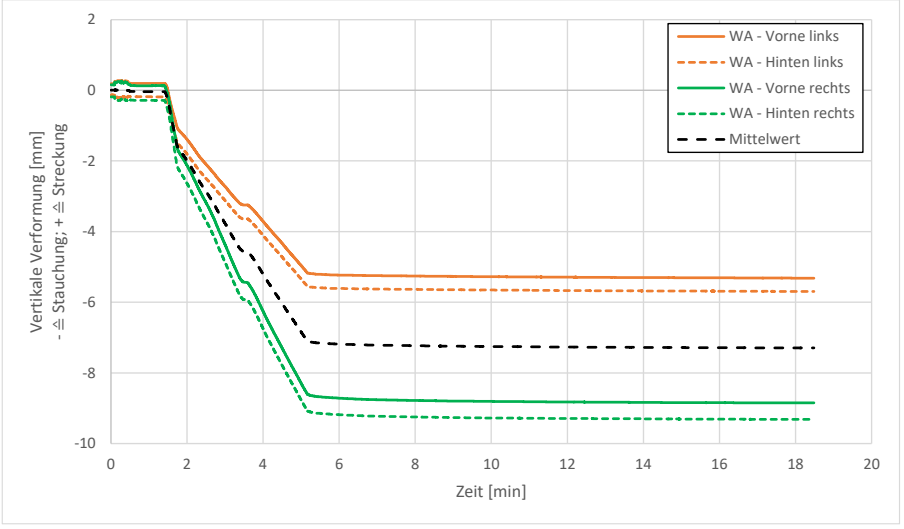


Abb. J. 22: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E3-WS09 V-365mm-600kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

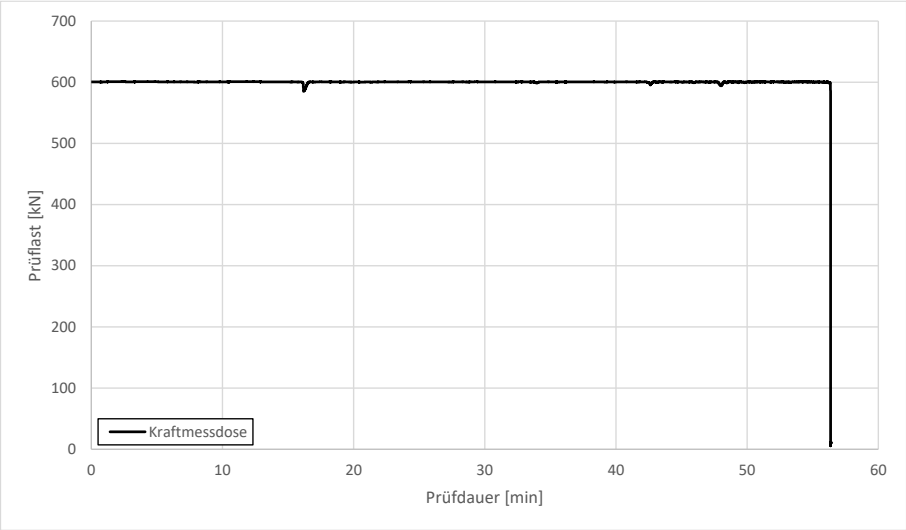


Abb. J. 23: Prüflast über die Prüfdauer E3-WS09 V-365mm-600kN

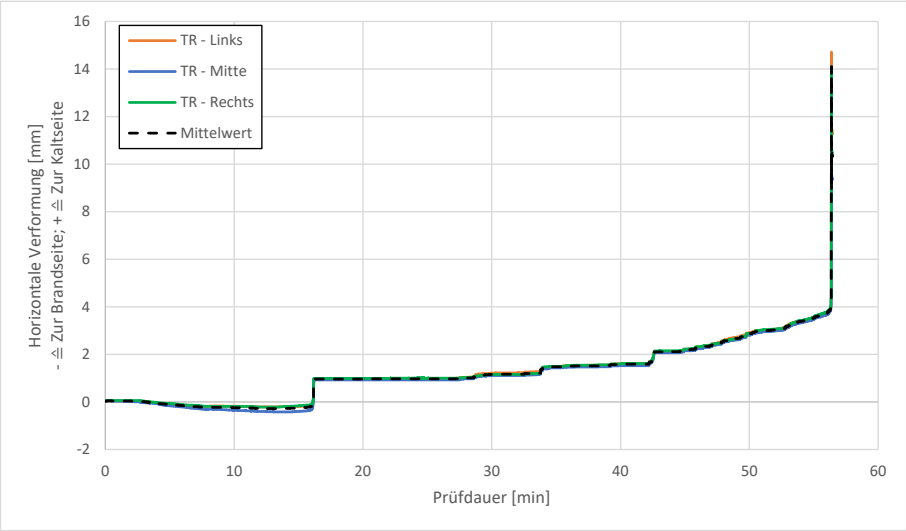


Abb. J. 24: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

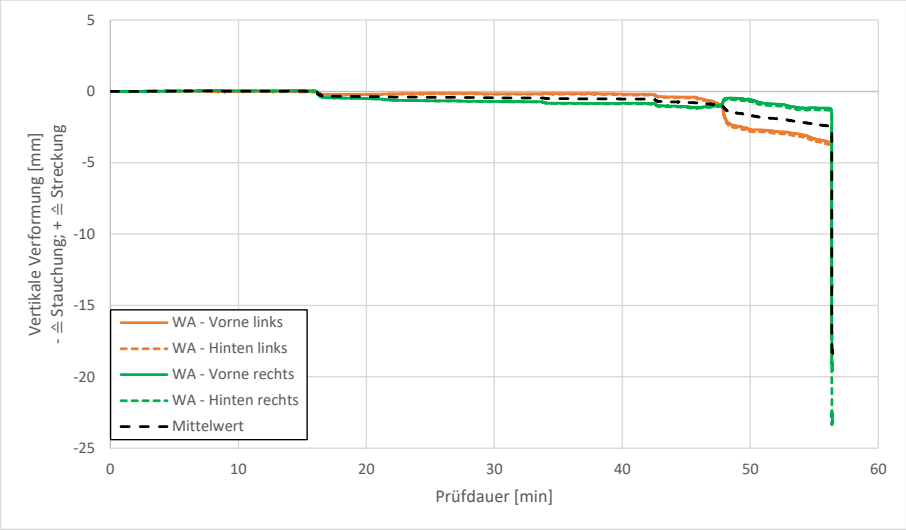


Abb. J. 25: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt. Abschließend ist ein Diagramm mit gemessenen Temperaturen unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite dargestellt.

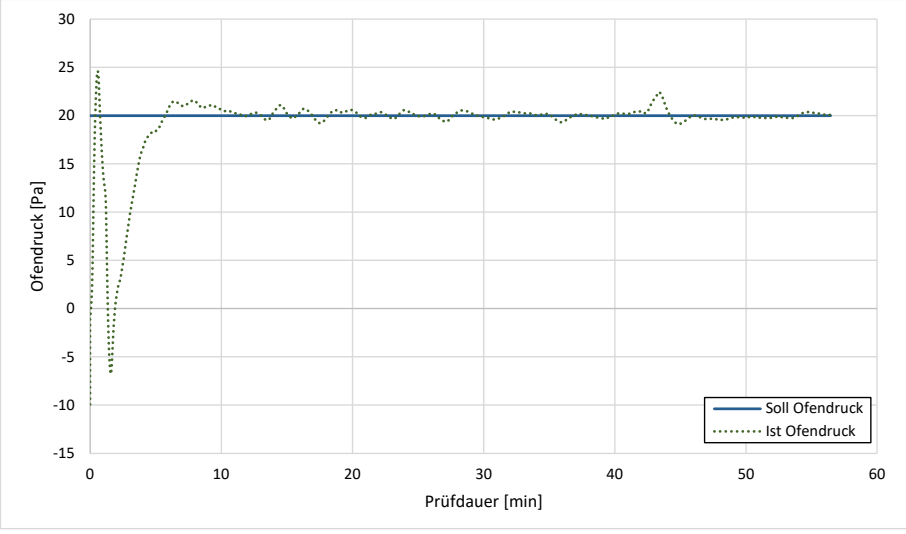


Abb. J. 26: Ofendruck während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

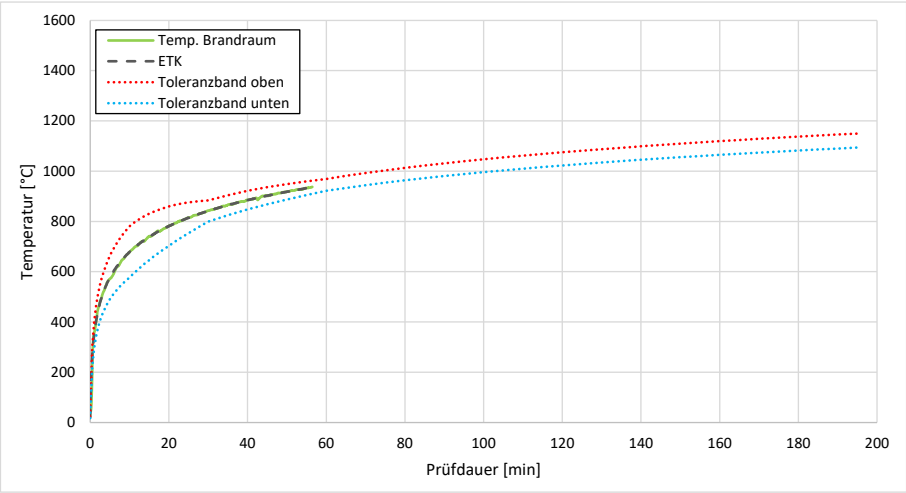


Abb. J. 27: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

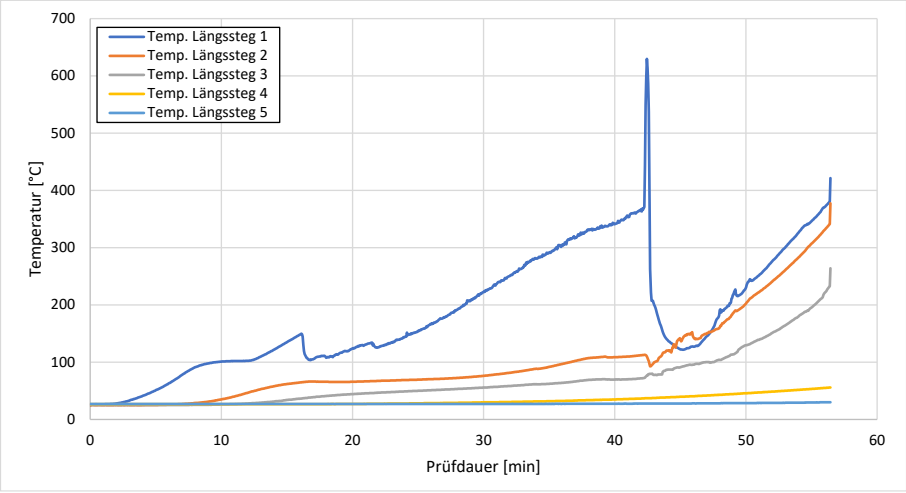


Abb. J. 28: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

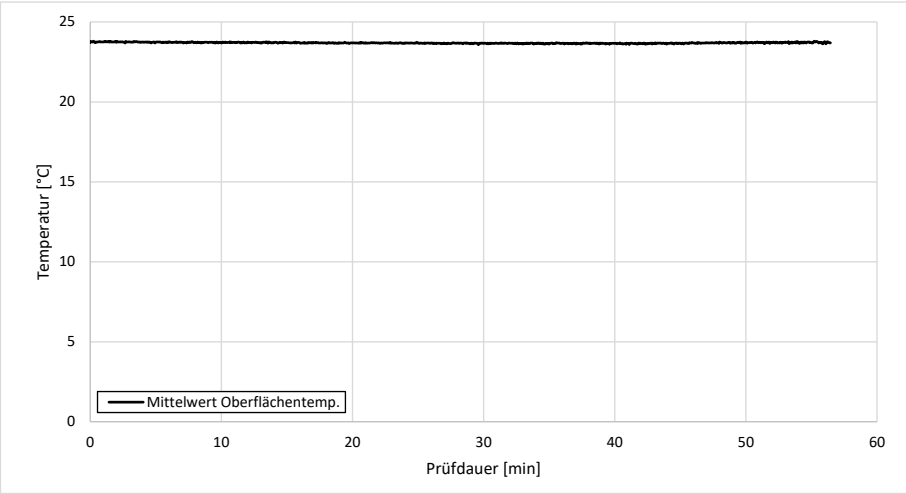


Abb. J. 29: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

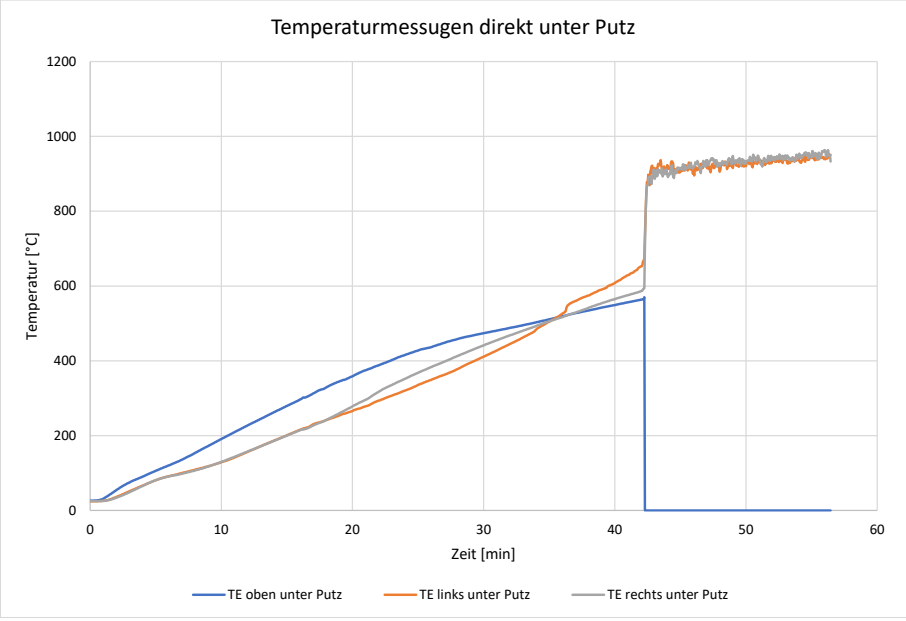


Abb. J. 30: Temperaturen auf der Wandoberfläche unter dem Putz auf der brandzugewandten Wandseite während des Brandverlaufes E3-WS09 V-365mm-600kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	12.09.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch Wand 3	Startzeit:	07:30
Versuchsnr.:	3	Endzeit:	08:45

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (600 kN)
0	Beginn Brandversuch
9	100 °C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
16	Lastabfall um ~15 kN und horizontaler Riss im oberen Wanddrittel
36	100 °C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
42	Abfall vom Putz und Außenlängssteg über gesamten Wandbereich
46	Abfall Ziegelscherben im oberen Wanddrittel; 100 °C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
47	Last fällt kontinuierlich sehr schnell ab bis zum Bauteilversagen
55	Abfall von kleineren Ziegelscherben im oberen Wanddrittel
56	Lautes Knackgeräusch, Stabilitätsversagen der Wand (Knicken) unterhalb der obersten Ziegelreihe

J.4 E4-WS09 V-365mm-600kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

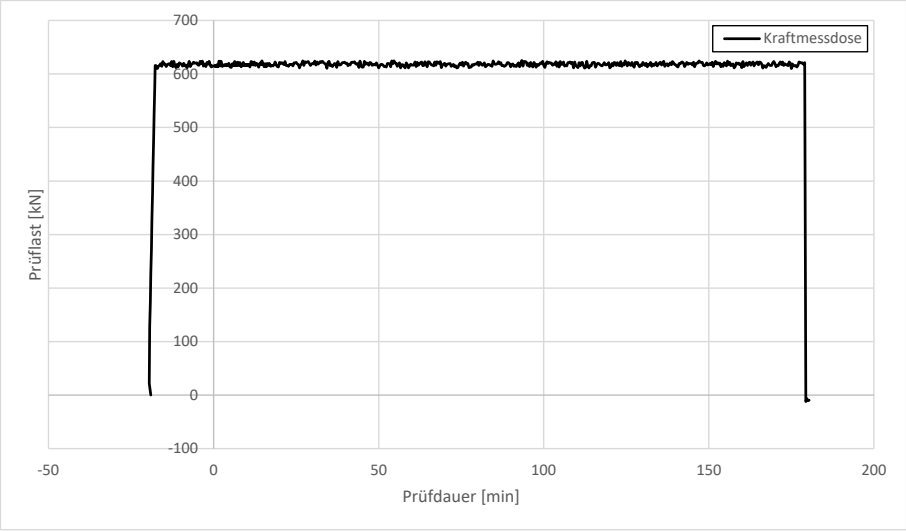


Abb. J. 31: Prüflast über die Prüfdauer E4-WS09 V-365mm-600kN

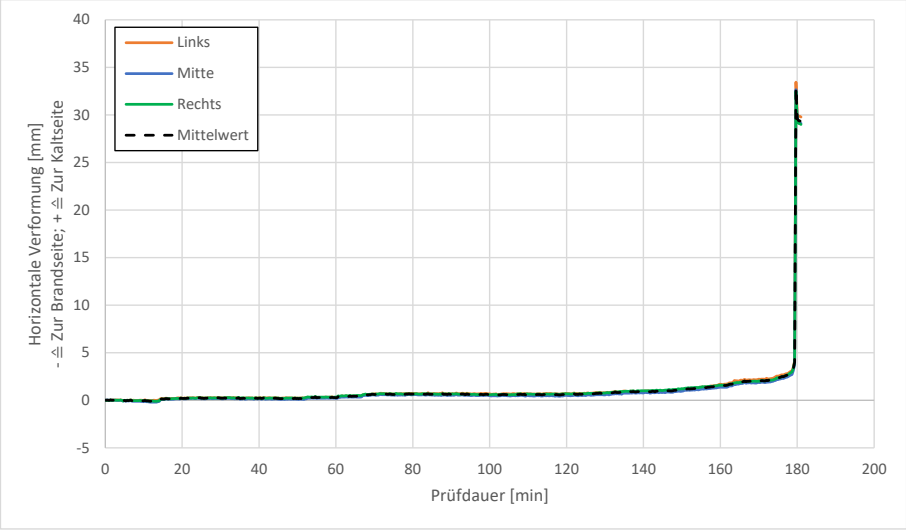


Abb. J. 32: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

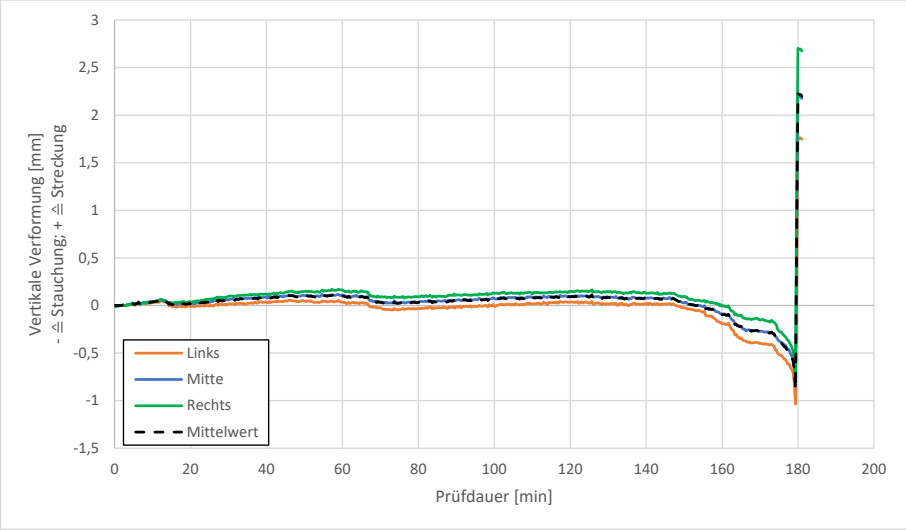


Abb. J. 33: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

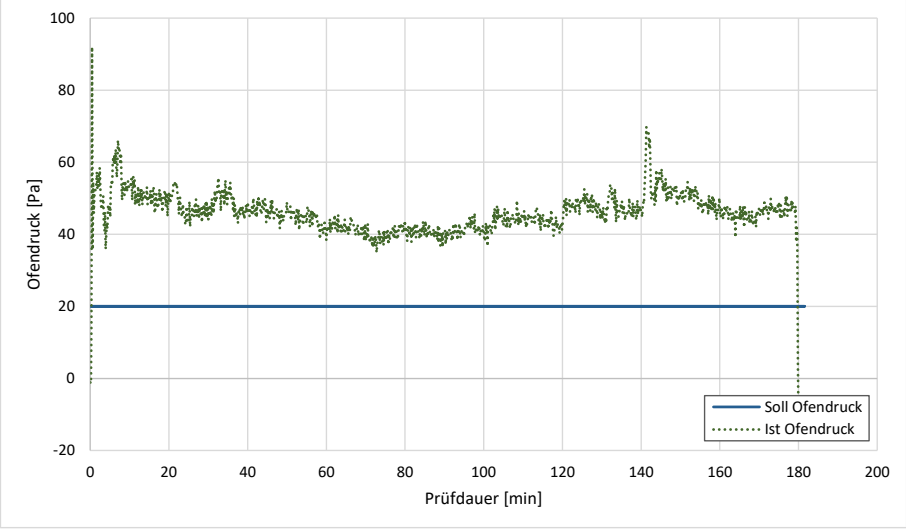


Abb. J. 34: Ofendruck während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

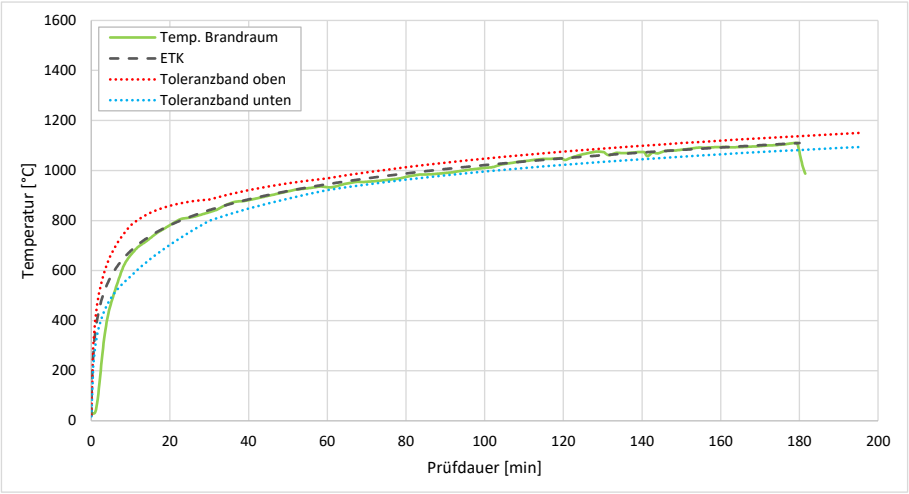


Abb. J. 35: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

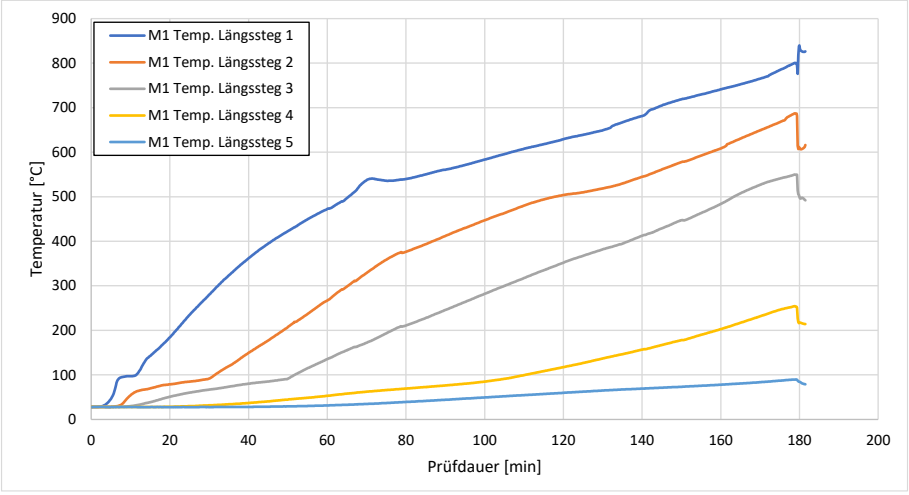


Abb. J. 36: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

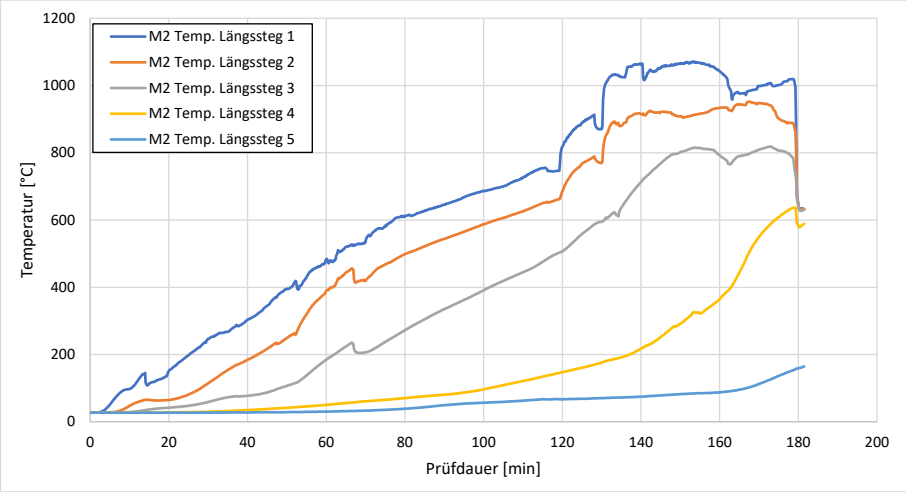


Abb. J. 37: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes E4-WS09 V-365mm-600kN

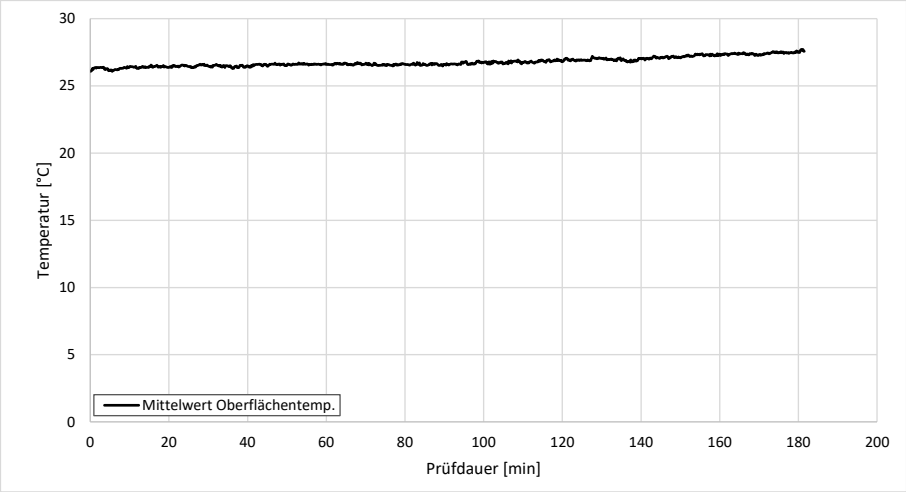


Abb. J. 38: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E-WS09 V-365mm-600kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Tavli	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	15.06.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch	Startzeit:	09:35
Versuchsnr.:	1	Endzeit:	12:51

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (600 kN)
0	Beginn Brandversuch
18	Riss im unteren Wandbereich sowie in Wandmitte kleiner Riss (770 °C)
35	Riss unterer Wandbereich wird breiter (875 °C)
60	Keine weiteren Schäden sichtbar
80	Riss unterer Wandbereich wird breiter (970 °C)
114	Schmaler Riss im oberen Wandbereich (1040 °C)
118	Putzteile fallen ab (1048 °C)
137	Putz fällt im unteren Wandbereich komplett ab und die ersten Ziegelscherben fallen ab (1070 °C)
139	Rechts in Wandmitte fällt Putz ab, weitere Ziegelscherben fallen ab (1073 °C)
161	Weitere Ziegelscherben fallen ab (1092 °C)
178	Versagen der Wand (1108 °C)

J.5 E5-WS09 V-365mm-1000kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

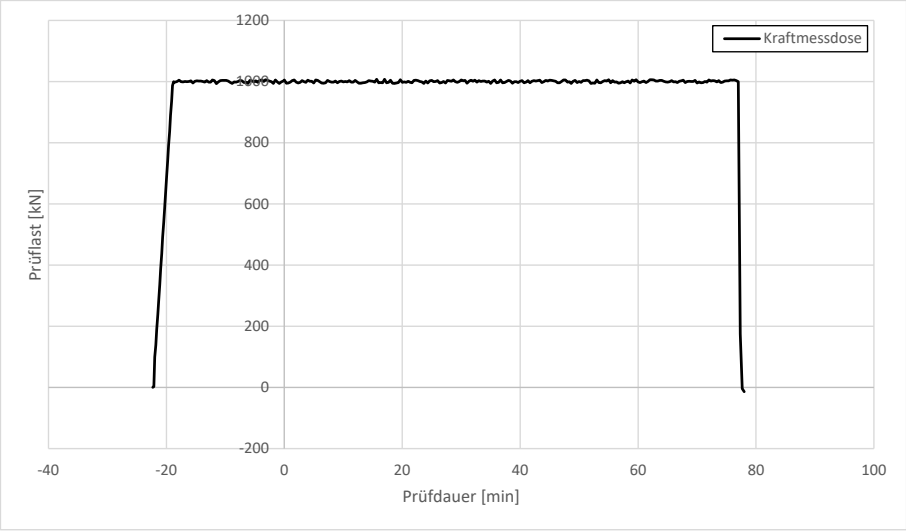


Abb. J. 39: Prüflast über die Prüfdauer E5-WS09 V-365mm-1000kN

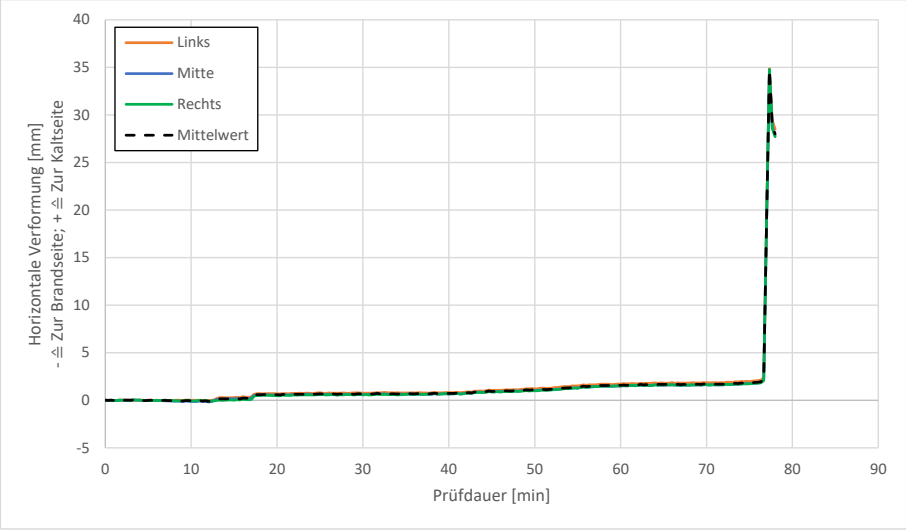


Abb. J. 40: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

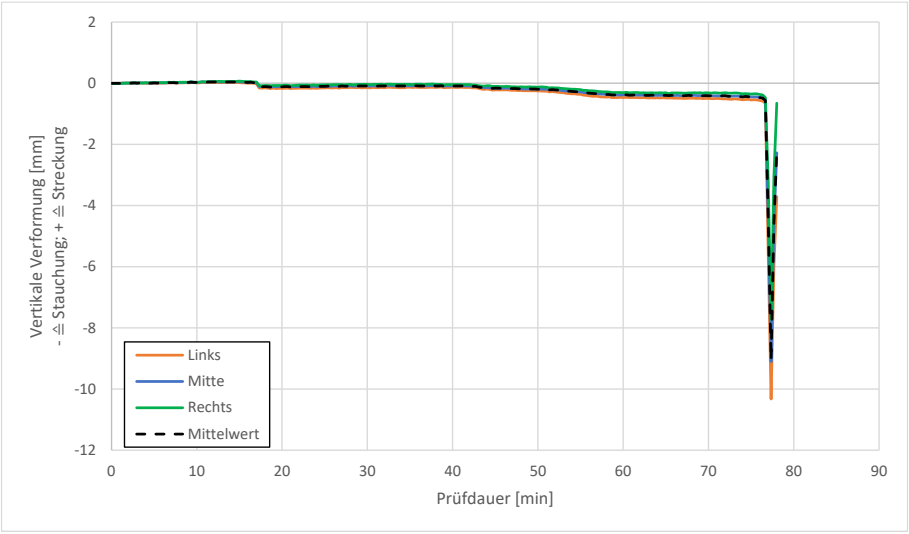


Abb. J. 41: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Daten für den Ofendruck für diese Prüfung liegen nicht vor. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

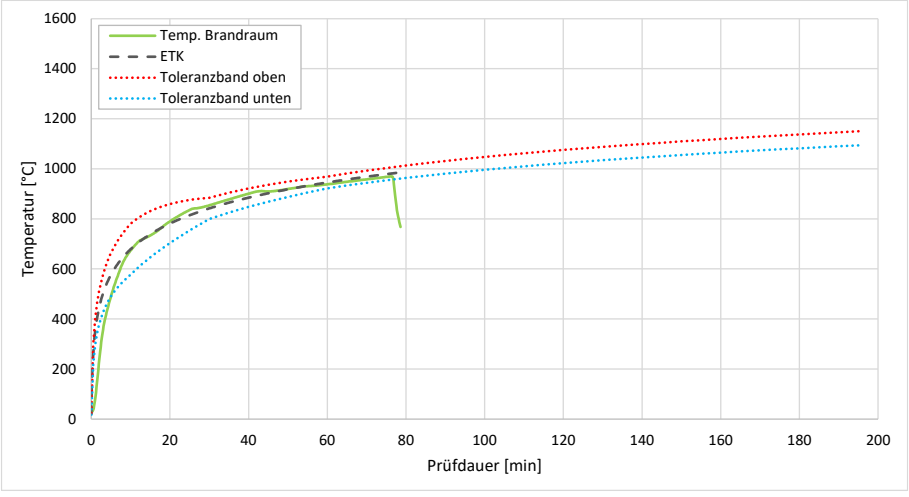


Abb. J. 42: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

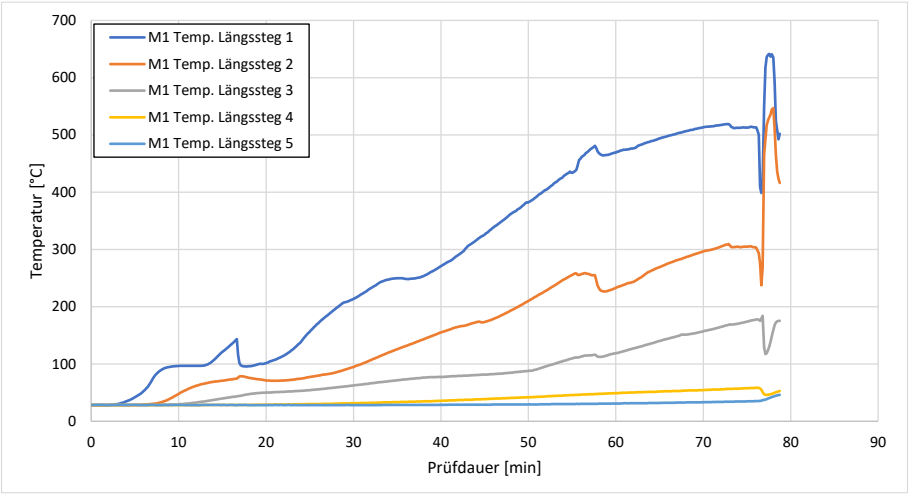


Abb. J. 43: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

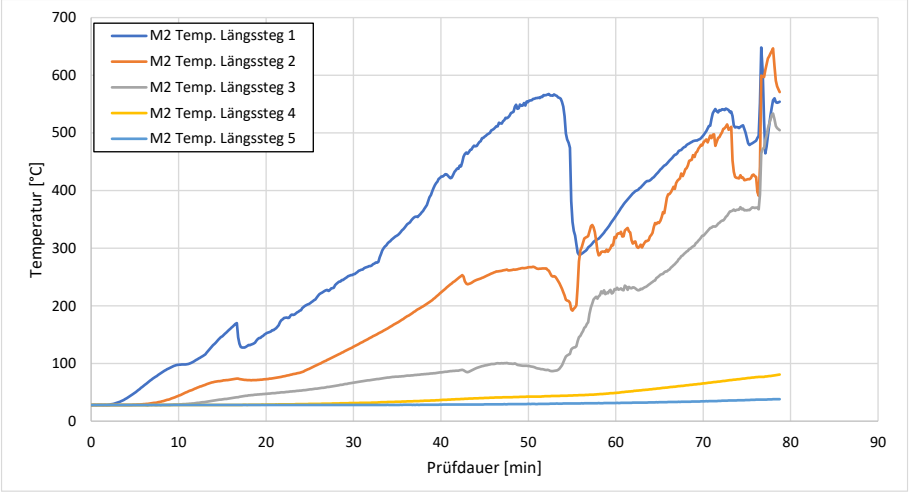


Abb. J. 44: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

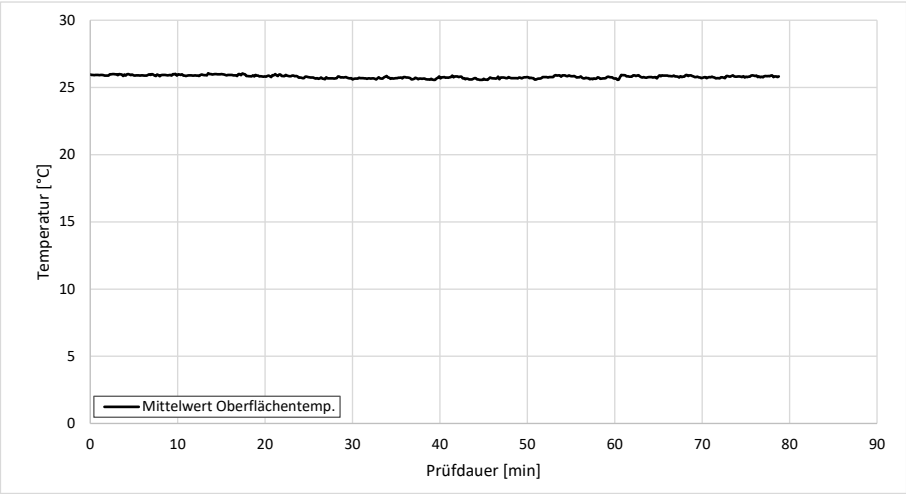


Abb. J. 45: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E5-WS09 V-365mm-1000kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Tavli	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	22.06.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch	Startzeit:	09:50
Versuchsnr.:	2	Endzeit:	11:24

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (1000 kN)
0	Beginn Brandversuch
16	Keine Schäden sichtbar
17	Riss unterer Wandbereich (765 °C)
49	Riss unterer Wandbereich wird breiter (918 °C)
58	Schmaler Riss in Wandmitte (934 °C)
74	Putz und Ziegelschalen fallen ab (960 °C)
75	Versagen der Wand (968 °C)

J.6 E6-WS09 V-365mm-1140kN

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

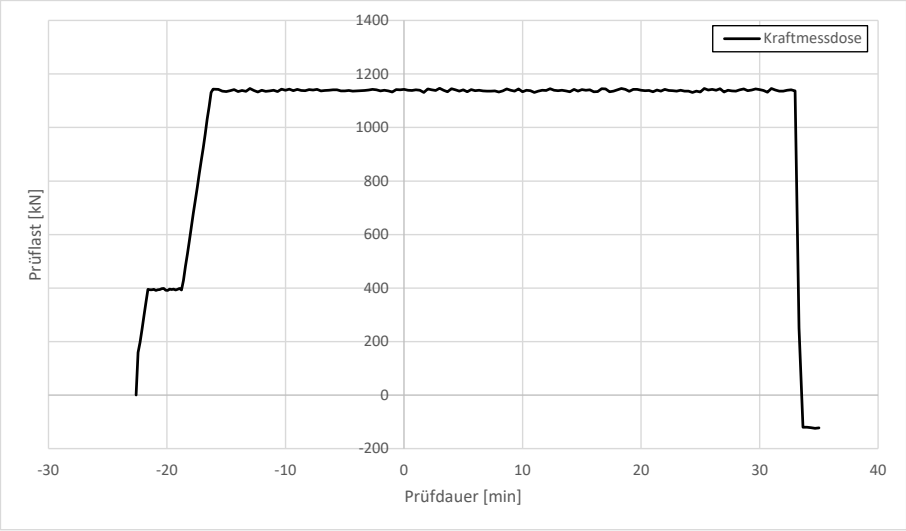


Abb. J. 46: Prüflast über die Prüfdauer E6-WS09 V-365mm-1140kN

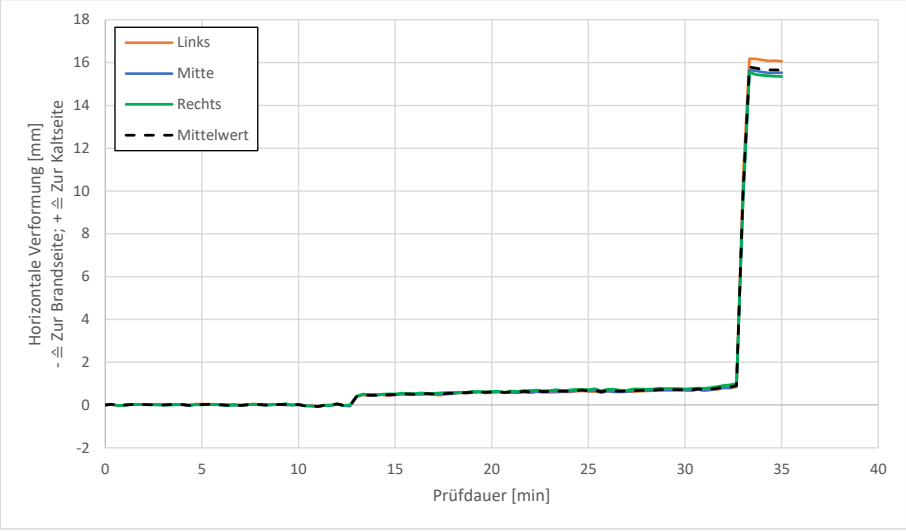


Abb. J. 47: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

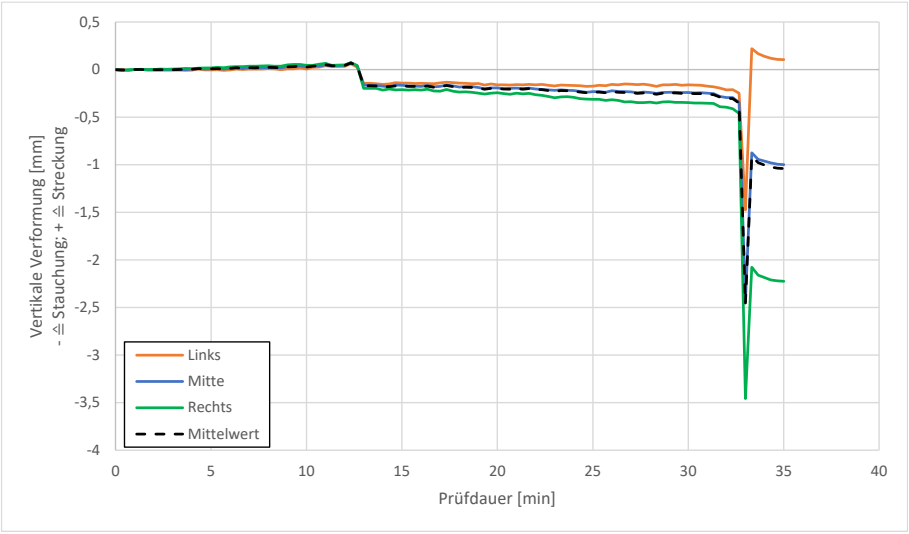


Abb. J. 48: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

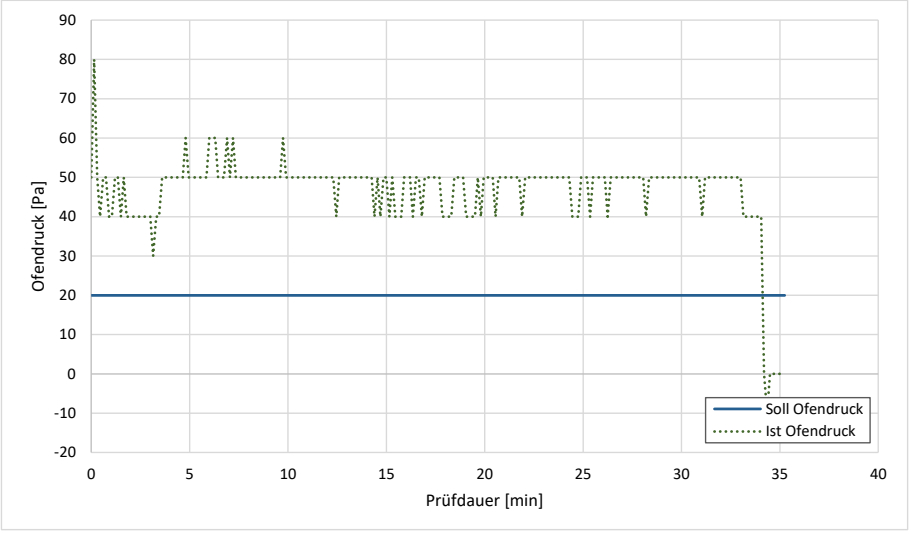


Abb. J. 49: Ofendruck während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

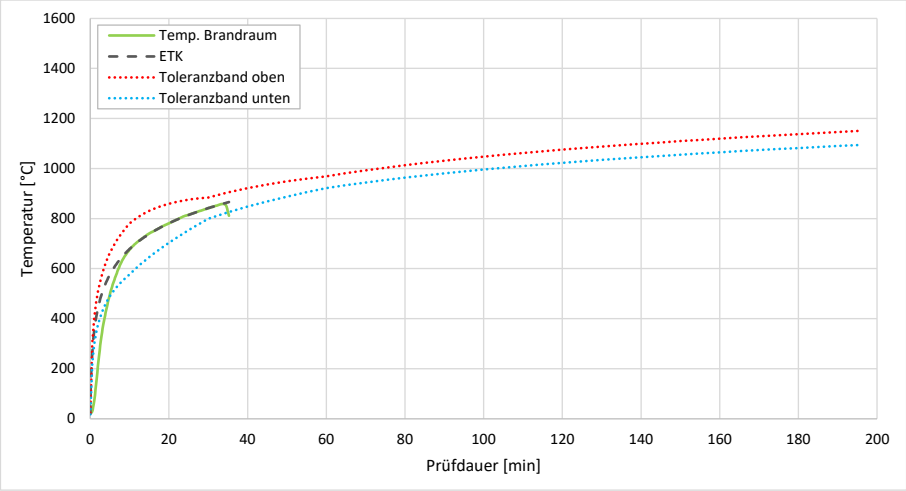


Abb. J. 50: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

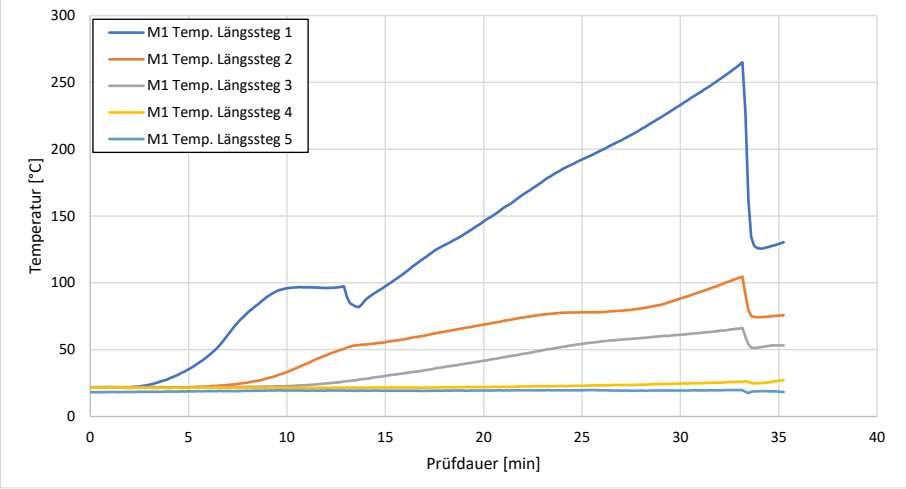


Abb. J. 51: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M1 während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

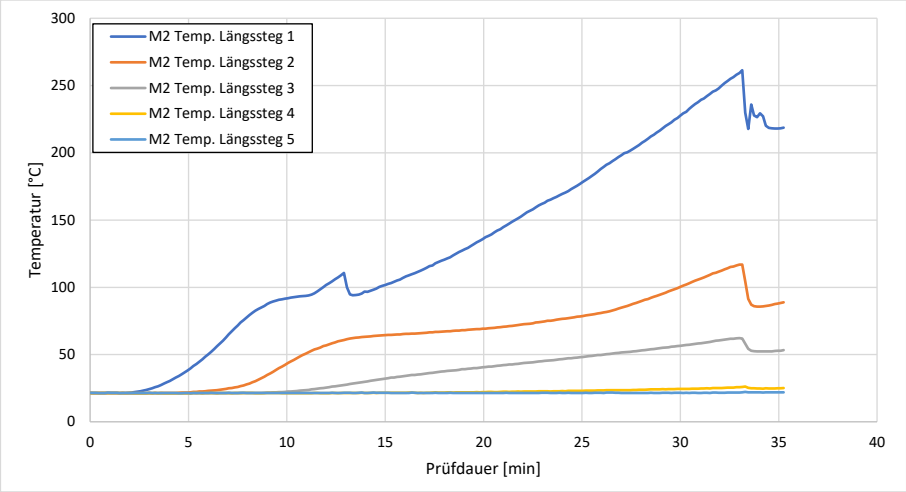


Abb. J. 52: Temperatur ausgewählter Ziegellängsstege Messstelle M2 während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

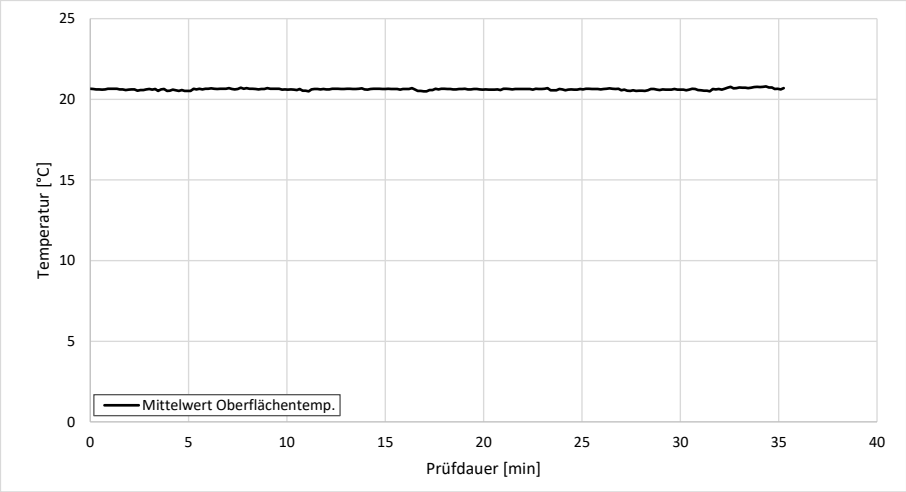


Abb. J. 53: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E6-WS09 V-365mm-1140kN

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Brandofen
Projektleitung:	Tavli	Ofensteuerung:	IZF
Versuchsreihe:	1,5 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	26.07.2023
Versuchsbez.:	zentrisch-zentrisch	Startzeit:	10:26
Versuchsnr.:	3	Endzeit:	11:16

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (1140 kN), Knackgeräusche
0	Beginn Brandversuch
12	Riss im unteren Wandbereich (720 °C)
30	Keine weiteren Schäden sichtbar
33	Putz und Ziegelscherben fallen ab
33	Versagen der Wand (854°C)

J7 E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

Bei dem Versuch E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen. wurde eine 1,0 m lange Wand mit einer exzentrischen Lasteinleitung von 200 kN im zwei Drittelpunkt der Wanddicke belastet. Die 365 mm dicke Ziegelwand stand zu zwei Drittel Auf einem Betonbalken auf.

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN/m) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

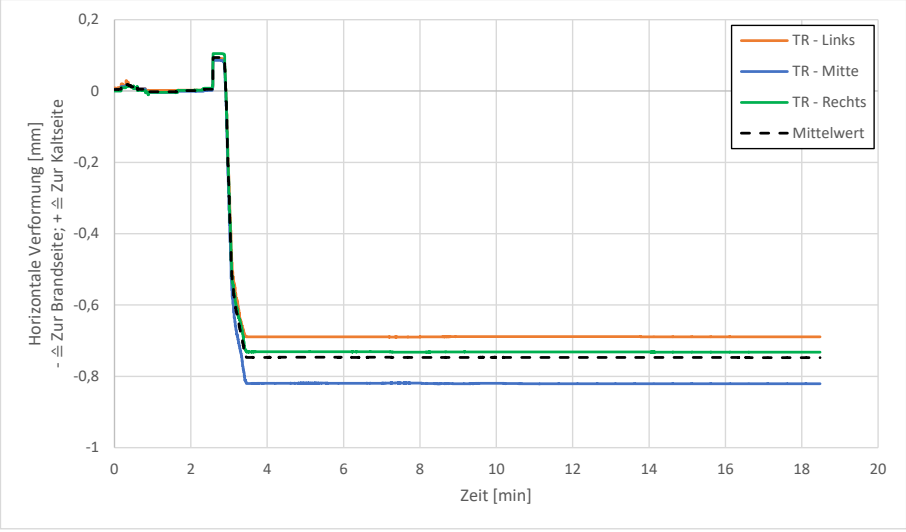


Abb. J. 54: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E7-WS09 V-365mm--200kN-m-exzen.

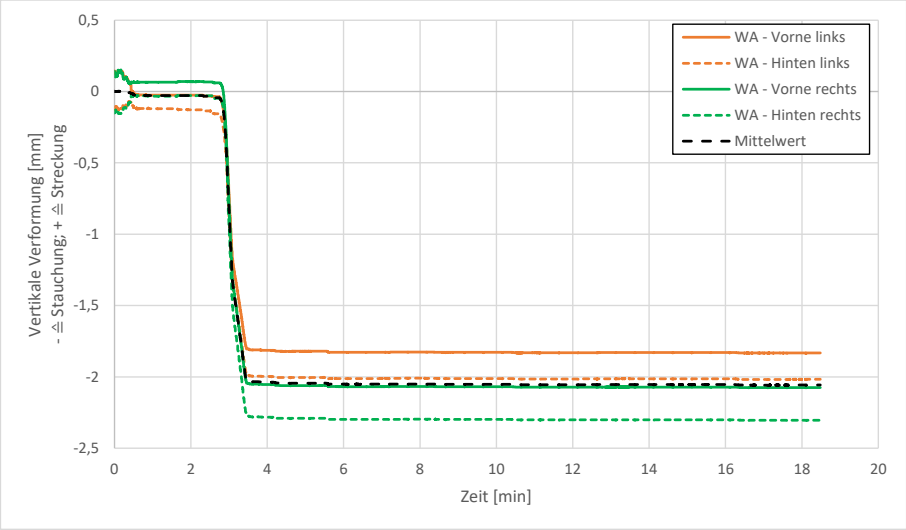


Abb. J. 55: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E7-WS09 V-365mm--200kN-1m-exzen.

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

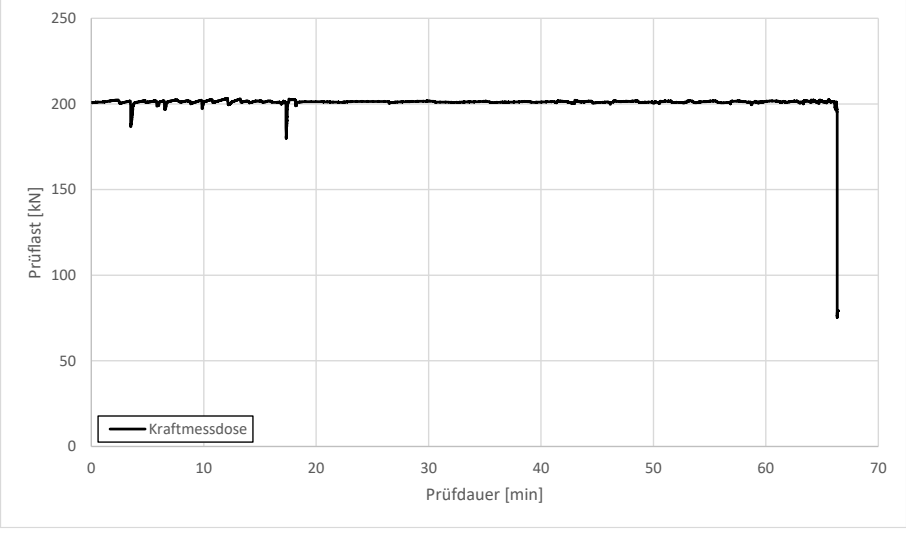


Abb. J. 56: Prüflast über die Prüfdauer E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

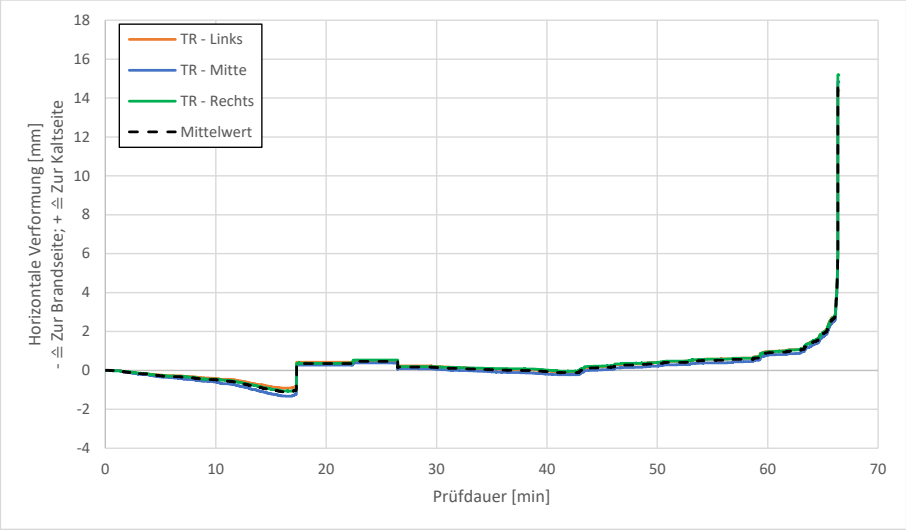


Abb. J. 57: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

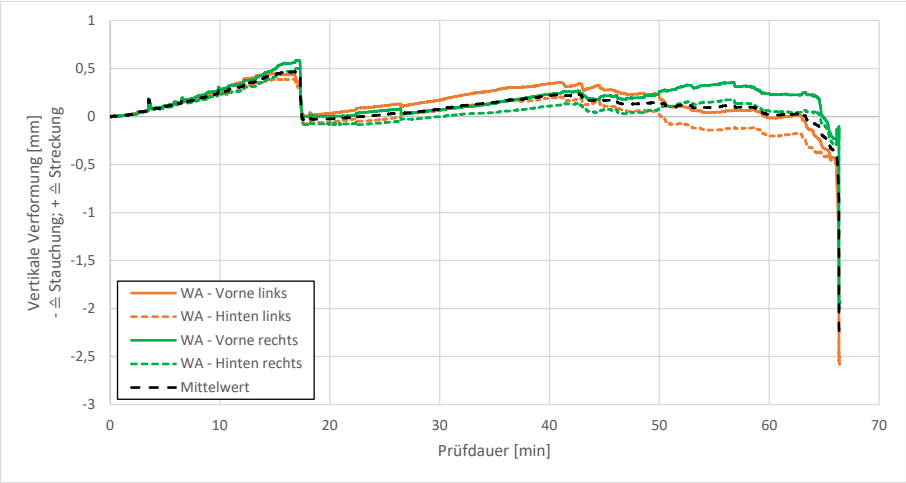


Abb. J. 58: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm,

welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

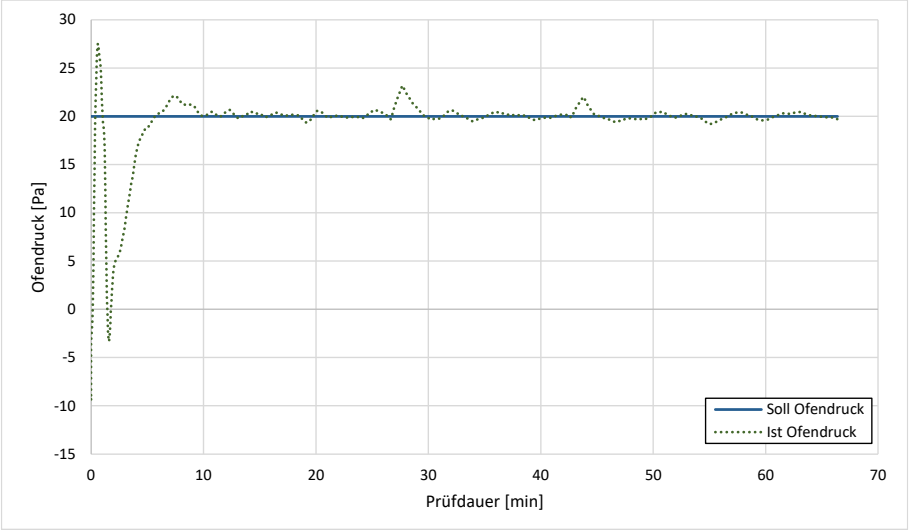


Abb. J. 59: Ofendruck während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

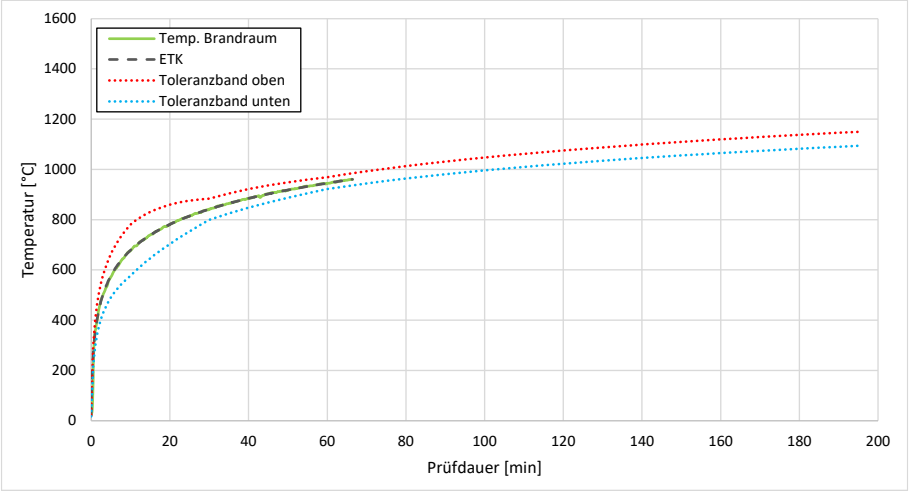


Abb. J. 60: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

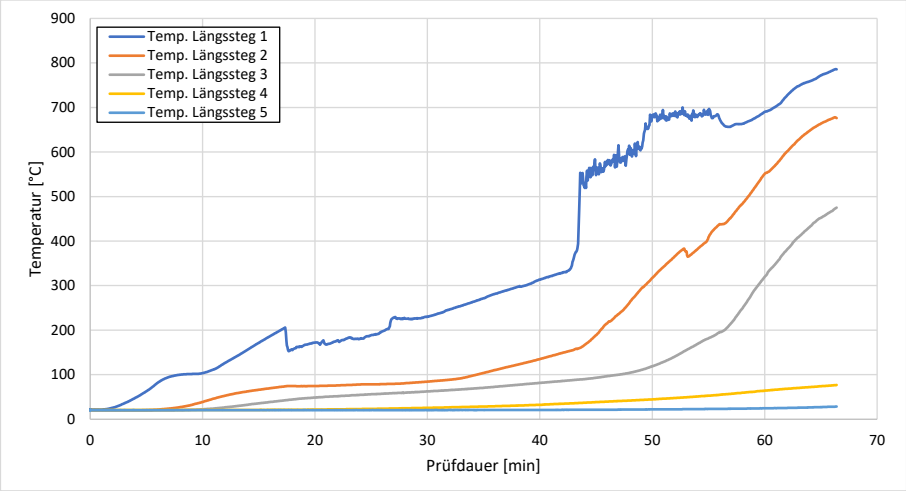


Abb. J. 61: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

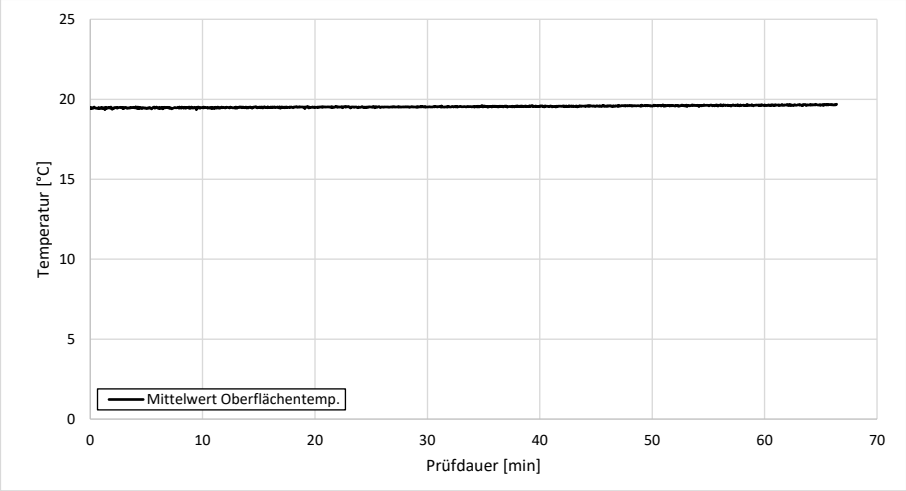


Abb. J. 62: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E7-WS09 V-365mm-200kN-1m-exzen.

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 1,0 m x 0,365 m	Datum:	20.10.2023
Versuchsbez.:	exzentrisch-exzentrisch Wand 6	Startzeit:	07:45
Versuchsnr.:	6	Endzeit:	09:00

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (200 kN)
0	Beginn Brandversuch
3	Lastabfall um ~14 kN sowie horizontaler Riss im mittleren Wandbereich
8	100°C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
17	Lastabfall um ~20 kN sowie horizontaler Riss im oberen Wanddrittel
34	100°C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
42	Abfall vom Putz ab Wandmitte bis zum oberen Wandende
47	100°C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
52	Immer wieder vereinzelter Abfall von Ziegelscherben im oberen Wandbereich
63	Abfall weiterer Ziegelscherben im oberen Wanddrittel, die Prüflast fällt schneller ab
66	Lastabfall um ~5 kN sowie schnellerer Abfall der Prüflast bis zum Bauteilversagen und Ausknicken der Wand in der obersten Ziegelreihe

J.8 E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

Bei dem Versuch E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen. wurde eine 3,0 m lange Wand mit einer exzentrischen Lasteinleitung von 200 kN/m im zwei Drittelpunkt der Wanddicke belastet. Die 365 mm dicke Ziegelwand stand zu zwei Drittel Auf einem Betonbalken auf.

Vorbelastung

Es folgen die horizontalen und vertikalen Verformungen, welche sich während des Aufbringens der Prüflast (200 kN/m) und der anschließenden Belastungsdauer von 15 Minuten eingestellt haben.

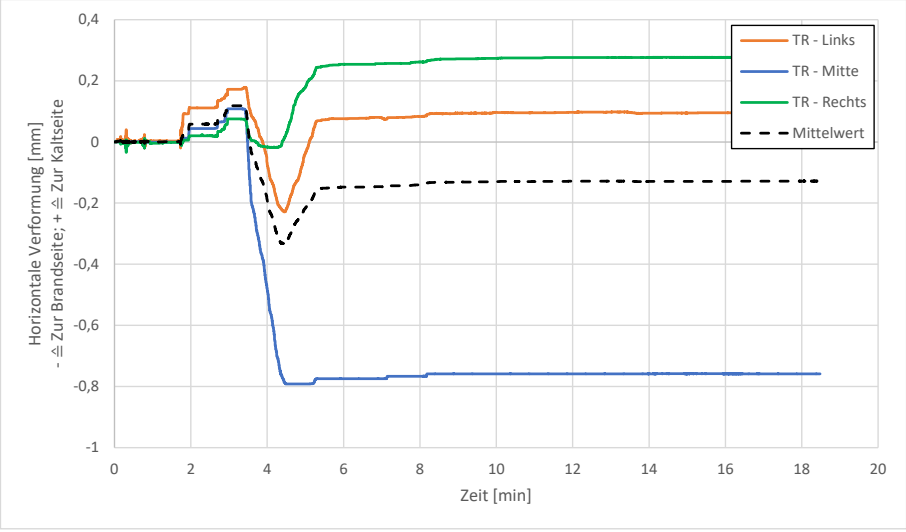


Abb. J. 63: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

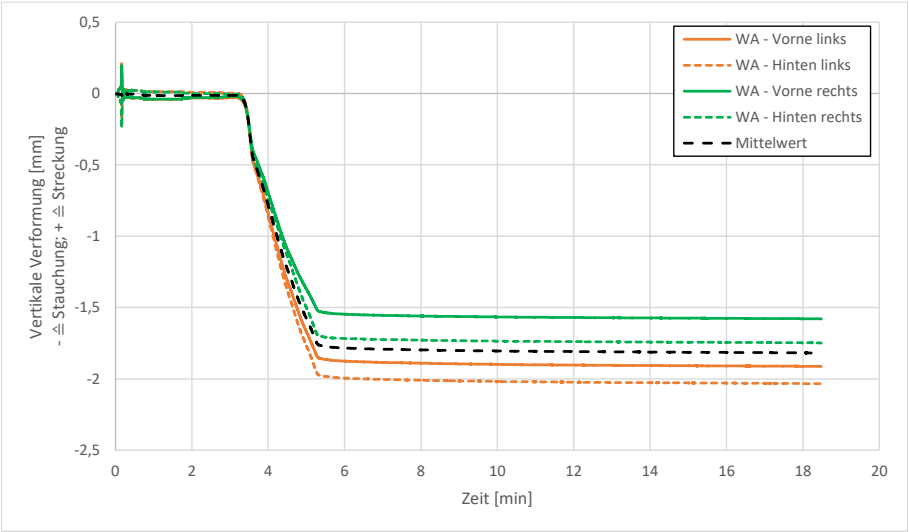


Abb. J. 64: Vertikale Verformung während der Belastung und 15-minütige Haltedauer E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

Prüflast und Verformungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Veränderung in der Prüflast sowie die Verformungen über die Prüfdauer.

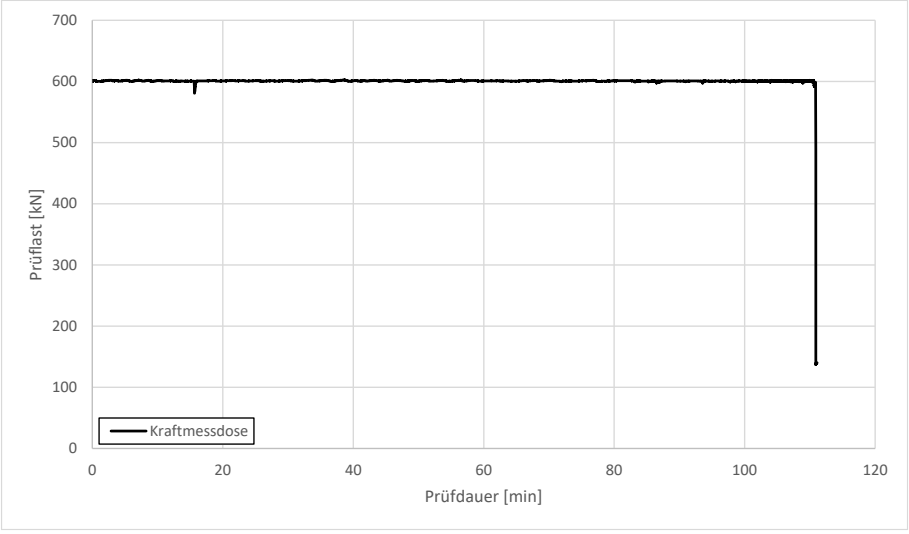


Abb. J. 65: Prüflast über die Prüfdauer E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

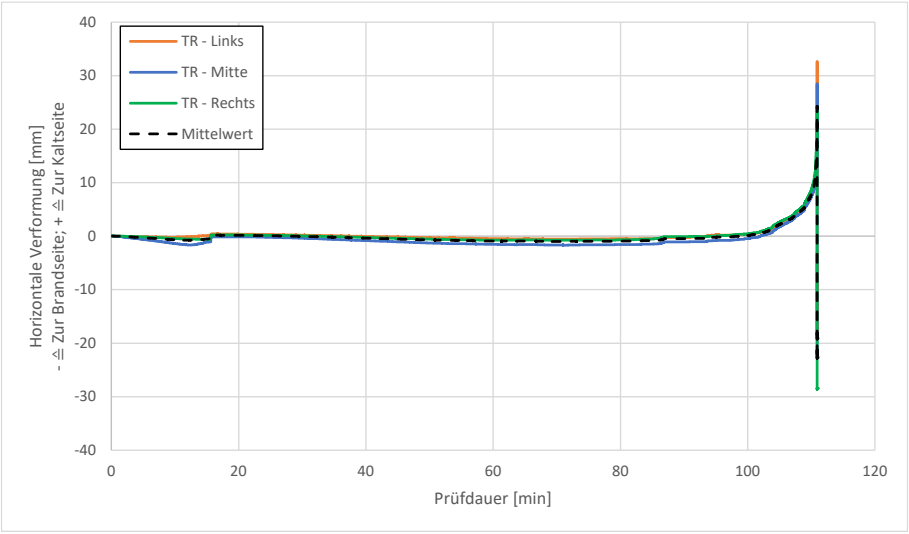


Abb. J. 66: Horizontale Verformung in Wandmitte und an den seitlichen Rändern in halber Wandhöhe während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

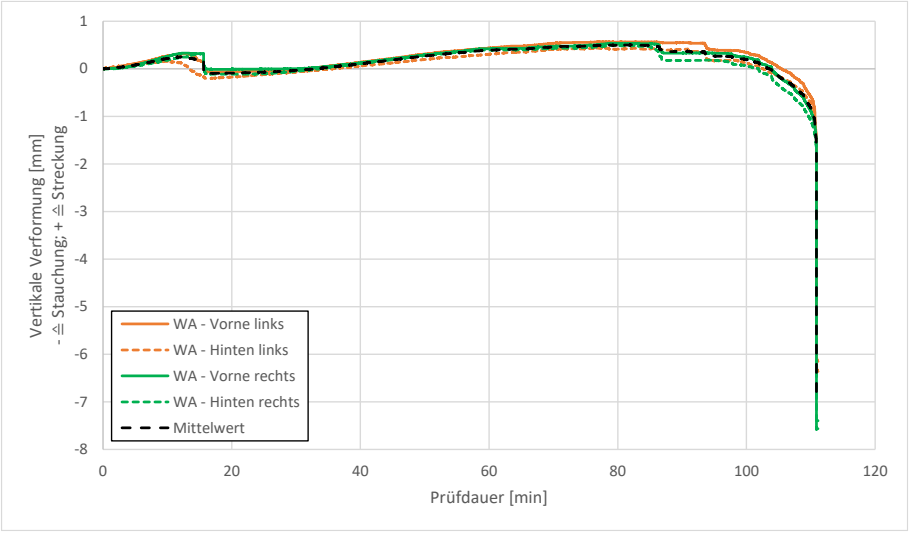


Abb. J. 67: Vertikale Verformung während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

Ofendruck und Temperaturmessungen während der Feuerwiderstandsprüfung

Es folgt ein Diagramm, welches den Ofendruck während der Prüfdauer aufzeigt. Des Weiteren zeigt ein Diagramm die Temperatur (gemäß der ETK) im Brandofen und dessen Toleranzbänder auf. Weiter folgt ein Diagramm, welches die Temperaturen der

Ziegellängsstege der brandzugewandten Wandseite aufzeigt, sowie ein Diagramm, welches die auf der brandabgewandten Oberfläche gemessenen Temperaturen im Mittel zeigt.

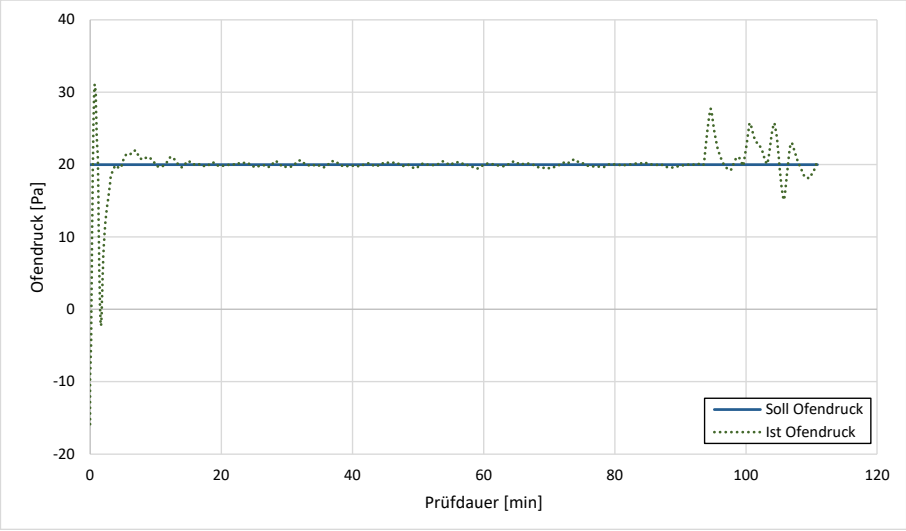


Abb. J. 68: Ofendruck während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

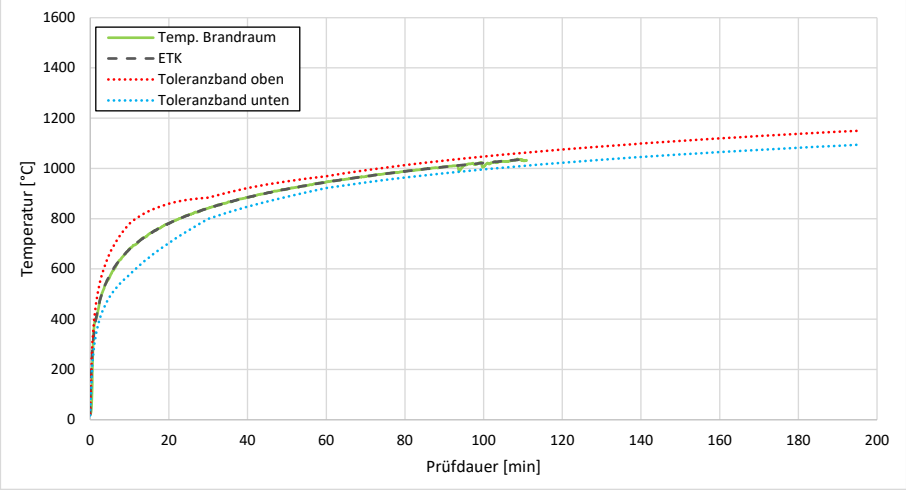


Abb. J. 69: Temperatur im Brandofen während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

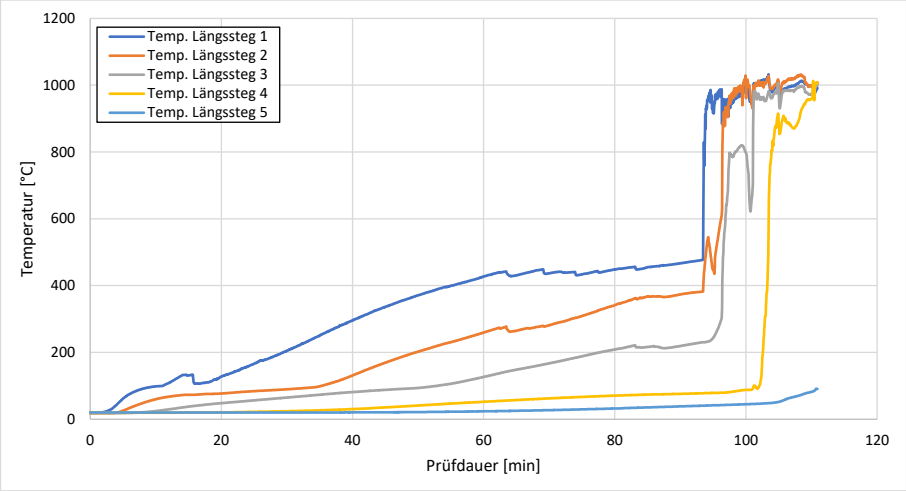


Abb. J. 70: Temperatur der Ziegellängsstege in Wandmitte während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

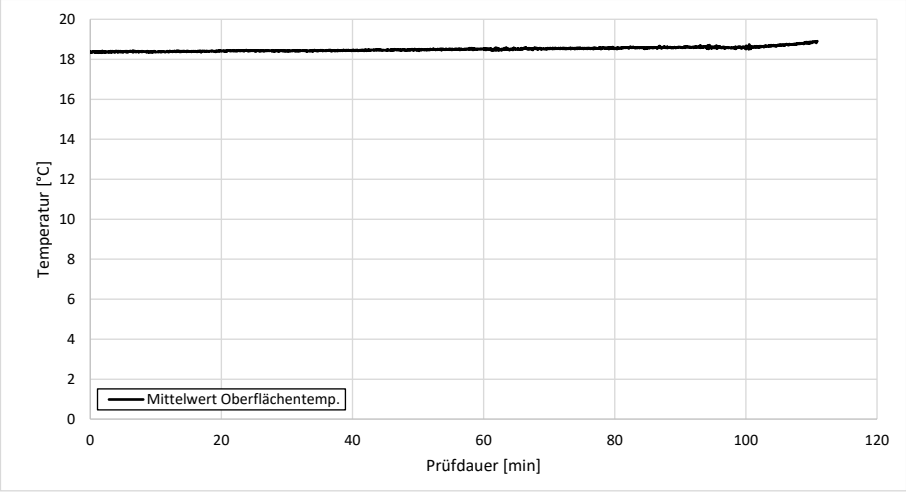


Abb. J. 71: Mittelwert der Oberflächentemperatur der brandabgewandten Wandseite während des Brandverlaufes E8-WS09 V-365mm-200kN/m-3m-exzen.

Prüfprotokoll

Projekt:	AIF IGF 2. Forschungsprojekt	Prüfofen:	Großer Brandofen
Projektleitung:	Kruse	Ofensteuerung:	Klein
Versuchsreihe:	3,0 m x 3,0 m x 0,365 m	Datum:	21.02.2024
Versuchsbez.:	exzentrisch-exzentrisch Wand 10	Startzeit:	09:10
Versuchsnr.:	13	Endzeit:	11:05

Prüfdauer (min)	Allgemeine Beobachtungen am Probekörper (Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Verkohlen etc.)
-15	Aufbringen der Prüflast (600 kN)
0	Beginn Brandversuch
11	100°C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
15	Lastabfall um ~20 kN sowie Riss im Putz im unteren Wandbereich
35	100°C beim 2. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
52	100°C beim 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
53	Abfall vom Putz im unteren linken Wandbereich
92	Horizontaler Riss in Wandmitte
93	Großflächiger Putzabfall im unteren Wandbereich; 600°C beim 1. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
96	600°C beim 2. und 3. Thermoelement im Ziegelinnerem in Wandmitte
99	Großflächiger Putzabfall im oberen Wandbereich
99 bis 110	Ziegelscherben fallen ab, Risse im Putz auf brandabgewandter Wandseite
110	Schneller Abfall der Prüflast bis zum Bauteilversagen (Ausknicken der Wand in Wandmitte)

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Außen- und Innenputz. Die Probenherstellung sowie die anschließende Prüfung fanden an der RPTU und dem IZF statt.

Tab. J. 1: Prüfergebnisse Innenputz KP 36 W Probe 1 RPTU

Name: KP 36 W		Prüfer: Quindt		Herstelltag: 03.05.23		Prüftag: 25.08.23		Alter: 114 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	269,3	159,6	40,2	43,4	464	0,92	3715	2,32
2	276,5	159,5	40,4	43,6	458	0,89	3013	1,88
3	267,6	159,5	40,3	43,5	493	0,97	3243	2,03
					Mittelwert:	0,93	Mittelwert:	2,08

Tab. J. 2: Prüfergebnisse Innenputz KP 36 W Probe 1 IZF

Name: KP 36 W		Prüfer: IZF		Herstelltag: 11.05.23		Prüftag: 28.08.23		Alter: 109 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	40,0	40,0	150	0,35	2365	1,48
2	-	160,0	40,0	40,0	152	0,36	2215	1,38
3	-	160,0	40,0	40,0	120	0,28	2255	1,41
					Mittelwert:	0,33	Mittelwert:	1,43

Tab. J. 3: Prüfergebnisse Außenputz MP 69 Probe 1 RPTU

Name: MP 69		Prüfer: Quindt		Herstelltag: 04.05.23		Prüftag: 25.08.23		Alter: 113 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	269,3	160,1	40,0	40,2	801	1,86	9085	5,68
2	276,5	160,0	40,0	40,1	818	1,91	8728	5,46
3	267,6	160,0	40,0	40,0	933	2,19	9382	5,86
					Mittelwert:	1,98	Mittelwert:	5,67

Tab. J. 4: Prüfergebnisse Außenputz MP 69 Probe 1 IZF

Name: MP 69		Prüfer: IZF		Herstelltag: 11.05.23		Prüftag: 28.08.23		Alter: 109 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	40,0	40,0	314	0,74	4863	3,04
2	-	160,0	40,0	40,0	392	0,92	5218	3,26
3	-	160,0	40,0	40,0	374	0,88	5252	3,28
					Mittelwert:	4,05	Mittelwert:	3,18

Es folgen die Ergebnisse der Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit für den Dünnbettmörtel maxit mur 900 D für jede Wand, welche an der RPTU hergestellt und geprüft wurde sowie einmalig für die Versuche beim IZF.

Tab. J. 5: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand I1-WS09 V-365mm-500kN

Name: WS09 W2		Prüfer: Quindt		Herstelltag: 04.04.23		Prüftag: 23.08.23		Alter: 141 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	269,3	160,4	40,1	39,9	1202	2,82	22911	14,32
2	276,5	160,1	40,7	39,9	1370	3,17	21402	13,38
3	267,6	160,7	40,3	40,0	996	2,32	21786	13,62
					Mittelwert:	2,77	Mittelwert:	13,77

Tab. J. 6: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand I2-WS09 V-365mm-350kN

Name: WS09 W1		Prüfer: Quindt		Herstelltag: 04.04.23		Prüftag: 04.09.23		Alter: 153 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	239,8	160,2	41,1	40	1255	2,86	13492	8,43
2	244,7	160,4	41,2	39,9	1279	2,92	15644	9,78
3	248,2	160,5	41,2	40,0	1250	2,84	16178	10,11
					Mittelwert:	2,87	Mittelwert:	9,44

Tab. J. 7: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für Wand I3-WS09 V-365mm-600kN

Name: WS09 W3		Prüfer: Mejder		Herstelltag: 04.04.23		Prüftag: 12.09.23		Alter: 161 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	259,5	161,0	39,5	39,9	1232	2,94	20948	13,09
2	258,1	160,6	40,3	39,8	1382	3,25	19728	12,33
3	260,6	160,1	40,2	39,9	1190	2,79	20931	13,08
					Mittelwert:	2,99	Mittelwert:	12,83

Tab. J. 8: Prüfergebnisse maxit mur 900 D für die Wände am IZF

Name: WS09 IZF		Prüfer: IZF		Herstelltag: 16.02.23		Prüftag: 23.08.23		Alter: 32 Tage
Probe	Masse	Länge	Breite	Höhe	Bruchlast F_f	Biegefestigkeit R_f	Mittelwert Bruchlast F_c	Mittelwert Druckfestigkeit R_c
Nr.	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[N]	[MPa]
1	-	160,0	39,0	40,0	1613	3,88	23990	14,99
2	-	160,0	40,0	40,0	1810	4,24	22614	14,13
3	-	160,0	39,0	40,0	1672	4,02	23190	14,49
					Mittelwert:	4,05	Mittelwert:	14,54

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Heiner Kruse
Geburtsjahr:	1993
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schulischer und beruflicher Werdegang

2006 – 2012	Pädagogium Bad Sachsa mit dem Abschluss „Allgemeine Hochschulreife“ (Abitur)
2012 – 2018	Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Braunschweig mit dem Abschluss „Master of Science“ (M.Sc.)
seit 2018	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion