



## Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

# Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen

### Durchgeführt von:

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

### Projektleitung

Dr.-Ing. Norman Werther

### Projektbearbeitung

Dipl. Ing. (BA) Veronika Hofmann M.Sc.  
Elisabeth Kammerer, M.Sc.  
Michael Rauch, M.Sc.

**Laufzeit:** 01. November 2015 bis 31. März 2018

### Gefördert durch:



FORSCHUNGSINITIATIVE  
**Zukunft BAU**



## Kurzbeschreibung

Analytische Bemessungsregeln zur Feuerwiderstandsdauer von Wand- und Deckenelementen in Holzbauweise mit biogenen Dämmstoffen liegen aktuell nicht vor. Entsprechende rechnerische Nachweise zum Feuerwiderstand, wie EN 1995-1-2 oder DIN 4102-4 von Wand- und Deckenelementen im Holzbau beschränken sich aktuell auf ungedämmte oder mit Mineralwolle gedämmte Holzrahmenelemente. Darüber hinaus liegen herstellerbezogene Verwendbarkeitsnachweise vor.

Ziel dieser Arbeit ist deshalb die geregelte Anwendung biogener Dämmstoffe im Geschossbau und weiterführenden Sonderbauten zu ermöglichen, in welchen brandschutztechnische Anforderungen an Wände und Decken in Hinblick auf den Raumabschluss und die Tragfähigkeit gestellt werden. Hierfür wurden im Rahmen dieser Arbeit Bemessungsregeln erarbeitet, mit denen das gestellte Sicherheitsniveau im Hinblick auf den Feuerwiderstand gewährleistet werden kann.

Der erste Teil des Vorhabens umfasst die experimentelle Ermittlung ausstehender Materialkennwerte biogener Dämmstoffe zur Anwendung numerischer Simulationen. Durch die ermittelten temperaturabhängigen Werte der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmespeicherkapazität wurden Wärmedurchgänge und Temperaturverteilungen von Holzrahmenelementen unter Normbrandbeanspruchung (ETK) in der thermischen FE-Simulation abgebildet. Für das vorliegende Projekt wurden als Dämmstoffe Holzfaser- und Zelluloseprodukte gewählt, da diese den derzeit größten Marktanteil abdecken.

Anschließend erfolgte eine Zusammenstellung von praxisrelevanten Konstruktionsaufbauten für Wand- und Deckenaufbauten mit biogenen Dämmstoffen. Hierbei wurden alle Randbedingungen, die ein verändertes Durchwärmungsverhalten der Konstruktion nach sich ziehen, sowie alle Einflussfaktoren, die ein verändertes Abbrandverhalten des tragenden Holzquerschnittes in der Konstruktion hervorrufen, dargestellt.

Anschließend wurden mittels experimenteller Durchwärmungsversuche und Brandversuche die grundlegenden Einflussfaktoren verschiedener Schichtarten, deren Dicken sowie der Einfluss von Kombinationen der einzelnen Schichten einer Wand- oder Deckenkonstruktion in Holzbauweise untersucht und bewertet, um eine Aussage zur Temperaturverteilung innerhalb der Konstruktion unter Temperaturbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) treffen zu können. Ferner wurden mit Hilfe von Kleinbrandversuchen die Restquerschnitte der tragenden Holzbalken/-ständer ermittelt, damit der Einfluss der Schutzwirkung der Dämmungen auf das Abbrandverhalten der Holzrippen beurteilt werden konnte.

Darauf aufbauend dienten numerische Bauteilsimulationen dazu, Parameterstudien durchzuführen, mit deren Hilfe die Koeffizienten innerhalb eines analytischen Bemessungsansatzes

zum Nachweis des Raumabschlusses und der Tragfähigkeit von Wand- und Deckenelementen erfolge.

Mit Hilfe gesammelter durchgeführter Großbrandversuche wurde der Raumabschluss und der Feuerwiderstand bestimmter Konstruktionsaufbauten für einen Feuerwiderstand von bis zu 90 Minuten unter realitätsnahen Randbedingungen überprüft und mit den Ergebnissen des analytischen Ansatzes abgeglichen. So konnten die erstellten Simulationsmodelle weiter validiert werden. Zusätzlich kann so ein Vergleich zu Konstruktionen mit mineralischen Dämmstoffen gezogen werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens ingenieurtechnische Bemessungsregeln zur Verfügung gestellt werden, deren Aufnahme auch in der Überarbeitung des EN 1995-1-2 erfolgen soll.

## Abstract

Standardised design methods in order to assess the fire resistance of timber wall and floor elements with bio-based insulation materials currently don't exist. Established design methods, like in EN 1995-1-2 or DIN 4102-4 only allow the consideration of void cavities or cavities filled with mineral wool. In addition, product and manufacturer specific technical approvals exist to proof the fire resistance.

This research project aims to allow the standardised use of bio based insulation materials in timber constructions with the fire safety requirements for separation and load bearing function of wall and floor elements. For this purpose, the research project developed design methods, based on an easy to use calculation approach to verify fire resistance requirements of building law.

The first part of the project comprised the experimental determination of currently missing material properties required for numerical simulations. These temperature dependent material properties of density, conductivity and specific heat capacity were used to determine the heat transfer and temperature profile in timber frame elements under standard fire exposure, based on numerical simulations. Within this project, cellulose fibre and wood fibre insulation were under investigation, due to the high practical relevance of these materials.

Furthermore, typical setups for wall and floor elements with bio-based insulation relevant in practice and representing the state of the art were compiled in order to summarise factors influencing the heat transfer and charring in such elements. In addition, experimental tests to determine the heat transfer and also fire resistance tests, based on standard fire exposure, to assess the contribution of individual layers, the thickness of layers and the interaction of layers to the fire resistance of the entire element were conducted. Furthermore, fire tests in order to determine the remaining cross section of studs and beams as load bearing structure in timber frame elements and the influence of the protection capacity of bio based insulation material for the load bearing timber elements were conducted. This knowledge was used within further numerical sensitivity analyses in order to derive the coefficients for the analytical approach assessing the separation and load-bearing function of timber frame elements with bio-based insulation materials. In order to ensure the safe use of the analytical approach in practice, the approach was compared and validated to several full scale test results, summarised in a database at TUM, up to 90 minutes fire resistance. Furthermore, a comparison with timber frame elements, filled with mineral wool became possible.

Based on the experimental and numerical work conducted in this research project a new engineering based design approach for timber frame assemblies with bio based insulation materials to assess the fire resistance was developed. This approach will also be made available to the standardisation committee in the revision process of EN 1995-1-2.



## Vorwort

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung der Forschungsinitiative Zukunft Bau durchgeführt. Finanziell sowie durch Materiallieferungen unterstützt wurde das Vorhaben außerdem durch die folgenden Industriepartner:

- Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V.
- ISOCELL GmbH, Neumarkt am Wallersee

Insbesondere bedanken wir uns herzlich bei allen Unternehmen, die uns Prüfberichte zur Erstellung der den Ergebnissen zu Grunde liegenden Datenbank zur Verfügung gestellt haben:

- STEICO SE, Feldkirchen
- ISOCELL GmbH, Neumarkt am Wallersee
- INTHERMO GmbH, Ober-Ramstadt
- isofloc Wärmedämmtechnik GmbH, Lohfelden
- GUTEX Holzfaserplattenwerk, H. Henselmann GmbH & Co.KG, Waldshut-Tiengen
- best wood Schneider GmbH, Eberhardzell
- Holzbau-Deutschland – Institut e.V.
- Pavatex, SOPREMA GmbH, Mannheim

Besonderer Dank gilt außerdem:

- den Mitarbeitern der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH für die Unterstützung bei der Durchführung der Brandversuche
- den Mitarbeitern der Laboreinrichtungen und Werkhallen der MPA BAU an der TU München für ihre Unterstützung bei dem Bau von Versuchskörpern
- den studentischen Hilfskräften des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion an der TU München für die tatkräftige Unterstützung des Forschungsvorhabens



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Kurzbeschreibung .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>Vorwort .....</b>	<b>V</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>11</b>
1.1 Anlass des Forschungsvorhabens .....	11
1.2 Zweck und Zielsetzung des Projektes .....	11
1.3 Abgrenzung des Forschungsvorhabens .....	11
1.4 Aufbau und Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse .....	11
<b>2 Voruntersuchungen, Zusammenstellung der Anforderungen .....</b>	<b>13</b>
2.1 Baurechtliche Anforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise .....	13
2.1.1 Allgemeines .....	13
2.1.2 Gebäudeklassen .....	13
2.1.3 Definition von Baustoffen und Bauteilen .....	14
2.1.4 Auswertung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen .....	19
2.2 Auswahl geeigneter und relevanter Konstruktionen sowie Materialien für das Forschungsprojekt .....	19
2.2.1 Baustoffe .....	19
2.2.1.1 Allgemeines .....	19
2.2.1.2 Zellulose .....	20
2.2.1.3 Holzfaserdämmstoffe .....	20
2.2.2 Konstruktionsvarianten .....	22
2.2.2.1 Allgemeines .....	22
<b>3 Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>23</b>
3.1 Allgemeines .....	23
3.2 Durchwärmungsversuche .....	24
3.2.1 Allgemeines .....	24
3.2.1.1 Hinführung .....	24
3.2.1.2 Verwendete Messeinrichtungen .....	24
3.2.1.3 Festlegung der Temperaturmessstufen .....	25
3.2.2 1. Versuchsreihe: 20 °C – 170 °C .....	25
3.2.2.1 Materialwahl .....	25
3.2.2.2 Ausführung und Erstellung der Prüfkörper .....	26
3.2.2.3 Durchführung und Ablauf der Versuche .....	27
3.2.2.4 Ergebnisse .....	27
3.2.3 2. Versuchsreihe: 20 °C, 100 °C, 250 °C .....	30
3.2.3.1 Begründung .....	30
3.2.3.2 Materialwahl .....	31
3.2.3.3 Ausführung und Erstellung der Prüfkörper .....	31
3.2.3.4 Durchführung und Ablauf der Versuche .....	31
3.2.3.5 Ergebnisse .....	32
3.2.4 Zusammenfassung der Durchwärmungsversuche .....	33

3.3	Erste Versuchsreihe kleiner Wand- und Deckenofen .....	34
3.3.1	Einleitung .....	34
3.3.1.1	Allgemeines .....	34
3.3.1.2	Aufbau des Prüfofens .....	34
3.3.1.3	Temperaturbeanspruchung .....	35
3.3.2	Kleinversuche für die Beurteilung des Raumabschlusses .....	36
3.3.2.1	Begründung .....	36
3.3.2.2	Instrumentierung .....	36
3.3.2.3	Versuchsdurchführung .....	36
3.3.2.4	Ergebnisse .....	36
3.3.3	Kleinversuche für die Beurteilung der Restquerschnitte .....	37
3.3.3.1	Begründung .....	37
3.3.3.2	Instrumentierung .....	37
3.3.3.3	Versuchsdurchführung .....	37
3.3.3.4	Ergebnisse .....	38
3.4	Zweite Versuchsreihe kleiner Wand- und Deckenofen .....	40
3.4.1	Begründung .....	40
3.4.2	Aufbau der Prüfkörper .....	40
3.4.3	Instrumentalisierung .....	42
3.4.4	Versuchsdurchführung .....	42
3.4.5	Ergebnisse .....	42
3.5	Versuche im Kleinprüfstand nach DIN 4102 Teil 8 .....	44
3.5.1	Begründung .....	44
3.5.2	Aufbau der Prüfkörper .....	44
3.5.3	Instrumentalisierung .....	46
3.5.4	Durchführung der Versuche .....	46
<b>4</b>	<b>Bestimmung thermischer Materialkennwerte .....</b>	<b>47</b>
4.1	Allgemeines .....	47
4.2	Thermogravimetrische Analyse .....	47
4.2.1	Grundlagen .....	47
4.2.2	Messprogramm .....	49
4.2.3	Ergebnisse .....	51
4.2.3.1	Holzfasern .....	51
4.2.3.2	Zellulose .....	52
4.3	Hot-Disk-Verfahren .....	53
4.3.1	Grundlagen .....	53
4.3.2	Messprogramm .....	54
4.3.3	Ergebnisse .....	55
4.3.3.1	Holzfasern .....	55
4.3.3.2	Zellulose .....	57
4.4	Guarded-Hot-Plate-Verfahren .....	58
4.4.1	Grundlagen .....	58
4.4.2	Messprogramm .....	61
4.4.3	Ergebnisse .....	61
<b>5</b>	<b>Sammlung und Auswertung von Großbrandversuchen .....</b>	<b>62</b>
5.1	Allgemeines .....	62
5.2	Auswertung der vorhandenen Daten .....	63

<b>6</b>	<b>Numerische Bauteiluntersuchungen .....</b>	<b>66</b>
6.1	Wärmetransportvorgänge .....	66
6.2	Eingangsdaten für die numerische Simulation .....	67
6.2.1	Verwendetes Simulationsmodell .....	67
6.2.2	Effektive Materialkennwerte .....	68
6.2.2.1	Bestimmung effektiver Materialkennwerte .....	68
6.2.2.2	Flexible Holzfaserdämmung .....	71
6.2.2.3	Druckfeste Holzfaserdämmung (Trockenverfahren) .....	74
6.2.2.4	Druckfeste Holzfaserdämmung (Nassverfahren) .....	75
6.2.2.5	Zellulose .....	76
6.3	Vorgehensweise zur Ermittlung der Grundzeiten und Positionsbeiwerte .....	79
6.3.1	Bestimmung der Grundzeiten $t_{ins,0,i}$ und $t_{prot,0,i}$ .....	79
6.3.2	Bestimmung des Positionsbeiwertes $k_{pos, exp}$ .....	79
6.3.3	Bestimmung des Positionsbeiwertes $k_{pos, unexp}$ .....	81
6.3.4	Bestimmung der Zeitdifferenz $\Delta t_i$ bei Verwendung von Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht .....	82
6.4	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	84
<b>7</b>	<b>Rechenverfahren für den Raumabschluss .....</b>	<b>87</b>
7.1	Allgemeines .....	87
7.2	Berechnungsmodell für den Raumabschluss .....	87
7.2.1	Allgemeines .....	87
7.2.2	Grundlagen zum Berechnungsmodell nach Schleifer .....	88
7.2.3	Ermittlung der Schutzzeiten .....	90
7.2.4	Ermittlung der Isolationszeit .....	91
7.2.5	Ermittlung der Grundzeiten und Positionsbeiwerte .....	92
7.3	Umsetzung .....	93
7.4	Entwickelte Gleichungen .....	94
7.4.1	Allgemeines .....	94
7.4.2	Flexible Holzfaserdämmung .....	94
7.4.3	Druckfeste Holzfaserdämmung .....	95
7.4.4	Zellulose .....	100
7.5	Validierung .....	102
7.5.1	Flexible Holzfaserdämmung .....	102
7.5.2	Druckfeste Holzfaserdämmplatten .....	106
7.5.3	Zellulosedämmung .....	109
<b>8</b>	<b>Rechenverfahren für die Tragfähigkeit .....</b>	<b>113</b>
8.1	Einführung .....	113
8.2	Normative Grundlagen nach DIN EN 1995-1-2 .....	113
8.2.1	Bemessungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2 .....	113
8.2.2	Grundlagen und Hintergrund zu dem Bemessungsmodell nach DIN EN 1995-1-2 .....	116
8.2.2.1	Einteilung des Brandes in Phasen .....	116
8.2.2.2	Bestimmung des Querschnittsfaktors $k_s$ .....	117
8.2.2.3	Bestimmung des Dämmungsfaktors $k_2$ .....	118
8.2.2.4	Bestimmung des $k_3$ -Faktors des erhöhten Abbrandes .....	119

8.2.2.5	Bestimmung des $k_n$ -Faktors zur Umrechnung in einen ideellen Rechteckquerschnitt .....	119
8.3	Rechenmodell für den Seitenabbrand von Holzrahmen gedämmt mit Glaswolle nach Technical Guidline for Europe – Fire Safety in Timber Buildings .....	121
8.4	Verfahren nach Tiso/Just .....	122
8.4.1	Zu Grunde liegende Versuche .....	122
8.4.2	Einführung von Protection-Leveln .....	123
8.4.3	Beurteilungsverfahren .....	124
8.5	Überprüfung des Verfahrens nach Tiso und Ergänzung mit vorliegenden Ergebnissen	130
8.5.1	Ermittlung der Rückzugsgeschwindigkeit am Holzständer/-balken .....	130
8.5.1.1	Allgemeines .....	130
8.5.1.2	Rückzugsgeschwindigkeit der Holzfaserdämmstoffe.....	131
8.5.1.3	Rückzugsgeschwindigkeit der Zellulosedämmstoffe .....	132
8.5.1.4	Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten von Holzfaser- und Zellulosedämmstoffen .....	134
8.5.2	Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten mit den ermittelten Werten nach Tiso/Just .....	135
8.5.3	Einordnung der Dämmstoffe in die Protection Level.....	139
8.6	Ermittlung des Abbrands von der Brandbeanspruchten Seite .....	141
8.6.1	Bestimmung des Beginns der pyrolytischen Zersetzung/Abbrandes.....	141
8.6.2	Auswertung der Versuche zur Bestimmung des Abbrands von der brandbeanspruchten Seite .....	141
8.6.3	Zusammenstellung der ermittelten Werte .....	147
8.7	Ermittlung des Seitenabbrands .....	149
8.7.1	Ermittlung des Beginns des Seitenabbrands $t_{ch,2}$ nach den Gleichungen nach Tiso.....	149
8.7.2	Bestimmung des $k_{3,2}$ -Faktors .....	150
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>154</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>156</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>160</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>166</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>168</b>

# **1 Einleitung**

## **1.1 Anlass des Forschungsvorhabens**

Allgemeine analytische Bemessungsregeln zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Wand- und Deckenelementen in Holzbauweise mit biogenen Dämmstoffen liegen aktuell nicht vor. Geregelt normative Nachweise zum Feuerwiderstand von Wand- und Deckenelementen im Holzbau beschränken sich auf ungedämmte oder mit Mineralwolle gedämmte Holzrahmenelemente. Darüber hinaus liegen herstellerbezogene Verwendbarkeitsnachweise vor, welche nicht die gesamte Bandbreite an möglichen Konstruktionsaufbauten abdecken. Ziel des Vorhabens ist es daher, allgemeine Bemessungsregeln zur zukünftigen normativen Anwendung zu entwickeln.

## **1.2 Zweck und Zielsetzung des Projektes**

Primäres Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeit zu schaffen, Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen und Bekleidungswerkstoffen für Gebäude mit Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer brandschutztechnisch geregelt über normative Nachweisverfahren bemessen zu können, um so eine Vielzahl an brandschutztechnisch sicheren Konstruktionsvarianten zu ermöglichen.

Auf dieser Grundlage sollen Unsicherheiten bei Planern, Behörden und Verarbeitern hinsichtlich Konstruktionsvarianten mit biogenen Dämmstoffen und Beplankungswerkstoffen beseitigt werden und kostenintensive Verwendbarkeitsnachweise sowie Einzelprüfungen vermieden werden. Dadurch können wirtschaftliche Bauweisen mit biogenen Baustoffen vom Ein- und Mehrfamilienhaus bis hin zu mehrgeschossigen Holzbauten und Sonderbauten zu ermöglicht werden.

## **1.3 Abgrenzung des Forschungsvorhabens**

Das vorliegende Forschungsvorhaben befasst sich mit der Anwendbarkeit biogener Dämmstoffe in Holzrahmenkonstruktion im Hinblick auf deren brandschutztechnische Leistungsfähigkeit. Aufgrund der vorliegenden Nachfrage am Markt wurden für das Projekt Holzfasersowie Zelluloseprodukte gewählt.

## **1.4 Aufbau und Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse**

Die vorliegenden Forschungsergebnisse resultieren grundsätzlich aus Versuchsergebnissen, welche innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführt wurden. Durch eine Validierung der ermittelten Rechenverfahren mit Hilfe vorliegender Versuchsberichte aus großmaßstäblichen

Brandprüfungen von Seiten der Industrie konnten diese Ergebnisse verifiziert und verfeinert werden.

Das Verfahren zum Raumabschluss basiert auf dem bestehenden Verfahren nach Schleifer [1]. Dieses wurde mit den innerhalb des Forschungsprojektes ermittelten Ergebnisse zu biogenen Dämmstoffen erweitert.

Das Verfahren zur Tragfähigkeit beruht auf einem Forschungsansatz nach Tiso/Just [2]. Auch dieser Ansatz wurde mit vorliegenden Versuchsergebnissen zu biogenen Dämmstoffen erweitert.

## 2 Voruntersuchungen, Zusammenstellung der Anforderungen

### 2.1 Baurechtliche Anforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise

#### 2.1.1 Allgemeines

Die Regelung des Baurechts und damit der brandschutztechnischen Anforderungen an Gebäude obliegt in Deutschland den Bundesländern.

Von der Bauministerkonferenz werden Musterordnungen/-verordnungen/-richtlinien für Standard- sowie geregelte Sonderbauten zur Orientierung herausgegeben. Eine Verpflichtung zur Umsetzung auf Länderebene gibt es nicht.

Die aktuelle Musterbauordnung (MBO, Fassung November 2002) [3] wurde in allen Bundesländern, mit Ausnahme von Nordrhein-Westfalen mit wenigen Änderungen in die Landesbauordnungen (LBO) eingearbeitet.

#### 2.1.2 Gebäudeklassen

Die Klassifizierung von Gebäuden erfolgt innerhalb der MBO sowie der LBO's auf Basis der Gebäudeklassen (GKL). Ausschlaggebend für die Einordnung nach MBO § 2 (3)<sup>1</sup> sind die Höhe<sup>2</sup> des Gebäudes sowie die Anzahl und Größe der einzelnen Nutzungseinheiten<sup>3</sup>.

Nachstehende Tabellen zeigen die Gebäudeklassen (GK) entsprechend MBO.

Tabelle 2-1: Darstellung der Gebäudeklassen nach MBO

Gebäudeklassen nach MBO [3]		
<b>GK 1</b>	freistehende Gebäude <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>h \leq 7,00</math> m</li> <li>- <math>\leq 2</math> NE</li> <li>- insg. <math>\leq 400</math> m<sup>2</sup></li> </ul>	
	frei stehende, land-/ forstwirtschaftlich genutzte Gebäude	

<sup>1</sup> In den Landesbauordnungen immer unter § 2 „Begriffe“ bzw. Art. 2 „Begriffe“ in Bayern) geregelt

<sup>2</sup> Als Höhe eines Gebäudes gilt das Maß der fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel

<sup>3</sup> Die Grundflächen der Nutzungseinheiten müssen als Brutto-Grundflächen ermittelt werden. Flächen in Kellergeschossen bleiben bei der Ermittlung außer Betracht.

Fortsetzung Tabelle 2-1: Darstellung der Gebäudeklassen nach MBO

<b>GK 2</b>	Gebäude <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>h \leq 7,00</math> m</li> <li>- <math>\leq 2</math> NE</li> <li>- insg. <math>\leq 400</math> m<sup>2</sup></li> </ul>	
<b>GK 3</b>	sonstige Gebäude <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>h \leq 7,00</math> m</li> </ul>	
<b>GK 4</b>	Gebäude <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>7,00</math> m <math>&lt; h \leq 13,00</math> m</li> <li>- NE <math>\leq 400</math> m<sup>2</sup></li> </ul>	
<b>GK 5</b>	sonstige Gebäude, einschl. unterirdischer Gebäude <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>h &gt; 13</math> m</li> </ul>	

### 2.1.3 Definition von Baustoffen und Bauteilen

Die MBO sowie alle LBO's unterscheiden Baustoffe anhand der Anforderungen an ihr Brandverhalten in:

- nicht brennbar
- schwer entflammbar
- normal entflammbar
- leicht entflammbar

Die Überführung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen in Baustoffklassen nach DIN 4102 [4] und DIN EN 13501 [5] sind in Anhang A und Anhang B zu finden.

Des Weiteren werden Bauteile sowohl in der Muster- als auch in den Landesbauordnungen nach ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit unterschieden in:

- feuerbeständig
- hochfeuerhemmend
- feuerhemmend

Zusätzlich werden bauordnungsrechtlich weitergehende Anforderungen an Bauteile mit entsprechender Feuerwiderstandsfähigkeit gestellt:

Bauteile, welche hochfeuerhemmend sein müssen, müssen mindestens Bauteilen entsprechen,

*„deren tragenden und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und die allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben.“ [3]*

Die Art der ebengenannten Brandschutzbekleidung wird in der Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (MHFHolzR) wie folgt definiert:

*„Die Brandschutzbekleidung muss eine Entzündung der tragenden einschließlich der aussteifenden Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen während eines Zeitraumes von mindestens 60 Minuten verhindern und als K<sub>2</sub>60 nach DIN EN 13501-2 klassifiziert sein [...]“ [6]*

Des Weiteren müssen Bauteile, welche feuerbeständig sein müssen, mindestens Bauteilen entsprechen,

*„deren tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und die bei raumabschließenden Bauteilen zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben“.* [3]

Die LBO Baden-Württemberg definiert in LBO § 26 (3) eine Regelung, welche eine Ausführung der tragenden und raumabschließenden Bauteile mit wenigen Ausnahmen aus brennbaren Baustoffen in allen Gebäudeklassen ermöglicht:

*„Abweichend [...] sind tragende und aussteifende sowie Raumabschließende Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn die geforderte Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen wird und die Bauteile so hergestellt und eingebaut werden, dass Feuer und Rauch nicht über die Grenzen von Brand- oder Rauchschutzbereichen, insbesondere Geschosstrennungen, hinweg übertragen werden können.“ [7]*

Tabelle 2-2: Baurechtliche Anforderungen nach Musterbauordnung (MBO) und Sonderbauverordnungen an Baustoffe und Bauteile

	MBO i.V.m. MHFHolzR		MBeVO	MGarVO	MHH	MVKVO	MVStättVO	MSchulbauR	MWR	MIndBauRL	
	GKL 4	GKL 5									i.V.m. MBO
Quelle	[3, 8]		[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	
Tragende Bauteile	R 60 + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	R 90 [wnb]	R 90 [wnb]	R 90 [wnb]	R 120 [nb]	R 90 [wnb]	R 90 [wnb]	R 90 [wnb]	—	vgl. Tabelle 2-3	
			R 30 <sup>2)</sup>	R 30 [nb] <sup>3)</sup>		R 90 [nb] <sup>8)</sup>					R 30 <sup>11),12)</sup>
				[nb] <sup>4), 5), 6)</sup>	o.A. <sup>14)</sup>		R 30 <sup>16)</sup>	R 60 + K <sub>2</sub> 60 <sup>19)</sup>			
Trennwände	EI 60 + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	EI 90 [wnb]	EI 90 [wnb]	EI 90 [wnb]	EI 90 [wnb] <sup>9)</sup>	EI 90 [wnb]	EI 90 [wnb]	—	Anf. d. trag. und aussteif. Bauteile <sup>22)</sup>	—	
				EI 30 [nb] <sup>2)</sup>							EI 90 [wnb] <sup>10)</sup>
			EI 30 <sup>2)</sup>	EI 30 <sup>5)</sup>	—	—					
Nichttrag. Außenwände	E 30 (i→o) EI 30-ef (i←o)		—	[nb]	[nb]	EI 90 [wnb]	[nb]	—	—	EI 30	
	—	—	—	o.A. <sup>7)</sup>		[se] <sup>11), 13)</sup>	o.A. <sup>17)</sup>				
Brandwände	REI 60-M + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	REI 90-M [nb]	—	—	REI 90 [wnb]	—	—	REI 90-M [nb]	—	REI 90 [wnb]	
Rauchabschnittswände	—	—	—	EI 30 [nb]	—	—	—	—	—	—	
Decken	REI 60 + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	REI 90 [wnb]	—	REI 90 [wnb]	REI 120 [nb]	REI 90 [nb]	REI 90 [wnb]	—	Anf. d. trag. und ausst. Bauteile <sup>22)</sup>	vgl. Tabelle 2-3	
				REI 30 [nb] <sup>3)</sup>		REI 90 [nb] <sup>8)</sup>	REI 30 [nb] <sup>11)</sup> und 15)				REI 30 <sup>16)</sup>
				REI 30 <sup>5)</sup>	[nb] <sup>14)</sup> und 15)		o.A. <sup>16)</sup> und 17)				REI 30 <sup>23)</sup>
				[nb] <sup>4), 5), 6)</sup>	—	—	—				
Dachtragwerk	—	—	—	—	—	R 90 [wnb]	R 30	—	—	vgl. Tabelle 2-3	
						R 30 <sup>11)</sup>					
						[nb] <sup>13)</sup>	o.A. <sup>17)</sup>				
						o.A. <sup>14)</sup>					
Tragende Teile notw. Treppen	[nb]	R 30 [nb]	—	—	—	R 90 [nb]	R 90 [wnb] [nb] <sup>18)</sup>	—	—	—	

<b>Wände notw. Treppenräume</b>	EI 60-M + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	EI 90-M [nb]	—	—	EI 120 [nb]	Bauart von BW nach MBO	—	EI 30 <sup>21)</sup>	—	—
					EI 90 [nb] <sup>8)</sup>					
<b>Wände notwendiger Flure</b>	EI 30		—	—	—	—	—	—	—	—
<b>Wände von Sicherheits-schleusen</b>	—	—	—	EI 90 [wnb]	EI 120 [nb]	—	—	—	—	—
					EI 90 [nb] <sup>8)</sup>					
<b>Aufzugschachtwände</b>	EI 60 + K <sub>2</sub> 60 <sup>1)</sup>	EI 90 [nb]	—	—	—	—	—	—	—	—

1) Brandschutztechnisch wirksame Bekleidung nach MHFHolzR: Die Brandschutzbekleidung muss eine Entzündung der tragenden einschließlich der aussteifenden Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen während eines Zeitraumes von mind. 60 min verhindern und als K<sub>2</sub>60 nach DIN EN 13501-2 klassifiziert sein

2) In Gebäuden mit nicht mehr als zwei oberirdischen Geschossen und in obersten Geschossen von Dachräumen mit Beherbergungsräumen

3) Bei oberirdischen Mittel- und Großgaragen, deren Einstellplätze nicht mehr als 22 m oberhalb der GOK liegen

4) Bei offenen Mittel- und Großgaragen, die allein der Garagennutzung dienen und deren Einstellplätze nicht mehr als 22 m oberhalb der GOK liegen

5) Bei eingeschossigen, oberirdischen Garagen, wenn das Gebäude allein der Garagennutzung dient

6) Bei automatischen Garagen, wenn das Gebäude allein der Garagennutzung dient

7) Eingeschossige, oberirdische Mittel- und Großgaragen, wenn das Gebäude allein der Garagennutzung dient

8) Gebäude bis zu 60 m Höhe

9) Trennwände von Räumen mit erhöhter Brandgefahr und zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Keller

10) Trennwände zwischen Nutzungseinheiten und zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Gebäuden

11) Bei erdgeschossigen Verkaufsstätten

12) Bei Verkaufsstätten ohne Sprinkleranlagen

13) Bei erdgeschossigen Verkaufsstätten mit Sprinkleranlagen

14) Deren Fußboden an keiner Stelle mehr als 1 m unterhalb der GOK liegt

15) Bei erdgeschossigen Versammlungsstätten

16) Mit Feuerlöschanlage

17) In notwendigen Treppenräumen oder als Außentreppe

18) Schulbauten bis zu 13 m Höhe, deren Geschosse eine Fläche von 400 m<sup>2</sup> nicht überschreiten oder durch Trennwände nach MBO § 29 Abs. 3 bis 5 in Abschnitte mit max. 400 m<sup>2</sup> unterteilt sind

19) Schulbauten bis zu 7 m Höhe

20) Gilt für GKL 1 und 2

21) Gilt für die Trennung von Bereichen bei der Bereichslösung, jedoch mindestens EI 30 bzw. R 30

22) Gilt für die Trennung der Schlafräume bei der Zellenlösung

— Nicht in Sonderbauordnung geregelt, es gelten die Anforderungen der Musterbauordnung

nb Aus nichtbrennbaren Baustoffen

wnb Im Wesentlichen aus nichtbrennbaren Baustoffen

Tabelle 2-3: Zulässige Feuerwiderstandsfähigkeiten der tragenden und aussteifenden Bauteile nach IndBauRL [16] nach Verfahren nach Abschnitt 6

Sicherheitskategorie	Anzahl der oberirdischen Geschosse								
	erdgeschossig		2-geschossig			3-geschossig		4-geschossig	5-geschossig
	Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden und aussteifenden Bauteile								
	aus nicht-brennbaren Baustoffen	feuerhemmend	Feuerhemmend	hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen
	[nb]	R 30	R 30	R 60 [nb]	R 90 [nb]	R 60 [nb]	R 90 [nb]	R 90 [nb]	R 90 [nb]
Maximale Brandabschnittsfläche in m <sup>2</sup>									
K 1	1.800 <sup>1)</sup>	3.000	800 <sup>2), 3)</sup>	1.600 <sup>2)</sup>	2.400	1.200 <sup>2), 3)</sup>	1.800	1.500	1.200
K 2	2.700 <sup>1), 4)</sup>	4.500 <sup>4)</sup>	1.200 <sup>2), 3)</sup>	2.400 <sup>2)</sup>	3.600	1.800 <sup>2)</sup>	2.700	2.300	1.800
K 3.1	3.200 <sup>1)</sup>	5.400	1.400 <sup>2), 3)</sup>	2.900 <sup>2)</sup>	4.300	2.100 <sup>2)</sup>	3.200	2.700	2.200
K 3.2	3.600 <sup>1)</sup>	6.000	1.600 <sup>2)</sup>	3.200 <sup>2)</sup>	4.800	2.400 <sup>2)</sup>	3.600	3.000	2.400
K 3.3	4.200 <sup>1)</sup>	7.000	1.800 <sup>2)</sup>	3.600 <sup>2)</sup>	5.500	2.800 <sup>2)</sup>	4.100	3.500	2.800
K 3.4	4.500 <sup>1)</sup>	7.500	2.000 <sup>2)</sup>	4.000 <sup>2)</sup>	6.000	3.000 <sup>2)</sup>	4.500	3.800	3.000
K 4	10.000	10.000	8.500	8.500	8.500	6.500	6.500	5.000	4.000
<sup>1)</sup> Breite des Industriebaus ≤ 40 m und Wärmeabzugsfläche ≥ 5 % (siehe Anhang 2, MIndBauRL) <sup>2)</sup> Wärmeabzugsfläche ≥ 5 % (siehe Anhang 2) <sup>3)</sup> Für Gebäude der Gebäudeklassen 3 und 4 ergibt sich nach § 27 Abs. 1 Satz 2 Nr. 2 und 3 i. V. m. § 30 Abs. 2 Nr. 2 MBO eine zulässige Größe von 1 600 m <sup>2</sup> . <sup>4)</sup> Die zulässige Größe darf um 10 % überschritten werden, wenn in dem Brandabschnitt die Produktions- und Lagerräume Rauch-abzugsanlagen haben, bei denen <ul style="list-style-type: none"> <li>- je höchstens 200 m<sup>2</sup> der Grundfläche ein oder mehrere Rauchabzugsgeräte mit insgesamt mindestens 1,5 m<sup>2</sup> aerodynamisch wirksamer Fläche im Dach angeordnet wird,</li> <li>- je höchstens 1.600 m<sup>2</sup> Grundfläche mindestens eine Auslösegruppe für die Rauchabzugsgeräte gebildet wird,</li> <li>- Zuluftflächen mit einem freien Querschnitt von mindestens 36 m<sup>2</sup> im unteren Raumdrittel vorhanden sind sowie</li> <li>- die Anforderungen der Nrn. 5.7.4.3 und 5.7.4.4 nach MIndBauRL erfüllt sind</li> </ul>									

**Anmerkung:**

Die MIndBauRL unterscheidet zwischen zwei Verfahren zur Ermittlung der Anforderungen an die Baustoffe und Bauteile. In obenstehender Tabelle ist das Verfahren zur Ermittlung der Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sowie an die Größe der Brandabschnitte im Verfahren ohne Brandlastermittlung dargestellt. Auf das Verfahren mit Brandlast Ermittlung nach Rechenverfahren nach DIN 18230-1 wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

### 2.1.4 Auswertung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen

Die zuvor beschriebenen Anforderungen aus der Musterbauordnung sowie den Sonderbauordnungen wurden als Grundlage zur Zusammenstellung von den dem Forschungsprojekt zu Grunde liegenden Bauteilen genutzt. Eine Zusammenstellung kann den nachfolgenden Kapiteln entnommen werden.

## 2.2 Auswahl geeigneter und relevanter Konstruktionen sowie Materialien für das Forschungsprojekt

### 2.2.1 Baustoffe

#### 2.2.1.1 Allgemeines

Grundsätzlich stehen für den Einsatz als Dämmstoff verschiedene biogene Materialien zur Verfügung. Wesentlich sind hier zu nennen:

- Zellulosefasern
- Holzfasern
- Holzspäne
- Flachs
- Hanf
- Schafwolle
- Kork

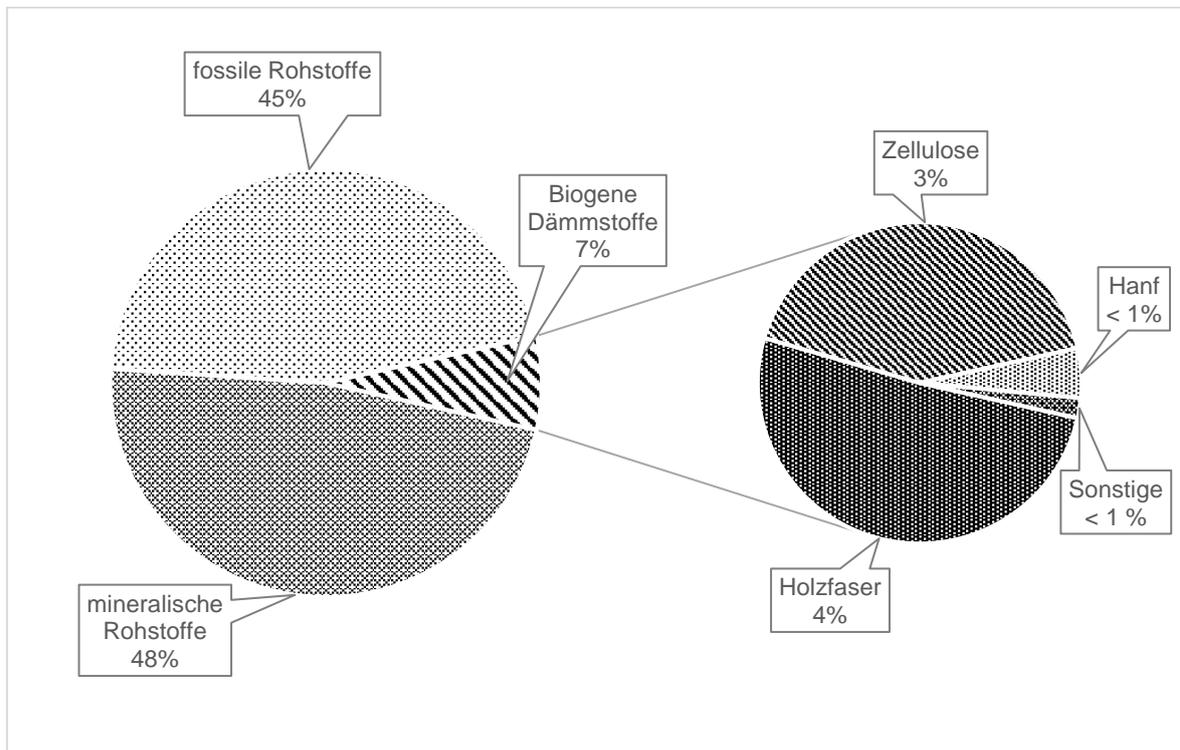


Abbildung 2-1: Gesamtmarkt Dämmstoffe in Deutschland 2011 [17]

Innerhalb des Forschungsprojektes wird sich auf die praxisrelevantesten Dämmmaterialien Holzfasern sowie Zellulose beschränkt, da diese zum Bearbeitungszeitpunkt den größten Marktanteil der biogenen Dämmstoffe ausmachen (Vgl. Abbildung 2-1).

Nachfolgend werden die innerhalb des Projektes betrachteten Dämmstoffe hinsichtlich des Herstellungsprozesses sowie der physikalischen Eigenschaften kurz beschrieben.

### 2.2.1.2 Zellulose

Zellulose wird aus Fasern von Altpapier im Trockenverfahren hergestellt. Nach mechanischem Zerkleinern des Grundstoffes erfolgt eine Zugabe von Zusatzstoffen wie Ammoniumphosphat, Erdalkalisalzen, Borsalzen sowie weiterer Zusatzstoffe, welche ein günstigeres Brandverhalten bewirken sowie einen Schimmel- bzw. Schädlingsbefall vermeiden können. Die genaue Zusammensetzung variiert je nach Hersteller. Nach Abscheiden der Feinanteile wird das Material als lose Schüttung verwendet oder weiter zu Dämmmatten verarbeitet.

Nachfolgende Tabellen listen die relevanten Kenngrößen von Zellulose als Mattenwerkstoff oder als lose Schüttung (Einblasdämmung) auf.

Tabelle 2-4: Bauphysikalische Kenngrößen von Zellulose als Einblasdämmstoff [17–20]

Kenngröße	Einheit	Wert
<b>Rohdichte</b>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	20 - 65
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,038 – 0,040
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c$ [J/(kg·K)]	2.100 – 2.544
<b>Brandverhalten</b>	DIN 4102-4	B2
	EN 13501	E

Tabelle 2-5: Bauphysikalische Kenngrößen von Zellulose als Matte [17–20]

Kenngröße	Einheit	Wert
<b>Rohdichte</b>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	60 - 145
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,042
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c$ [J/(kg·K)]	2.000
<b>Brandverhalten</b>	DIN 4102-4	B2
	EN 13501	E

### 2.2.1.3 Holzfaserdämmstoffe

Bei Holzfaserdämmstoffen muss hinsichtlich der Art der Herstellung sowie der Art des Produktes unterschieden werden.

Holzfaserplatten, welche innerhalb von Wärmedämmverbundsystemen genutzt werden, werden entweder im Nass- oder Trockenverfahren hergestellt. Sie unterscheiden sich von Holzfaserdämmmatten, welche als Gefachdämmstoff verwendet werden, vor allem in ihrer Rohdichte. Zusätzlich findet sich am Markt auch loser Einblasdämmstoff aus Holzfasern.

Nachfolgende Tabelle stellt die bauphysikalischen Eigenschaften von Holzfaserplatten als WDV-System zusammen.

Tabelle 2-6: Bauphysikalische Kenngrößen von Holzfaserplatten [17, 18, 21, 22]

<b>Kenngröße</b>	<b>Einheit</b>	<b>Herstellungsverfahren</b>	<b>Wert</b>
<b>Rohdichte</b>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Nassverfahren	180 - 270
		Trockenverfahren	110 - 190
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	$\lambda$ [W/(m·K)]	Nassverfahren	0,038 – 0,048
		Trockenverfahren	0,037 – 0,043
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c_p$ [J/(kg·K)]	Nassverfahren	2.100
		Trockenverfahren	2.100
<b>Brandverhalten</b>	DIN 4102-4	Nassverfahren	B2
		Trockenverfahren	
	EN 13501	Nassverfahren	E
		Trockenverfahren	

Die unterschiedlichen Eigenschaften der formstabilen Dämmplatten resultieren vor allem aus den verschiedenen Herstellungsverfahren.

Im Nassverfahren werden die Fasern in Wasser aufgeschäumt und anschließend in Form gebracht. Das Wasser wird größtenteils ausgepresst, in einem Trockenkanal werden bei Temperaturen zwischen 160 °C bis 220 °C die Fasern durch das holzeigene Lignin zum Abbinden gebracht. Eine zusätzliche Zugabe von Klebemitteln ist nicht notwendig. Ein Zumischen von harz-/bitumenhaltigen Zusatzstoffen erzielt eine Verbesserung der Festigkeit bzw. der wasserabweisenden Eigenschaften des Dämmstoffes.

Bei der Herstellung der Platten im Trockenverfahren werden die Fasern auf die notwendige Feuchtigkeit getrocknet. Anschließend werden sie unter Beigabe von Klebstoffen auf die gewünschte Dicke gepresst und unter Dampf in Verbindung mit Druck getrocknet. Abschließend werden die Platten mit Harz behandelt, um eine hydrophobes Verhalten der Oberfläche zu erreichen.

Flexible Holzfasermatten werden als Gefachdämmstoff verwendet. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Rohdichte zu den harten Platten. Sie werden vergleichbar zu den Holzfaserplatten im Trockenverfahren hergestellt. Die Holzfasern werden mit Bindefasern gemischt und in einem Durchströmungstrockner erwärmt, wodurch ein Aufschmelzen der Bindefasern erreicht wird. Durch anschließendes auskühlen und Abtrocknen wird eine Vernetzung der Fasern erreicht. Als Flammschutzmittel werden teilweise Ammoniumsulfate zugegeben. Nachfolgend werden die bauphysikalischen Kenngrößen dargestellt.

Tabelle 2-7: Bauphysikalische Kenngrößen von Holzfaserplatten [17, 18, 21, 22]

Kenngröße	Einheit	Wert
Rohdichte	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	40 – 55
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,038 – 0,040
Spezifische Wärmekapazität	$c$ [J/(kg·K)]	2.100
Brandverhalten	DIN 4102-4	B2
	EN 13501	E

## 2.2.2 Konstruktionsvarianten

### 2.2.2.1 Allgemeines

Für die innerhalb des Forschungsprojektes nachfolgenden Versuche sowie die Ausrichtung des Rechenverfahrens wurden baupraktisch relevante Konstruktionen zusammengefasst. Diese wurden mittels Konstruktionskatalogen von Herstellern ausgewertet. Des Weiteren wurden die im Abschnitt 2.1 zusammengestellten baurechtlichen Anforderungen innerhalb Deutschlands zusätzlich betrachtet um eine Praxistauglichkeit der Auswahl sicherzustellen. Im Anhang D werden die Konstruktionsvarianten mit Bandbreiten der Schichtdicken dargestellt. Betrachtet wurden ausschließlich Konstruktionsvarianten mit biogenen Dämmstoffen in Verbindung mit Holztafelkonstruktionen.

Grundsätzlich gibt es drei Varianten, biogene Dämmstoffe in Holztafelkonstruktionen anzuordnen:

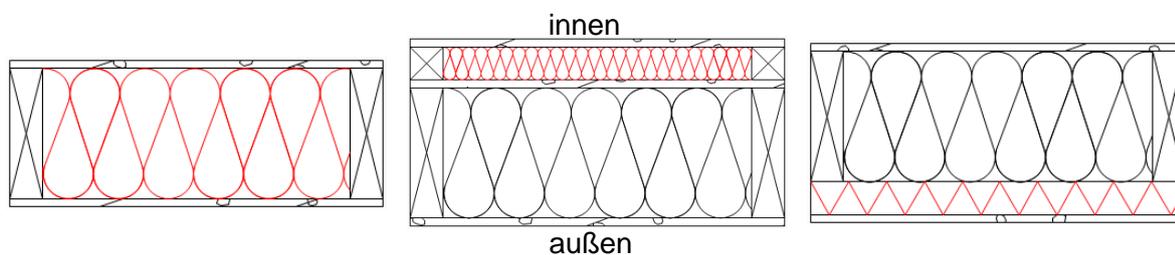


Abbildung 2-2: Biogene Dämmstoffe als Gefachdämmung

Abbildung 2-3: Biogene Dämmstoffe als Installationsebene

Abbildung 2-4: Biogene Dämmstoffe als WDV-System

Im Anhang D werden die zu Grunde liegenden Konstruktionen mit den zugehörigen Bandbreiten sowie brandschutztechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften aufgeführt.

## **3 Experimentelle Untersuchungen**

### **3.1 Allgemeines**

Für die Versuchsaufbauten wurden handelsübliche Materialien verwendet. Um eine Bandbreite bzw. Gleichwertigkeit der Ergebnisse zu erwirken wurde bei den einzelnen Versuchsreihen grundsätzlich auf verschiedene Hersteller zurückgegriffen.

#### **Brandschutzbekleidungen**

Brandschutzbekleidungen wurden handelsüblich beschafft. Es wurden verschiedene Hersteller gewählt. Grundsätzlich wurden Brandschutzbekleidungen nach DIN EN 520 beziehungsweise DIN EN 15283 gewählt.

#### **Holz und Holzwerkstoffe**

Für alle Rahmenhölzer wurde KVH der Qualität C24 verwendet. Lattungen wurden aus üblichem Fichtenvollholz hergestellt. Die Rahmenkonstruktionen wurden seitens eines Zimmereunternehmens vorgefertigt geliefert.

Als Holzwerkstoffplatten kamen in einigen Versuchen OSB/3-Platten zum Einsatz.

Als Abschluss der Konstruktion auf der brandabgewandten Seite wurden bei allen Probekörpern übliche Spanplatten nach DIN EN 319 angebracht.

#### **Verbindungsmitel**

Als Verbindungsmittel zur Befestigung der Brandschutzbekleidung wurden Schrauben gewählt, da sich diese leicht und ohne Zerstörung der Bauteile nach den Versuchen entfernen lassen. Auf diese Weise können die Versuchskörper besser zerlegt und untersucht werden. Die Verschraubungen wurden jeweils entsprechend den Angaben in den zugehörigen Prüfzeugnissen und Herstellerdatenblättern ausgewählt und dimensioniert.

Sonstige Verbindungsmittel für die Holzbauteile wurden konstruktiv oder wie baupraktisch üblich angeordnet.

#### **Dämmstoffe**

Die biogenen Dämmstoffe für die Versuche wurden von den unterstützenden Unternehmen zur Verfügung gestellt. Um eine Vergleichbarkeit zu anderen auf dem Markt erhältlichen Dämmstoffen zu schaffen wurden zusätzlich Produkte anderer Firmen mit in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Als Dämmstoff zum Vergleich und Bezug auf das Rechenverfahren nach DIN EN 1995-1-2 wurde zusätzlich nichtbrennbare Mineralwolle mit Schmelzpunkt  $\geq 1000$  °C und einer Rohdichte von mindestens  $35 \text{ kg/m}^3$  verwendet.

### **Sonstige, Brandschutzmassen, Installationsmaterial**

Materialien für Installationseinbauten wurden wie handelsüblich beschafft.

## **3.2 Durchwärmungsversuche**

### **3.2.1 Allgemeines**

#### **3.2.1.1 Hinführung**

Innerhalb der Versuchsreihe der Durchwärmungsversuche wurde die Geometrieänderung der biogenen Dämmmaterialien bei ansteigender Temperatur untersucht. Dabei sollte speziell das Schrumpfen bei unterschiedlichen Temperaturstufen untersucht werden. Analog zu den Temperaturstufen wurde der Masseverlust der Dämmstoffe ermittelt.

Eine hohe Wärmeleitfähigkeit der Schichten von Holztafelkonstruktionen wirkt sich negativ auf das Feuerwiderstandsverhalten des Bauteils aus, da Temperaturen schneller in das Bauteil geleitet werden. Eine schnellere Erwärmung und damit ein früheres Einsetzen der Verkohlung sind die Folge. Ein schnelles Schwinden bei Wärmebeaufschlagung bedingt zudem ein Öffnen von Fugen und somit den Verlust der Schutzwirkung der Schicht.

Um ausschließlich das Materialverhalten der Dämmstoffe beurteilen zu können, wurden die Materialien ohne zusätzliche Aufbauten geprüft. Eine Beeinflussung durch eine Holzrahmenkonstruktion oder eine Bekleidung wurde so ausgeschlossen.

In den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurden nur Holzfaserdämmstoffe geprüft. Die im Forschungsprojekt verwendeten Zellulosedämmstoffe werden nur als lose Schüttung betrachtet. Lose Schüttung eignet sich aufgrund der nicht vorhandenen Formstabilität nicht für diese Art Versuche.

#### **3.2.1.2 Verwendete Messeinrichtungen**

Die Versuchskörper wurden in einem Wärmeschrank<sup>4</sup> erwärmt. Die Temperaturen im Wärmeschrank sowie auf der Oberfläche und in den Probekörpern wurden mit Thermoelementen Typ K gemessen. Die Ausgabe der Temperaturen erfolgte mittels eines 4-Kanal-Messgeräts<sup>5</sup> sowie eines Universalmessverstärkers<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> Fa. Memmert,  $T_{\text{max}} = 250$  °C

<sup>5</sup> TC309

<sup>6</sup> Quantum X Typ MX840 A in Verbindung mit Software CATMAN

### 3.2.1.3 Festlegung der Temperaturmessstufen

Die Eigenschaften biogener Dämmstoffe bei Erwärmung werden durch die Eigenschaften der Rohstoffe beziehungsweise Zusatzstoffe bestimmt. Dementsprechend wurden für die nachfolgend beschriebenen Durchwärmungsversuche Temperaturstufen festgelegt, bei welchen eine chemische oder physikalische Veränderung des Materials zu erwarten ist.

Tabelle 3-1: Prozesse bei Erwärmung von Holz sowie Zusatzstoffen von biogenen Dämmstoffen

Temperatur [°C]	Betroffener Stoff	Prozess	Dämmstoff
50 - 70	Hydrophobierungsmittel Paraffin	Schmelzpunkt	druckfeste Platten im Trockenverfahren
90 - 110	Wasser	Verdampfen <sup>7</sup>	alle Arten Dämmstoffe
105 - 138	Bindemittel Polyethylen	Schmelzpunkt	druckfeste Platten im Trockenverfahren
155 - 170	Bindemittel Polypropylen	Schmelzpunkt	druckfeste Platten im Trockenverfahren
175 – 295	Bindemittel Polyamide	Schmelzpunkt	Holzfaserplatten Fa. Schneider
180	Holzbestandteil Lignin	Zersetzung	alle Dämmstoffe
200 – 220	Polyurethane (PUR-Harz)	Zersetzung	druckfeste Platten
230 - 240	Brandschutzmittel Ammoniumhydrogensulfat	Abspaltung von Ammoniak, Zwischenprodukt Ammoniumsulfat	alle Dämmstoffe
270 – 280	Zwischenprodukt des Brandschutzmittels Ammoniumhydrogensulfat	Zersetzung des Ammoniumsulfates	alle Dämmstoffe
270	Zellulose	Zersetzung	alle Dämmstoffe
275 – 300	Holz	Verkohlung	alle Dämmstoffe

## 3.2.2 1. Versuchsreihe: 20 °C – 170 °C

### 3.2.2.1 Materialwahl

Die Versuchskörper wurden innerhalb der ersten Versuchsreihe stufenweise mit ansteigenden Temperaturen beaufschlagt. Als Parameter wurden der Masseverlust, die Erwärmung und die Geometrieänderung ausgewertet. Optische Veränderungen wurden außerdem erfasst.

Die nachfolgende Tabelle 3-2 stellt die Prüfkörper der ersten Versuchsreihe zusammen:

<sup>7</sup> Verdampfen des absorptiv gebundenen Wassers; keine Erhöhung der Temperatur von 102 °C ± 2 °C, solange dieser Vorgang nicht vollständig abgeschlossen ist.

Tabelle 3-2: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe Durchwärmungsversuche

Bez.	Dämmstoff	Dicke [mm]	Nennrohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/m <sup>2</sup> k]	Anmerkung
PK1	Flexible Holzfasermatten <sup>1)</sup>	120	50	0,038	ohne Fuge
PK2		120	50	0,039	ohne Fuge
PK4		60	50	0,039	ohne Fuge
PK5		240	50	0,039	ohne Fuge
PK3	Steinwolle <sup>2)</sup>	120	70	0,035	ohne Fuge
PK6	Druckfeste Holzfasertplatten – Nassverfahren <sup>3)</sup>	60	230	0,048	ohne Fuge
PK7		80	230	0,048	ohne Fuge
PK8		60	230	0,048	mit Fuge <sup>4)</sup>
PK9		80	230	0,048	mit Fuge <sup>4)</sup>
PK10	Druckfeste Holzfasertplatten – Trockenverfahren <sup>3)</sup>	60	140	0,042	ohne Fuge
PK11		100	140	0,042	ohne Fuge
PK12		60	140	0,042	mit Fuge <sup>4)</sup>
PK13		100	140	0,042	mit Fuge <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Damit der Einfluss der Materialdicke ermittelt werden kann, werden unterschiedliche Materialstärken geprüft. Um eine Praxisrelevanz laut Planungshandbüchern der Hersteller zu erreichen wurde eine Ausgangsdicke von 120 mm gewählt. Als dünnste Variante wurden 60 mm gewählt, da dies eine gängige Dicke für Installationsebenen ist. Als dickste Variante wurden 240 mm geprüft, um eine Tendenz des Verhaltens des Dämmstoffes bzgl. der Dicke erkennen zu können. Damit ein direkter Vergleich unter den Dicken der Dämmstoffe gezogen werden kann wurden die verschiedenen Dicken jeweils vom gleichen Hersteller bezogen. Um eventuelle Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellern erkennen zu können, wurde ein zusätzlicher Prüfkörper mit einer Standarddicke von 120 mm eines anderen Herstellers in das Prüfprogramm aufgenommen. Somit kann der Einfluss verschiedener Fasertypen, Holzarten sowie Bindemitteln festgestellt werden.

<sup>2)</sup> Als Vergleichsmöglichkeit wurde Steinwolle als nichtbrennbares Dämmmaterial herangezogen.

<sup>3)</sup> An dieser Stelle wurden zwei verschiedene Produkte (Herstellung im Nass- und im Trockenverfahren) geprüft. Zusätzlich wurde jeweils eine Variante mit und eine Variante ohne Fuge angefertigt um den Einfluss des Schrumpfverhaltens auf die Fuge beurteilen zu können.,

<sup>4)</sup> Mit Nut-Feder-Verbindung

### 3.2.2.2 Ausführung und Erstellung der Prüfkörper

Für die Probekörper wurden Abmessungen von 28,75 x 57,5 cm (1:2-Verhältnis) gewählt. Die Maße sind durch die Liefermaße der Dämmstoffe bedingt. Das 1:2-Verhältnis wurde gewählt, um eventuelle von der Herstellrichtung abhängige Geometrieänderungen festzustellen. Bei entsprechenden Probekörpern mit Stoßfuge wurde die Fuge in der mittleren Achse der Probekörper angeordnet. Die Dokumentation der Prüfkörper findet sich im Anhang E.

### 3.2.2.3 Durchführung und Ablauf der Versuche

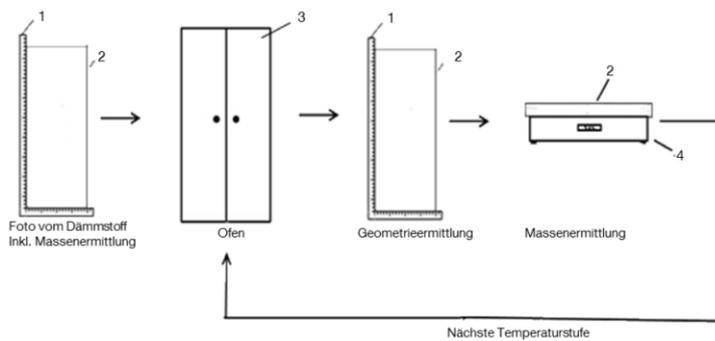


Abbildung 3-1: Ablauf der 1. Versuchsreihe [23]

Zu Beginn des Versuchs wurden von jedem Probekörper sowohl die Masse als auch die Abmessungen dokumentiert. Anschließend wurde zur Ermittlung der Kerntemperatur des Dämmstoffes ein Thermoelement jeweils im Kern der Prüfkörper angebracht.

Im Ofen wurden die Prüfkörper auf die entsprechende Temperaturstufe aufgeheizt, wobei das Thermoelement im Prüfkörper als Beurteilungsmessstelle genutzt wurde. Nach Erreichen dieser Stufe erfolgte eine erneute Geometrie sowie Massenermittlung. Anschließend erfolgte das Aufheizen der Körper auf die nächste Temperaturstufe. Die Temperaturstufen des Ofens entsprachen immer der gewünschten nächsten zu erreichenden Temperaturstufe im Prüfkörper.

Die Temperaturstufen wurden entsprechend der Vorgänge der Inhaltsstoffe und aus praktischen Gründen der Umsetzbarkeit auf nachfolgende Stufen (vgl. Tabelle 3-1) festgelegt.

Tabelle 3-3: Temperaturmessstufen der ersten Versuchsreihe

Temperatur, °C	Prozess	Prüfkörper
20	Ausgangstemperatur	PK 1 – PK 13
50 / 70	Schmelzpunkt Paraffin	PK 10 – PK 13
90 / 110	Verdampfen Wasser	PK 1 – PK 13
140 / 170	Schmelzpunkt Polyolefine	PK 2 – PK 5, PK 10 – PK 13

### 3.2.2.4 Ergebnisse

Nachfolgend werden kurz die Ergebnisse der Durchwärmungsversuche dargestellt.

Bei Betrachtung der Masse ist bei allen Dämmstoffen ein Verlust festzustellen. Dieser ist vor allem durch das Darren und den daraus resultierenden Verlust des Wassers zu begründen. Die größeren Verluste gegen Ende des Versuchs bei 170 °C sind bei den Prüfkörpern PK 5 durch Auseinanderfallen bzw. bei Probekörper 11 durch das Entzünden der unteren Ecke nach Berührung der Ofenwand zu erklären.

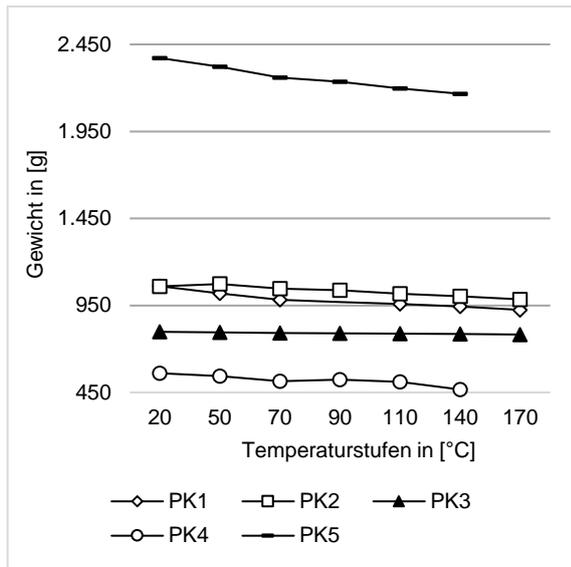


Abbildung 3-2: Masseverlust flexible Dämmung

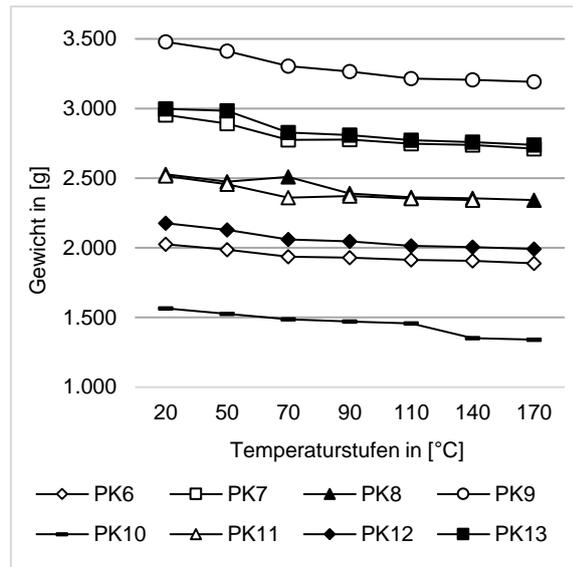


Abbildung 3-3: Masseverlust druckfeste Dämmung

Die Volumenänderung über den Temperaturbereich steigt bei den flexiblen Dämmstoffen im Allgemeinen tendenziell an. Anzumerken ist jedoch, dass dabei die Struktur des Dämmstoffes zunehmend spröder wird und der Prüfkörper an Stabilität verliert. Dieses Vorgehen ist mit dem Auflösen der Bindemittel zu erklären. Bei den druckfesten Dämmstoffen ist dieser Vorgang nicht so deutlich zu erkennen. Das Volumen verändert sich über das betrachtete Temperaturspektrum nicht nennenswert.

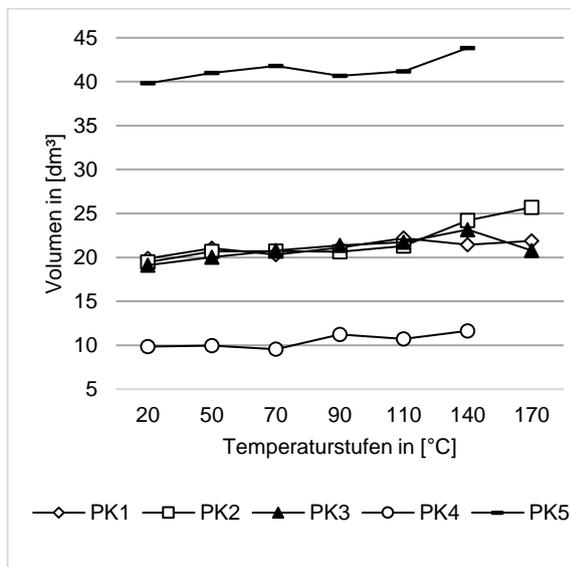


Abbildung 3-4: Volumen flexible Dämmung

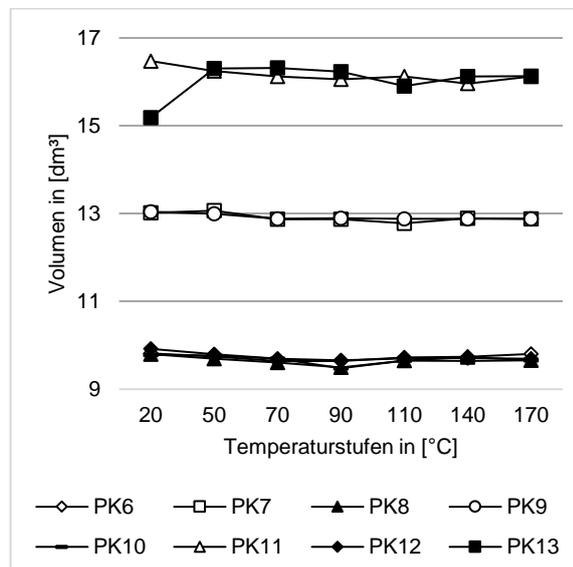


Abbildung 3-5: Volumen druckfeste Dämmung

Im Folgenden sind auch die Längen-, Breiten- und Dickenänderung dargestellt. Auch hier ist bei den flexiblen Dämmstoffen ein Anstieg der Werte zu erkennen.

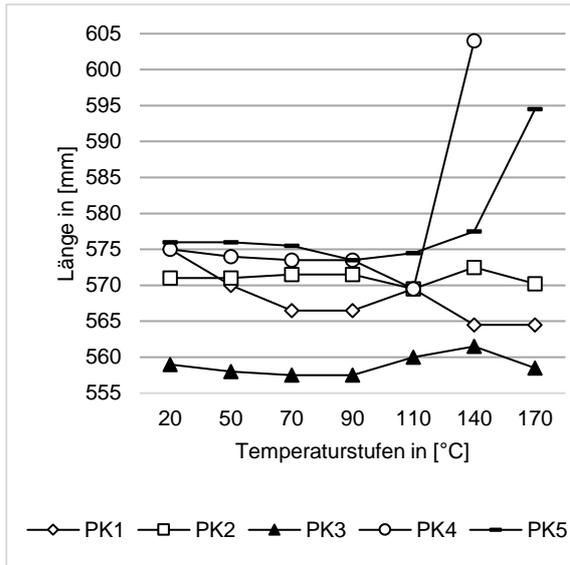


Abbildung 3-6: Länge flexible Dämmung

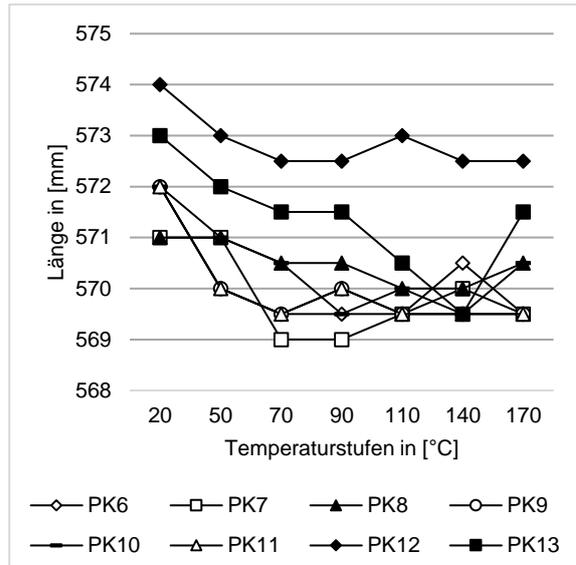


Abbildung 3-7: Länge druckfeste Dämmung

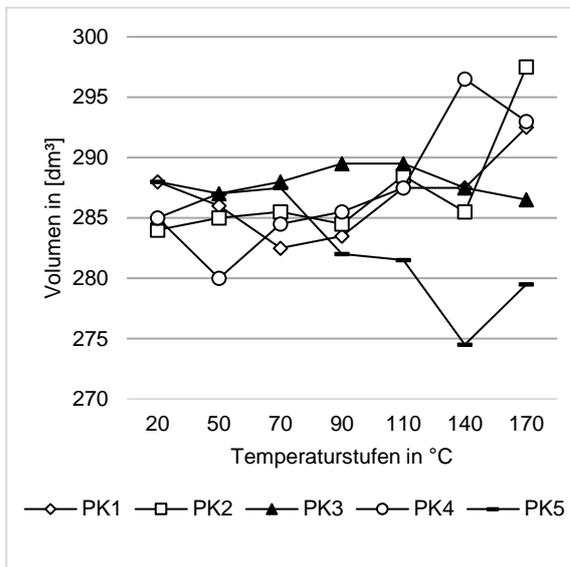


Abbildung 3-8: Breite flexible Dämmung

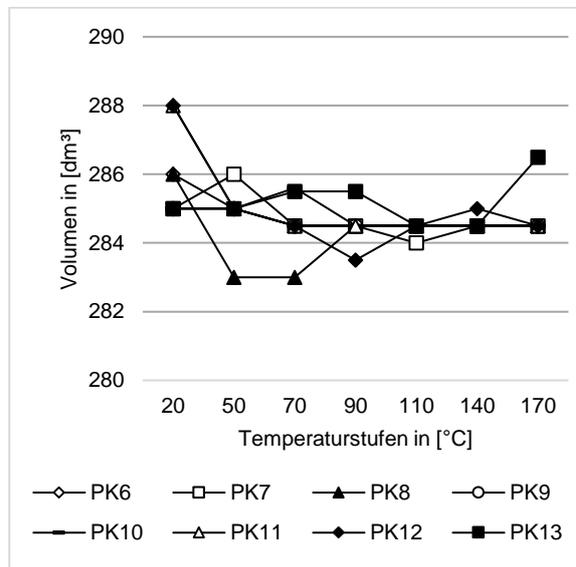


Abbildung 3-9: Breite druckfeste Dämmung

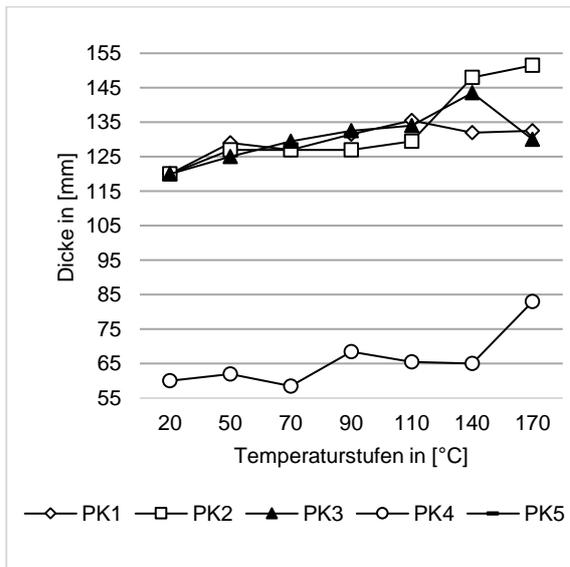


Abbildung 3-10: Dicke flexible Dämmung

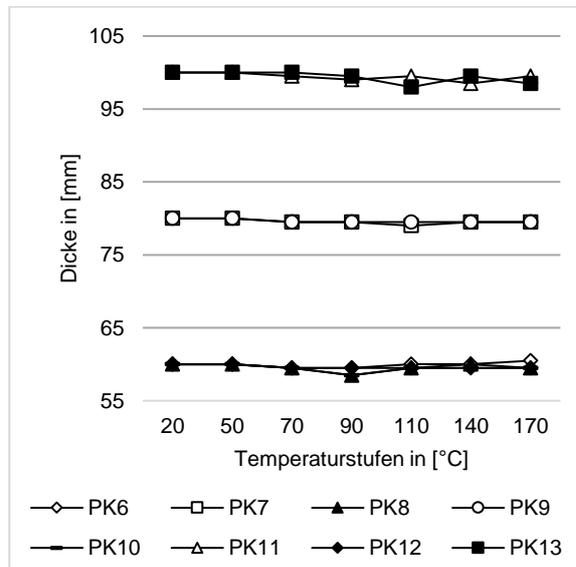


Abbildung 3-11: Dicke druckfeste Dämmung

Die Bilddokumentation der Versuchskörper ist im Anhang E dargestellt.

Rein optisch ist über den Versuchsverlauf eine deutliche Verfärbung der Versuchskörper bis zu einem dunklen Braun zu erkennen. Bei der letzten Temperaturstufe setzt die Verkohlung ein und die Prüfkörper färben sich schwarz.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass die Prüfkörper mit zunehmender Temperaturstufe strukturell so geschädigt werden, dass sie bei mechanischer Einwirkung zunehmend zerfallen. Die Struktur vor allem der flexiblen Dämmstoffe wird so geschädigt, dass die Verbindung der Fasern nicht mehr funktionsfähig ist.

Ein direktes Schrumpfen der Prüfkörper durch Wärmebeaufschlagung konnte zunächst nicht festgestellt werden. Dieser Vorgang findet somit erst später bei der Verkohlung des Dämmstoffes und somit höheren Temperaturen statt. Eine Aussage zum Einfluss des Schrumpfens auf das Öffnen der Stoßfuge ließ sich somit nicht ableiten.

### **3.2.3 2. Versuchsreihe: 20 °C, 100 °C, 250 °C**

#### **3.2.3.1 Begründung**

Bei der ersten Versuchsreihe wurde pro Material ein Prüfkörper erstellt. Dieser wurde schrittweise auf die gewählten Temperaturstufen erwärmt. Da die Dämmstoffe eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen, mussten die Prüfkörper teilweise sehr lange einer Temperaturstufe ausgesetzt sein, bis sich der gesamte Prüfkörper auf die gewünschte Temperatur erwärmt hatte. Dies hatte eine extrem lange Temperaturbeanspruchung und somit zum Teil auch eine deutliche Versprödung des Materials zur Folge.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden deshalb die Probekörper nur mit zwei Temperaturstufen beaufschlagt, um die Versuchsdauer und somit die extreme Beanspruchung zu minimieren. Bei Erreichend der gewünschten Stufe wurde der dafür vorgesehene Prüfkörper aus dem Ofen entnommen und nicht mehr zurück in den Ofen gelegt.

### 3.2.3.2 Materialwahl

Für die zweite Versuchsreihe wurden die Materialien analog zur ersten Reihe gewählt:

Tabelle 3-4: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe Durchwärmungsversuche

Bez.	Dämmstoff	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]
PK1.X	Flexible Holzfaserplatten	120	50	0,038
PK2.X		120	50	0,039
PK3.X		120	70	0,035
PK4.X	Steinwolle	120	55	0,039
PK5.X	Druckfeste Holzfaserplatten – Nassverfahren	60	230	0,048
PK6.X	Druckfeste Holzfaserplatten – Trockenverfahren	60	140	0,042
<sup>x</sup> Kennzeichnung der Temperaturmessstufen: X = 1 $\triangleq$ 100°C, X = 2 $\triangleq$ 200°C, X = 3 $\triangleq$ 20°C				

### 3.2.3.3 Ausführung und Erstellung der Prüfkörper

Nachdem in der ersten Versuchsreihe keine Abhängigkeit zwischen Herstellungsrichtung und Geometrieänderung festzustellen war, wurde für die Probekörper Abmessungen von 20 x 20 cm<sup>2</sup> (1:1-Verhältnis) gewählt.

Die Dokumentation der Prüfkörper findet sich im Anhang E.

### 3.2.3.4 Durchführung und Ablauf der Versuche

Zu Beginn des Versuches wurden alle Prüfkörper vermessen und gewogen. Von jedem Material wurden drei Prüfkörper erstellt, zwei wurden jeweils im Ofen erwärmt, ein Körper wurde als Referenz bei Ausgangstemperatur nicht mit Temperatur beaufschlagt.

Nachdem bei der ersten Versuchsreihe unter 100 °C keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden konnten, wurde die erste Temperaturstufe bei 100 °C gewählt. Bei 250 °C sollten die Spaltungsprozesse von PUR-Harz sowie Ammoniak zu Ammoniumsulfat beendet sein, deshalb wurde diese als zweite Temperaturstufe gewählt.

Um die durch die Beanspruchungsdauer hervorgerufene Versprödung zu vermeiden, wurden keine weiteren Temperaturmessstufen gewählt.

Die Dauer des Versuchs belief sich insgesamt auf 14 Stunden (12 Stunden bis zum Erreichen der ersten Temperaturstufe, 2 Stunden bis zum Erreichen der zweiten Temperaturstufe). Da bei ca. 200 °C Kerntemperatur bereits eine starke Rauchentwicklung auftrat, wurde der Versuch aus Sicherheitsgründen bei diesem Temperaturniveau gestoppt.

### 3.2.3.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zusammengefasst. In nachstehenden Diagrammen sind nur die ersten beiden Temperaturstufen (20 °C und 100 °C) dargestellt, da bei der letzten Temperaturstufe die Prüfkörper so zerfallen sind, dass keine ordentliche Messung mehr erfolgen konnte.

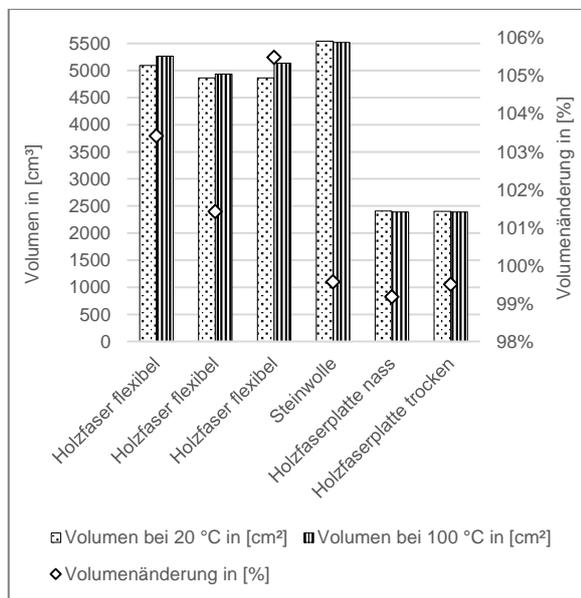


Abbildung 3-12: Volumenänderung

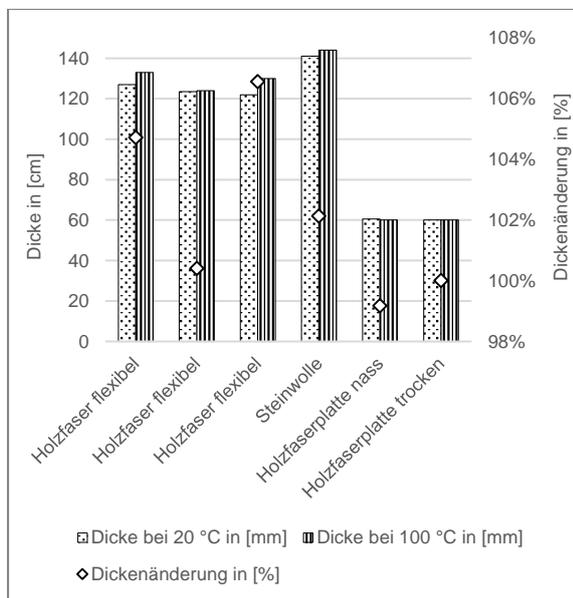


Abbildung 3-13: Änderung der Dicke

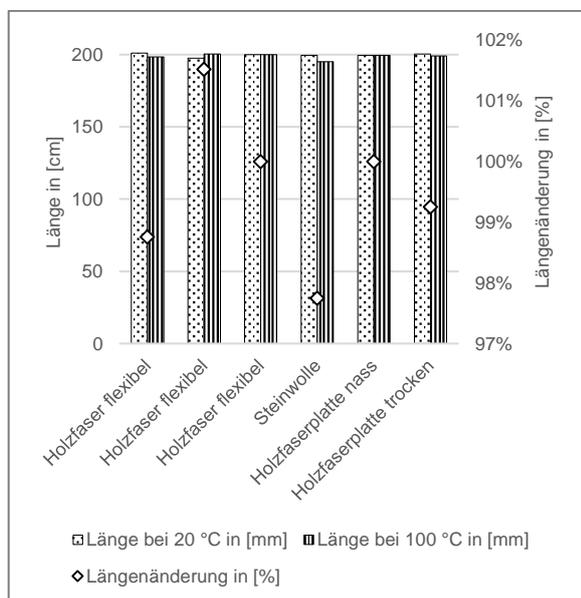


Abbildung 3-14: Längenänderung flexible Dämmung

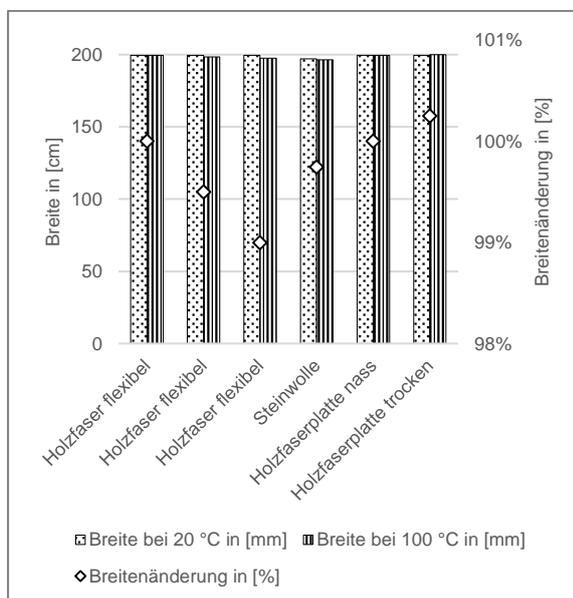


Abbildung 3-15: Breitenänderung druckfeste Dämmung

Zu erkennen ist, wie auch in der ersten Versuchsreihe, dass neben dem Schrumpfen des Materials bei erhöhten Temperaturen vor allem der Verlust des Gefügezusammenhalts des Dämmstoffs problematisch ist. Das Volumen bzw. die Abmessungen vergrößern sich zunächst bei erhöhten Temperaturen bis 200 °C.

Hinsichtlich der Masse ist analog zu der ersten Versuchsreihe ein deutlicher Verlust zwischen 6 % und 10 % zu beobachten. Dieser ist gegenüber dem Masseverlust von Steinwolle deutlich erhöht. Grund hierfür ist der vergleichsweise hohe hygroskopisch gebundene Wassergehalt der biogenen Dämmstoffe.

Die Bilddokumentation der Versuche wird im Anhang E dargestellt.

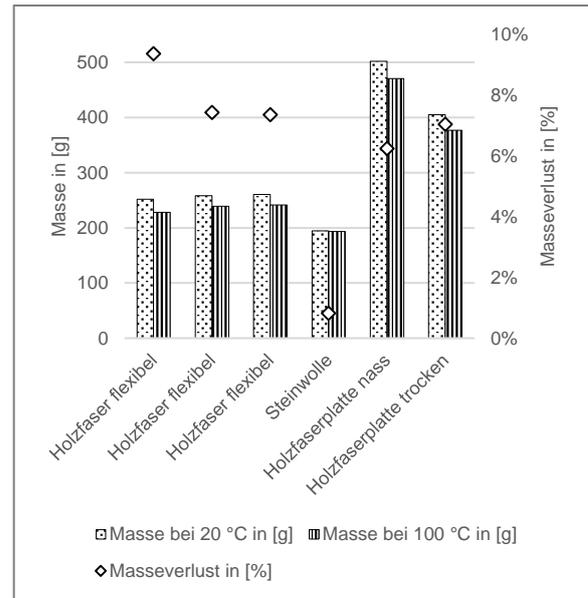


Abbildung 3-16: Masseverlust

### 3.2.4 Zusammenfassung der Durchwärmungsversuche

Bei den Versuchsreihen zur Durchwärmung wurde deutlich erkennbar, dass eine erhöhte Temperaturbeanspruchung, die jedoch noch keine Brandbeanspruchung ist, eine deutliche Versprödung des Materials und Auflösung des Gefügezusammenhalts nach sich zieht. Ein Schrumpfen der Dämmstoffe bis zu einer Temperatur von 250 °C konnte bei den Holzfaserdämmstoffen weitestgehend ausgeschlossen werden. Somit ist bei den nachfolgend beschriebenen Brandversuchen zu erwarten, dass ein Schrumpfen des Dämmstoffes erst mit zunehmender Zersetzung (entspricht der stofflichen Umsetzung des Materials) beginnt. Das Heißtemperaturverhalten (> 300 °C) wird in den Brandversuchen beurteilt.

### 3.3 Erste Versuchsreihe kleiner Wand- und Deckenofen

#### 3.3.1 Einleitung

##### 3.3.1.1 Allgemeines

Basierend auf den zusammengestellten Konstruktionen aus Kapitel 2.2 wurden möglichst realitätsnahe Konstruktionsaufbauten für die Kleinversuche zusammengestellt. Die zugehörige Matrix der Versuchsaufbauten und der damit abgezielten Ergebnisse sind im Anhang F dargestellt.

Geprüft wurden in der ersten Versuchsreihe ausschließlich Konstruktionen, welche sich aus einem Wand und einem Deckenbauteil zusammensetzten, damit beide Expositionen anschließend beurteilt werden konnten. Wand- und Deckenelement wurden miteinander verbunden, sodass ein „L“-förmige Prüfkörper entstand, welcher als raumabschließendes Bauteil in den Ofen eingestellt werden konnte.

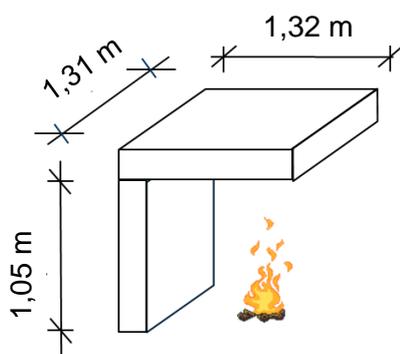


Abbildung 3-17: L-Prüfkörper

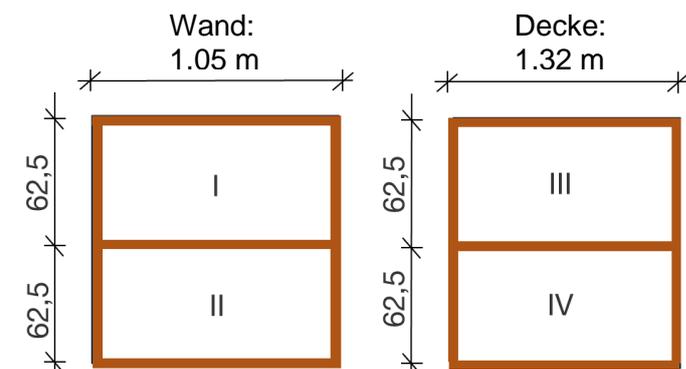


Abbildung 3-18: Wand- und Deckenelement der Prüfkörper

Die Wand- und Deckenelemente wurden in jeweils zwei Gefache unterteilt, die dann mit entsprechenden Dämmstoffen ausgedämmt wurden. Die genauen Versuchsaufbauten mit den zugehörigen Schichtaufbauten sind als Detailzeichnungen im Anhang F dargestellt.

Die Abmessungen der Prüfkörper wurden alle gleich gewählt (Decke  $b \times h$  1,31 x 1,32 m<sup>2</sup>, Wand  $b \times h$  1,31 x 1,05 m<sup>2</sup>).

##### 3.3.1.2 Aufbau des Prüfofens

Die Versuchskörper wurden in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig untersucht. Für alle Prüfkörper wurde der hier vorhandene Wand- und Deckenofen genutzt. Nachfolgende Abbildung zeigt, wie der Prüfkörper in den Prüföfen eingebaut wurde.

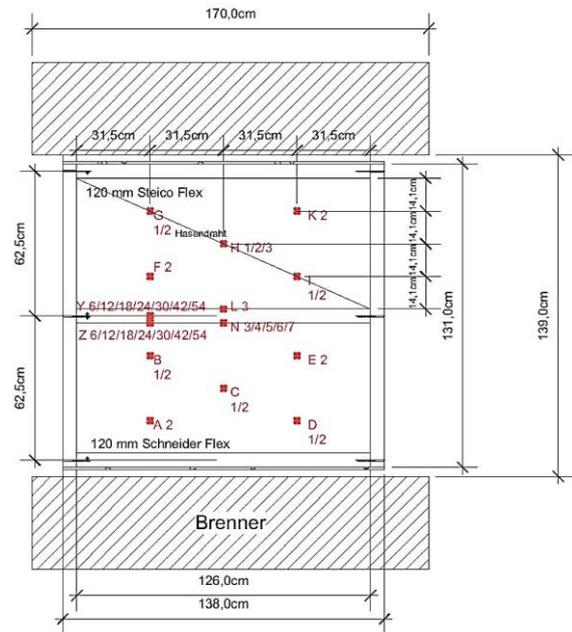
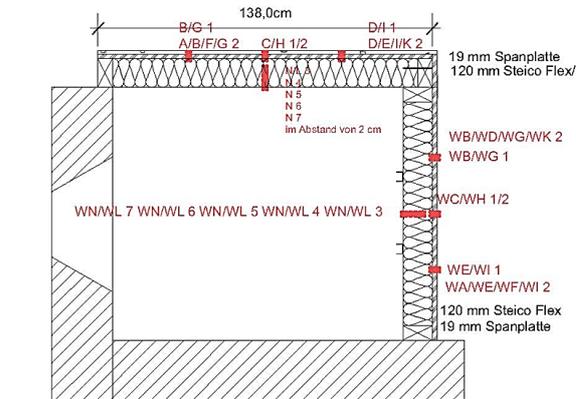


Abbildung 3-19: Schnitt durch Wand- und Deckenelement Im Prüfen

Abbildung 3-20: Aufsicht Deckenelement im Prüfen

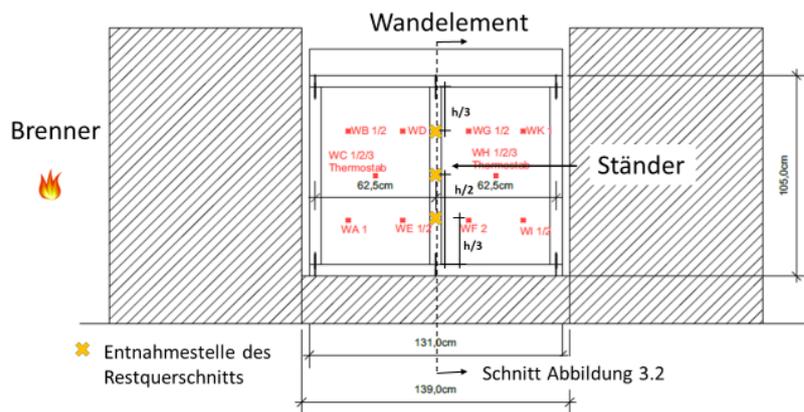


Abbildung 3-21: Ansicht des Wandelements im Prüfen

### 3.3.1.3 Temperaturbeanspruchung

Die Brandbeanspruchung aller Kleinversuche folgte der Normbeanspruchung der Einheits-temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 [24].

### **3.3.2 Kleinversuche für die Beurteilung des Raumabschlusses**

#### **3.3.2.1 Begründung**

Nachfolgend beschriebene Versuche (Nr. 1 – 9) wurden zur Ermittlung der Parameter für den Raumabschluss konzipiert (Vgl. Anhang). Von Belang sind an dieser Stelle die Temperaturanstiege zwischen den einzelnen Bauteilschichten. Diese Anstiege sind abhängig von dem Schichtenaufbau. Die Schichten, welche brandraumseitig vorne angeordnet sind, haben einen Einfluss auf die Temperaturentwicklung in den dahinterliegenden Schichten. An dieser Stelle wurde mit den verschiedenen Aufbauten versucht, möglichst viele praxisrelevante Kombinationen und somit die relevanten Einwirkungen der Schichten aufeinander abzubilden. Zusätzlich wurden die biogenen Dämmstoffe auch ohne vorgestellte Bekleidungen und Schichten geprüft um ihre reine Schutzwirkung untersuchen zu können.

#### **3.3.2.2 Instrumentierung**

Zwischen den einzelnen Schichten des Prüfkörpers wurden zur Temperaturerfassung Thermoelemente (Typ K) angebracht. Pro Gefach und Schicht wurden über die Fläche fünf Messstellen angeordnet (Vgl. beispielhaft Abbildung 3-19 und Anhang F). So ist es möglich für die gesamte Schicht einen Mittelwert zu bilden, sowie einzelne Maximalwerte herauszulesen. Zusätzlich wurden Thermoelemente an den Holzständern/-balken angebracht, um das Verhalten zwischen Dämmstoff und Ständer beobachten zu können.

#### **3.3.2.3 Versuchsdurchführung**

Die Versuche wurden in der Regel so lange einer Brandbeanspruchung unterzogen, bis auf der brandabgewandten Seite der Gefache eine Durchschnittstemperatur zwischen der Spanplatte und der vorletzten Schicht von 270 °C erreicht war. In einigen Fällen mussten die Versuche aus Sicherheitsgründen abgebrochen werden, nachdem andere Gefache auf der brandabgewandten Seite bereits einen Durchbrand hatten (vgl. Prüfprotokolle im Anhang G). Nach Versuchsende wurden die Prüfkörper möglichst wenig abgelöscht, aus dem Ofen entnommen und deren Erscheinungsbild dokumentiert.

#### **3.3.2.4 Ergebnisse**

Die Temperaturverläufe der einzelnen Prüfungen sind im Anhang G dargestellt. Die Verläufe bilden die Grundlage der Simulationen für den Raumabschluss.

### 3.3.3 Kleinversuche für die Beurteilung der Restquerschnitte

#### 3.3.3.1 Begründung

Um die Schutzwirkung von biogenen Dämmstoffen auf die Holzständerkonstruktion prüfen zu können wurden nachfolgend beschriebene Versuche konzipiert.

#### 3.3.3.2 Instrumentierung

Bei den Versuchen zur Resttragfähigkeit bei Brandbeanspruchung steht der Temperaturverlauf an sowie in den Holzbauteilen im Vordergrund. Deshalb wurden bei den Versuchen 10, 11 und 12 hauptsächlich Thermoelemente an den Ständern sowie in Ständermitte angebracht. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Versuchen zum Raumabschluss sowie zur Gewinnung weiterführender Informationen wurden zusätzlich Thermoelemente zwischen den einzelnen flächigen Schichten angebracht.

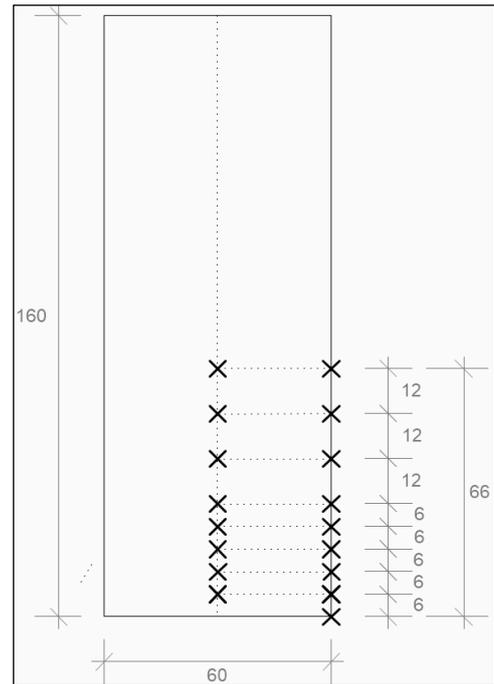


Abbildung 3-22: Anordnung der Thermoelemente am und im Ständer

#### 3.3.3.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden analog zu den Versuchen zur Beurteilung der raumabschließenden Funktion beziehungsweise des Beitrags einzelner Schichten zum Raumabschluss mit der ETK beaufschlagt. Im Gegensatz dazu wurden die Prüfkörper jedoch mit vorher festgelegten Zeiten thermisch beansprucht um die aufgezeichneten Temperaturverläufe mit den Restquerschnitten vergleichen zu können. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 3-5: Übersicht der Versuche zur Resttragfähigkeit

Versuch	Dämmung	Bekleidung	Balken-/ Ständerabmessungen	Abfallzeit Bekleidung	Versuchsdauer
V10 Wand	Zellulosefaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	30 min	40 min <sup>1)</sup>
V10 Decke	Holzfaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	30 min	40 min <sup>1)</sup>
V11 Wand	Zellulosefaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	30 min	45 min
V11 Decke	Holzfaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	30 min	45 min
V12 Wand	Zellulosefaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	45 min	60 min
V12 Decke	Holzfaser	GKF, 15 mm	60/160 mm	45 min	60 min

1) Der Versuch musste aus Sicherheitsgründen früher abgebrochen werden.

Um die Auswirkung der Dauer der Schutzfunktion der Bekleidung nachvollziehen zu können, wurden verschiedene Zeiten (30 bzw. 45 Minuten) für die „Protection-Phase“ festgelegt. So konnte auch die Vorwärmung Dämmstoffes während dieser Phase beobachtet werden. Die Post-Protection-Phase wurde einheitlich mit 15 Minuten festgelegt. Anhand diesen ungeschützten Zeitintervalls nach Abfall der Bekleidung sollte die Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung in Abhängigkeit der Vorwärmung während der Protection-Phase ermittelt werden. Um einen genauen Abfallzeitpunkt der Bekleidung der Konstruktion garantieren zu können, wurden die Gipsfaserbekleidung mittels eines kleinen Bolzens so befestigt, dass ein Lösen der Bekleidung während des Brandversuchs möglich war. Die Abfallzeiten von 45 min der Bekleidungen wurden analog zu den dem Verfahren nach Tiso [2] zu Grunde liegenden Versuchen gewählt, um an diese Stelle Vergleichbarkeit mit diesen Ergebnissen zu gewährleisten. Zusätzlich wurde eine Abfallzeit von 30 Minuten gewählt, um die Auswirkungen einer kürzeren Vorwärmzeit der Dämmung analysieren zu können.

Um ein Herausfallen der Dämmung zu verhindern, wurde bei den Versuchen 11 und 12 in den Deckenelementen ein Hasendraht zur Lagesicherung der Dämmung zwischen Bekleidung und Dämmung verbaut.

#### **3.3.3.4 Ergebnisse**

Im Folgenden werden besondere Beobachtungen zu den Versuchen zur Ermittlung der Restquerschnitte der Ständer beschrieben. Der genaue Versuchsverlauf ist in den Prüfprotokollen in Anhang H einzusehen.

#### **Versuch 10**

Im Versuch 10 wurde die Dämmung allein durch Klemmwirkung fixiert. Nach 30 Minuten wurde die Bekleidung des Wand- und Deckenelements fallen gelassen. Durch die bereits erfolgte Vorerwärmung fiel die Dämmung bei dem Deckenelement direkt mit der Bekleidung aus dem Gefach. Eine Klemmwirkung des Dämmstoffes war somit nach 30 Minuten Vorwärmzeit nicht mehr vorhanden. Ein Durchbrand im Deckenelement folgte, worauf der Versuch aus Sicherheitsgründen vor Erreichen der gewünschten Prüfzeit abgebrochen werden musste.

Bei den Wandelementen, welche mit Zellulose zweier verschiedener Hersteller ausgeblasen wurden, traten sehr unterschiedliche Ergebnisse auf. Nach Abfallen der Bekleidung war bei Gefach 1 bereits ein deutlicher Spalt zwischen Rähm und Dämmung sichtbar. Somit war eine Schutzwirkung der Dämmung auf den Holzquerschnitt des Rähms nicht vorhanden. Im Gefach 2 wurde die Zellulose deutlich besser eingebblasen. Somit war zwischen Balken und Dämmung kein Spalt, Die Gefache mit Zellulosefaserdämmung versagten nicht während der Versuchszeit.

### Versuch 11

In Folge der Ergebnisse des Versuchs 10 wurde innerhalb der Versuchskörper 11 und 12 Drahtgitter in den Deckenelementen nachgerüstet, um ein direktes Herausfallen des Dämmstoffes nach Fallenlassen der Bekleidung zu verhindern. Die Post-Protection-Phase konnte so die geplanten 15 Minuten nach Fallenlassen der Bekleidung untersucht werden.

Nach Abfallen der Bekleidung nach 30 Minuten verblieb so die Dämmung innerhalb der Konstruktion. Die direkte Brandbeanspruchung des

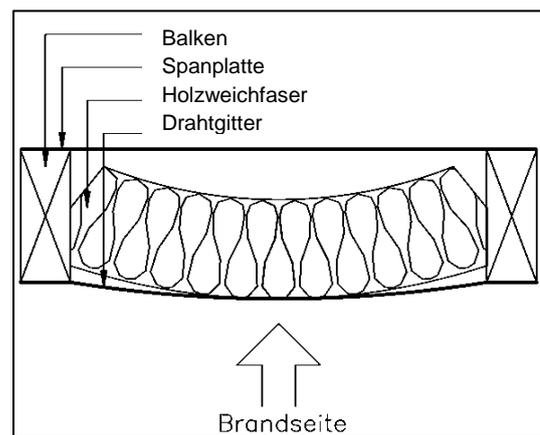


Abbildung 3-23: Lagesicherung der Dämmung durch Drahtgitter nach Abfallen der Bekleidung

bewirkte jedoch in den anschließenden 15 Minuten Post-Protection-Phase eine zunehmende Dehnung des Drahtgitters (vgl. Abbildung 3-23). Ein Durchhängen des Dämmstoffes und somit ein Hinterbrennen des Dämmstoffes in die Konstruktion waren die Folge. Durch das Schrumpfen seitliche Durchbrennen wurde ein früheres Versagen des flächigen Dämmstoffes möglich, da das Abbruchkriterium mit dem Erreichen von 270 °C zwischen Dämmstoff und Spanplatte charakterisiert war. Aus den reinen Beobachtungen heraus war es nicht möglich welcher Teil des Deckenbalkens zu welchem Zeitpunkt des Versuches geschützt war. Die Aussage der Thermolemente ist zudem nicht deutlich, da ein Nachrutschen der Dämmung im Drahtgitter keine eindeutige Aussage über die Rückzugsgeschwindigkeit zulassen. Deutlich zu erkennen war nach Beendigung des Versuches die komplett verkohlte Spanplatte hinter der Gefachdämmung, was das Hinterbrennen des Dämmstoffes belegt.

Die Beobachtungen bei den Zellulosegefachen der Wand decken sich weitestgehend mit den Beobachtungen aus Versuch 10. Nachdem die Dämmung bei Versuch 10 innerhalb des Gefachs nach Abfallen der Bekleidung verblieben ist, wurde bei den Wandelementen kein Hasendraht nachgerüstet.

### Versuch12

Analog zu Versuch 11 wurde auch hier im Deckenelement ein Hasendraht nachgerüstet. Bei Versuch 12 wurde die Bekleidung im Vergleich zu Versuchen 10 und 11 erst nach 45 Minuten fallengelassen. Eine längere Vorwärmung des Dämmstoffes hinterhalb der Bekleidung war die Folge. Die Beobachtungen des Brandverlaufs nach Abfallen der Bekleidungen decken sich mit den Beobachtungen aus Versuch 11.

Die Zellulose verblieb die gesamte Prüfzeit planmäßig in der Konstruktion.

## 3.4 Zweite Versuchsreihe kleiner Wand- und Deckenofen

### 3.4.1 Begründung

In der ersten Versuchsreihe im kleinen Wand- und Deckenofen wurde die Beobachtung gemacht, dass durch das Rückzugs- und Schrumpfverhalten der biogenen Dämmstoffe ein ausreichend langes Verbleiben der Dämmstoffe in der Konstruktion vor allem bei den Holzfaserplatten nach Abfallen der Bekleidungen ohne weitere Vorkehrungen wie zum Beispiel der Einbau eines Hasendrahtes nicht möglich ist. Auch bei der Installation eines Hasendrahtes kann das Rückzugsverhalten an den Ständern nicht sicher quantifiziert werden, da die Dämmung bedingt durch die Schwerkraft während des Versuches am Ständer hinunterrutscht und deshalb teilweise keine eindeutigen Ergebnisse erzielt werden können.

Auf Grund dessen wurden nachfolgende Versuche so konzipiert, dass die Brandprüfung im liegenden Zustand durchgeführt wurde, um ein Verrutschen des Dämmstoffes zu vermeiden und so eine reine Rückzugsgeschwindigkeit des Dämmstoffes vom Holzquerschnitt unter Brandbeanspruchung ermittelt werden konnte.

### 3.4.2 Aufbau der Prüfkörper

Die Versuchskörper bestanden aus Holzrahmenelementen mit vier Gefachen ab. Nachdem in diesem Fall für die Klemmwirkung in der liegenden Position die Breite und Masse der Dämmstoffe keinen Einfluss hatte wurden schmalere Gefache (vgl. nachfolgende Abbildung) gewählt, damit eine Prüfung von zwei Ständern gleichzeitig möglich war. Der zweite und vierte Ständer bildeten bei dem Prüfkörper die Prüfquerschnitte.

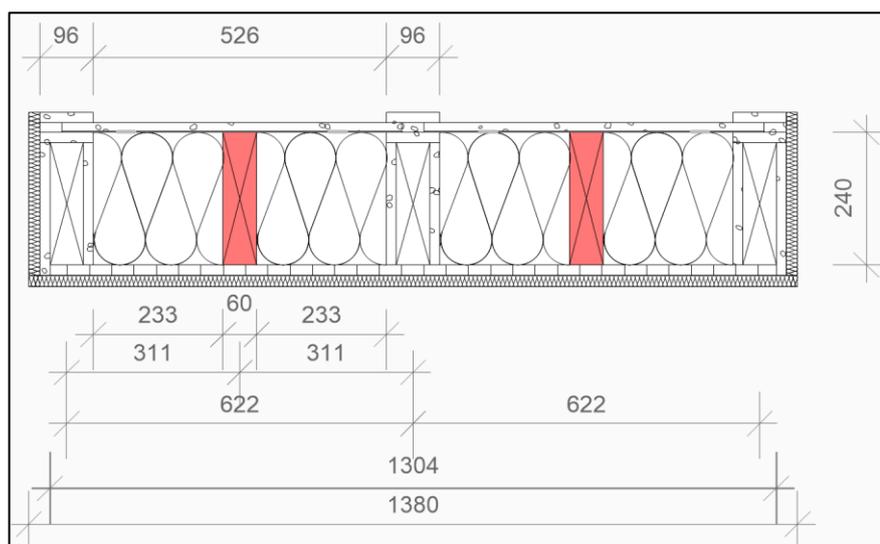


Abbildung 3-24: Schnitt durch den Prüfkörper der liegend geprüften Versuche

In die Gefache wurden die nachfolgenden Dämmstoffe eingebracht. Zugeordnet ist auch die jeweilige Schutzzeit des Gefachs, in welcher die Dämmung durch eine 18 mm-GKF Platte

geschützt wurde. Die abweichende Stärke der GKF-Platte von den Versuchen nach Tiso sowie den eben beschriebenen Versuchen wurde gewählt um zum einen ein Abziehen der Platten im Ganzen zu ermöglichen, zum anderen, um weitere Ergebnisse zu abweichenden Plattenstärken zu ermitteln.

Tabelle 3-6: Dämmstoffe und Schutzzeiten der einzelnen Gefache der „liegenden“ Versuche

	Gefach 1/2		Gefach 3/4		Gesamtprüfzeit
	Dämmstoff	Protection Phase	Dämmstoff	Protection Phase	
<b>Versuch 1</b>	Holzfaser	0 Minuten	Zellulose	0 Minuten	90 Minuten
<b>Versuch 2</b>	Holzfaser	30 Minuten	Holzfaser	45 Minuten	90 Minuten
<b>Versuch 3</b>	Zellulose	30 Minuten	Zellulose	45 Minuten	90 Minuten

Der erste Versuch wurde ohne Bekleidung geprüft, um die unbeeinflusste Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung zu ermitteln. Die Versuche zwei und drei wurden mit einer Bekleidung aus GKF geprüft. Die Bekleidung der jeweiligen Gefache wurde unabhängig voneinander durch ein verbindungsmittelloses System befestigt, sodass während dem Versuch ein Abziehen zu unterschiedlichen Zeiten der Platten von dem jeweiligen Gefach möglich war. Zur Unterstützung und sicherem Herausziehen aus dem Ofen wurden die Bekleidungen durch Stahlbänder unterstützt.

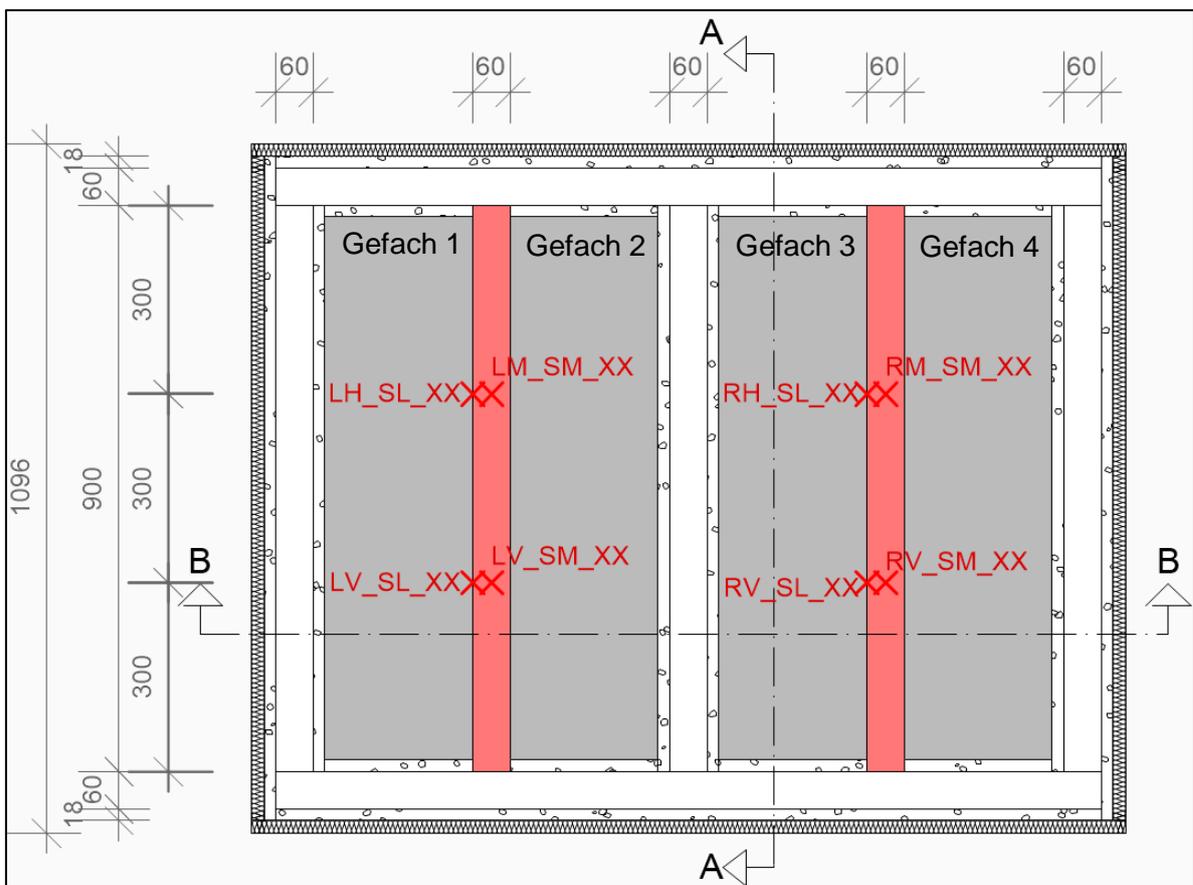


Abbildung 3-25: Aufsicht auf den unbekleideten Prüfkörper der liegend geprüften Versuche

### 3.4.3 Instrumentalisierung

An den beiden mittig in den Gefachen liegenden KVH-Querschnitten wurden jeweils in den Drittelpunkten der Länge (vgl. Abbildung 3-25 in rot markiert) Thermolemente angebracht, um die Temperaturbeanspruchung und damit den Rückzug der Dämmung entlang des Ständers messen zu können. Damit der Rückzug über die gesamte Ständerhöhe gemessen werden konnte, wurden im Gegensatz zu den ersten Kleinbrandversuchen zum Restquerschnitt (vgl. Kapitel 3.3.3), die Thermolemente über die gesamte Tiefe des Ständers angeordnet. Um eine Vergleichbarkeit zu den anderen Versuchen zu gewährleisten, wurden die selben Abstände der Thermolemente gewählt. Um ebenso eine Vergleichbarkeit zu den Untersuchungen nach Tiso zu ermöglichen wurde zusätzlich ein Thermolement in 100 mm Tiefe angeordnet. (Vgl. nebenstehende Abbildung 3-26)

### 3.4.4 Versuchsdurchführung

Um eine Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung ohne Einfluss des Nachrutschens am KVH-Querschnitt infolge der Schwerkraft ermitteln zu können, wurden die drei Prüfkörper im Ofen liegend geprüft. Bei den Versuchen zwei und drei wurde vom ersten Gefach nach 30 Minuten und vom zweiten Gefach nach 45 Minuten die Bekleidung abgezogen und dann das Gefach mit der innenliegenden Dämmung ungeschützt weiter geprüft.

### 3.4.5 Ergebnisse

In Folge der Prüfung der Dämmstoffe ohne Nachrutschen am KVH-Querschnitt infolge der Schwerkraft konnte das reine Rückzugsverhalten des Dämmstoffes beurteilt werden. Ein Abfallen von Teilen der Dämmung während der Versuche, das Kippen aus

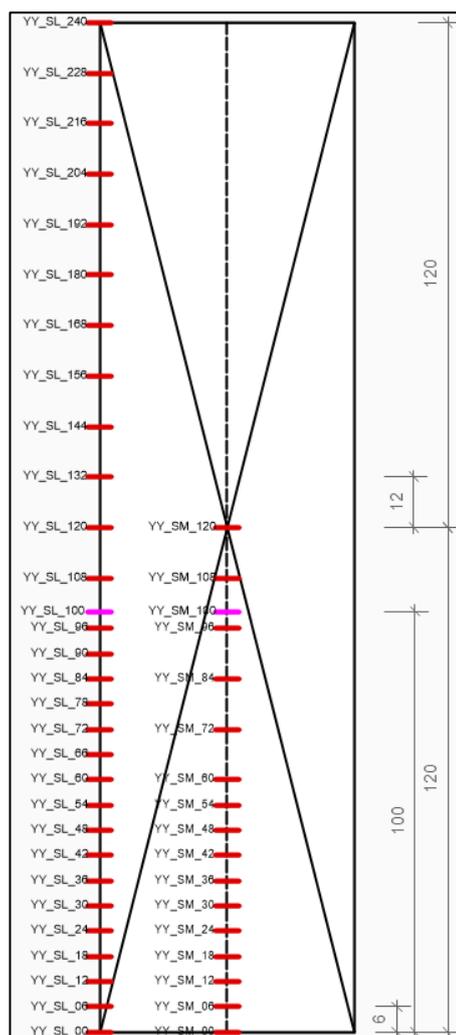


Abbildung 3-26: Anordnung Thermolemente am KVH-Querschnitt



Abbildung 3-27: Versuchskörper 2



Abbildung 3-28: Im Ofen liegender Prüfkörper

dem Gefach heraus oder auch das Durchbiegen der Dämmstoffe wie in den Deckenkonstruktionen beobachtet konnte so vermieden werden. Vor allem ein Nachrutschen der Dämmstoffe wie es bei den Deckenelementen beobachtet wurde, wenn die Dämmung durch ein Drahtgitter gesichert wurde, konnte so vermieden werden. Im Allgemeinen wurden durch die liegenden Versuche deutlich höhere Schutzzeiten für den Ständer erwirkt. Ein unbeeinflusster Wert der Rückzugsgeschwindigkeit konnte so ermittelt werden.

## 3.5 Versuche im Kleinprüfstand nach DIN 4102 Teil 8

### 3.5.1 Begründung

Die nachfolgend beschriebenen Prüfungen nach DIN 4102 Teil 8 wurden zusätzlich zu den Kleinbrandversuchen im Wand- und Deckenofen durchgeführt, um den Wärmedurchgang durch die ausgewählten Dämmstoffe zu ermitteln. Der deutlich kleinere Brandofen beziehungsweise die deutlich kleinere Prüfkörpergeometrie konnten gewählt werden, da in den Versuchen zum reinen Wärmedurchgang weiterführende Maßstabeffekte nicht maßgebend sind.

Nachdem bei den bereits beschriebenen Kleinversuchen (vgl. Kapitel 3.3.2) die Dämmstoffe nicht bei jedem Versuch innerhalb der Gefach gehalten werden konnten und deshalb der Wärmedurchgang durch die Materialien nicht einwandfrei nachgewiesen werden konnte, wurden die hier beschriebenen Versuche zusätzlich mit weiteren Modifikationen durchgeführt.

### 3.5.2 Aufbau der Prüfkörper

Für alle zehn Prüfkörper wurde der gleiche Grundaufbau gewählt. Die Dämmstoffe wurden durch einen Rahmen aus Vollholz begrenzt. Auf den Außenseiten wurde der Holzrahmen mit Gipskarton bekleidet, um einen Durchbrand an der Ofenwand zu vermeiden. Als feuerabgewandte Schicht wurde analog zu den durchgeführten Kleinversuchen im kleinen Wand- und Deckenofen (vgl. Kapitel 3.3.2) eine 19 mm dicke Spanplatte gewählt. Der Aufbau in der Ansicht ist in nebenstehender Abbildung (Abbildung 3-29) dargestellt. In

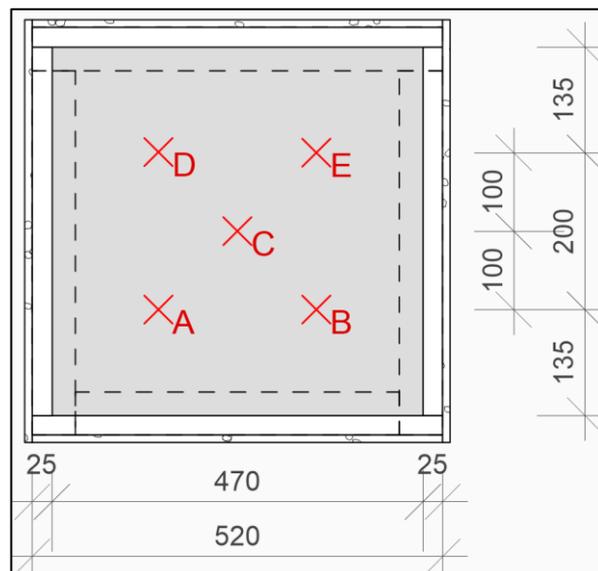
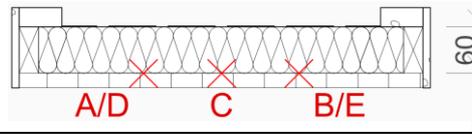
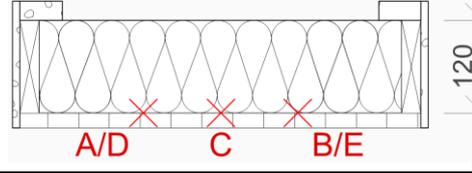
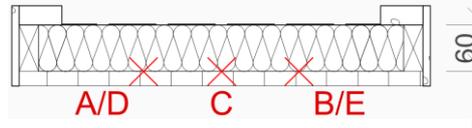
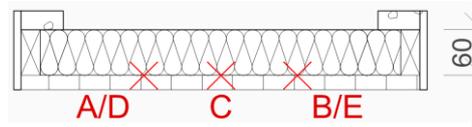
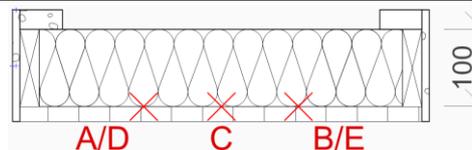
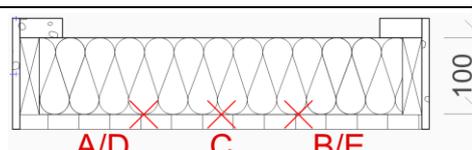
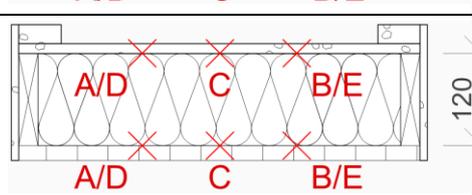
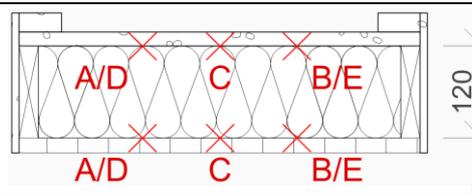
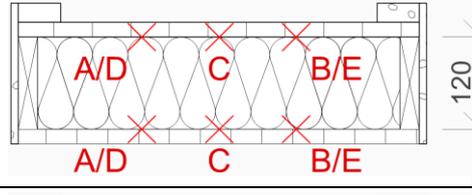
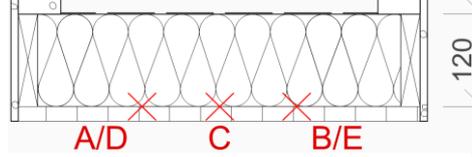


Abbildung 3-29: Aufsicht Prüfkörper Teil 8 - Versuche

nachfolgender Tabelle 3-7 befinden sich die Schnitte zu den jeweiligen Aufbauten. Um ein Herausfallen der Dämmung während der Versuche zu verhindern, wurde als äußerer Rand ein 25 mm breiter Rahmen aus Gipskartonplatten Typ F mit einer Dicke von 25 mm gewählt. Bei den Dämmstoffen, bei welchen ein Beulen bzw. Abfallen erwartet wurde, wurde zusätzlich ein Drahtgitter zur Lagesicherung verbaut.

Tabelle 3-7: Darstellung der Versuchsaufbauten im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8

Nr.	brandzuge- wandt	Dämmung	brandabge- wandt	Detail
V01	Drahtgitter	Holzfaser- matte 60 mm	Spanplatte 19 mm	
V02	-	Holzfaser- matte 120 mm	Spanplatte 19 mm	
V03	Drahtgitter	Zellulose 60 mm	Spanplatte 19 mm	
V04	-	Holzfaser- platte, Typ M, 60 mm	Spanplatte 19 mm	
V05	-	Holzfaser- platte, Typ M, 100 mm	Spanplatte 19 mm	
V06	-	Holzfaser- platte, Typ M dry, 100 mm	Spanplatte 19 mm	
V07	GKB 12,5 mm	Holzfaser- matte 120 mm	Spanplatte 19 mm	
V08	GKF 18 mm	Holzfaser- matte 120 mm	Spanplatte 19 mm	
V09	Dreischicht- platte 19 mm	Holzfaser- matte 120 mm	Spanplatte 19 mm	
V10	Drahtgitter	Zellulose 120 mm	Spanplatte 19 mm	

### **3.5.3 Instrumentalisierung**

Um einen qualitativen Durchschnitt des Wärmedurchgangs zu ermitteln, wurden hinter den zu untersuchenden Schichten je fünf Thermoelemente des Typs K in der Anordnung nach Abbildung 3-29 angeordnet.

### **3.5.4 Durchführung der Versuche**

Die Prüfkörper wurden nach Einheits-Temperaturzeitkurve (DIN EN 1363-1) geprüft. Als Abbruchkriterium wurde bei allen Prüfkörpern die Grenztemperatur ( $T = 270 \text{ °C}$ , gemessen im Mittel über die fünf Messpunkte hinter der maßgebenden Schicht) zwischen Gefachdämmung und Spanplatte gewählt.

## 4 Bestimmung thermischer Materialkennwerte

### 4.1 Allgemeines

Um thermische FE-Simulationen zur Erweiterung und Entwicklung allgemeiner Bemessungsregeln für Holzkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen unter Brandeinwirkung durchführen zu können, werden thermische Materialkennwerte wie die Rohdichte  $\rho$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die spezifische Wärmespeicherkapazität  $c_p$  benötigt. Da diese Materialkennwerte nur unter Raumtemperatur nicht jedoch unter erhöhten Temperaturen (50°C - 1200°C) vorliegen, wurden diese experimentell ermittelt.

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) stellt dabei ein gebräuchliches Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte bzw. des temperaturabhängigen Masseverlustes eines Stoffes dar. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Dabei wird zwischen stationären und instationären Messverfahren unterschieden. Für faserartige Dämmstoffe, wie Holzfaserdämmstoffe und Zellulosedämmstoffe, bietet sich hierfür die transiente Flächenquellenmethode (Hot-Disk-Methode) als instationäres Messverfahren oder das Guarded-Hot-Plate-Verfahren als stationäres Messverfahren an.

Die Ermittlung der spezifischen Wärmespeicherkapazität kann für faserartige Dämmstoffe mit Hilfe des Hot-Disk-Verfahrens oder durch eine Differenz-Scanning-Kalorimetrie (DSC) erfolgen.

### 4.2 Thermogravimetrische Analyse

#### 4.2.1 Grundlagen

Mit Hilfe der thermogravimetrischen Analyse (TGA) werden die Masse bzw. die Masseänderung eines Probekörpers in Abhängigkeit der Temperatur oder der Zeit bestimmt.

Als Voraussetzung muss der Probekörper eine Reaktion mit der Umgebung eingehen, um einen Austausch der Materie mit der Umgebung hervorzurufen. Diese Reaktion führt in der Regel zu einer Masseab- oder -zunahme des Körpers. Bei Festkörperreaktionen werden keine flüchtigen Komponenten mit der Umgebung ausgetauscht. Mit Ausnahme magnetischer oder elektrischer Umwandlungen werden die Reaktionen von Festkörpern daher möglicherweise lückenhaft wiedergegeben. Im Allgemeinen wird der Umgang mit thermogravimetrischen Analysen in der DIN 51006 beschrieben.

Bei der Thermogravimetrie wird ein Probekörper erwärmt und seine Masseänderung während dieses Vorganges bezogen auf die verstrichene Zeit bzw. die Temperatur im Ofenraum ermittelt. In Abbildung 4-1 ist eine Thermowage schematisch dargestellt. Sie besteht aus Probenbehälter, Regler, Ofen, Waage und Schreiber. [25]

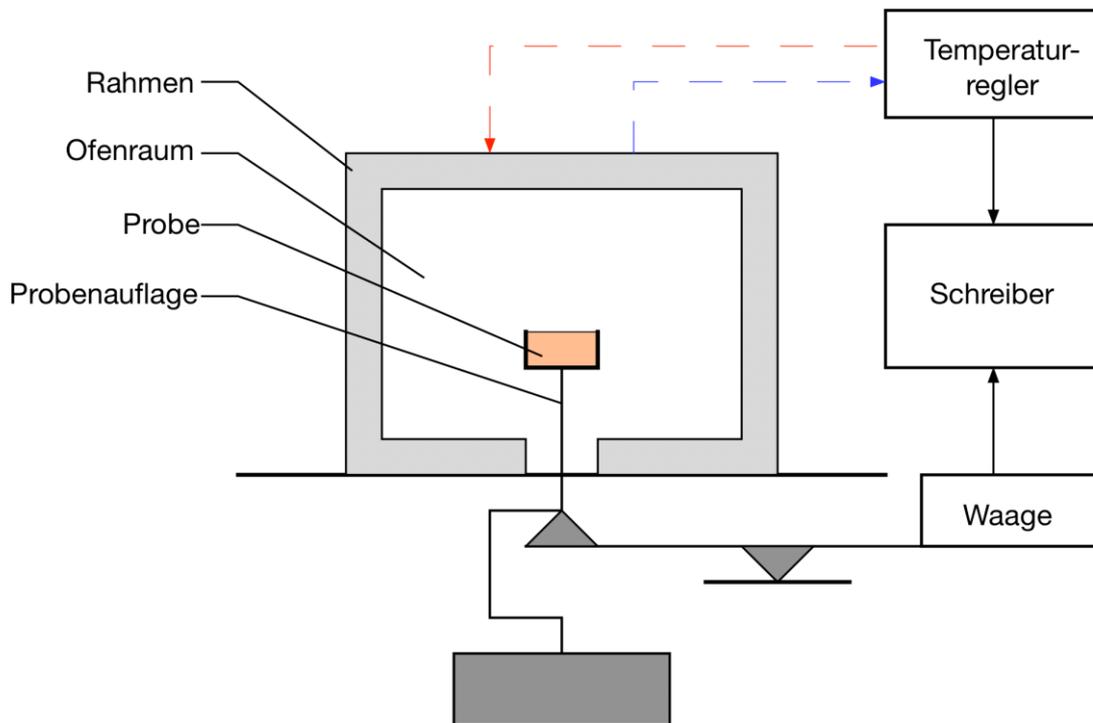


Abbildung 4-1: schematische Darstellung einer Thermowaage [26]

Die Atmosphäre im Ofenraum ist bei der thermogravimetrischen Analyse von großer Bedeutung. Sofern eine Messung im Vakuum durchgeführt wird, kann es zur Rückreaktion von eventuell anfallenden Reaktionsprodukten kommen. Durch eine laminare Umströmung mit einem inerten Gas sollen diese Reaktionsprodukte von der Probe entfernt werden. Hierfür werden meist Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid verwendet. Will man die Reaktion der Probe mit einem bestimmten Gas untersuchen, besteht die Möglichkeit, das Inert-Gas mit diesem Gas zu versetzen. Nutzt man beispielsweise Sauerstoff als Reaktionspartner bei der TGA von Holzwerkstoffen, ist eine Verbrennungsreaktion zu erwarten [25]. Zersetzungsreaktionen in einer Stickstoff-Atmosphäre im Vergleich zu einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre setzen erst später ein [27].

### 4.2.2 Messprogramm

Zur Untersuchung der thermischen Zersetzung und der temperaturabhängigen Rohdichte wurden sowohl für die Proben der Holzfaserdämmung als auch für die Zelluloseflocken thermogravimetrische Analysen vorgenommen.

Sämtliche Untersuchungen wurden im Labor des Lehrstuhls für Energiesysteme der Technischen Universität München in Garching durchgeführt. Als Thermowaage kam ein Gerät der Firma Linseis, Modell STA PT-1750, dargestellt in Abbildung 4-2, zum Einsatz. Dieses Gerät ermöglicht reine TGA Messungen für Proben mit einer Masse von 20 mg bis 25 g bis zu einer Maximaltemperatur von 1750 °C. Die Waage bietet eine Auflösung von 0,5 µg.

Eine Probe des Holzfaserdämmstoffes wurde bei der thermogravimetrischen Analyse linear von 21 °C auf etwa 1000 °C erhitzt. Die Ausgangsmasse der Probe betrug  $m_{HF,0} = 127,08$  mg. Als Heizrate wurde  $\beta = 5$  K/min gewählt, um ein homogenes Temperaturfeld zu erreichen und eine gute Auflösung zu erzielen (siehe Abbildung 4-3). Der Ofenraum wurde mit Stickstoff und einer zugehörigen Strömungsgeschwindigkeit von 220 ml/s gespült.

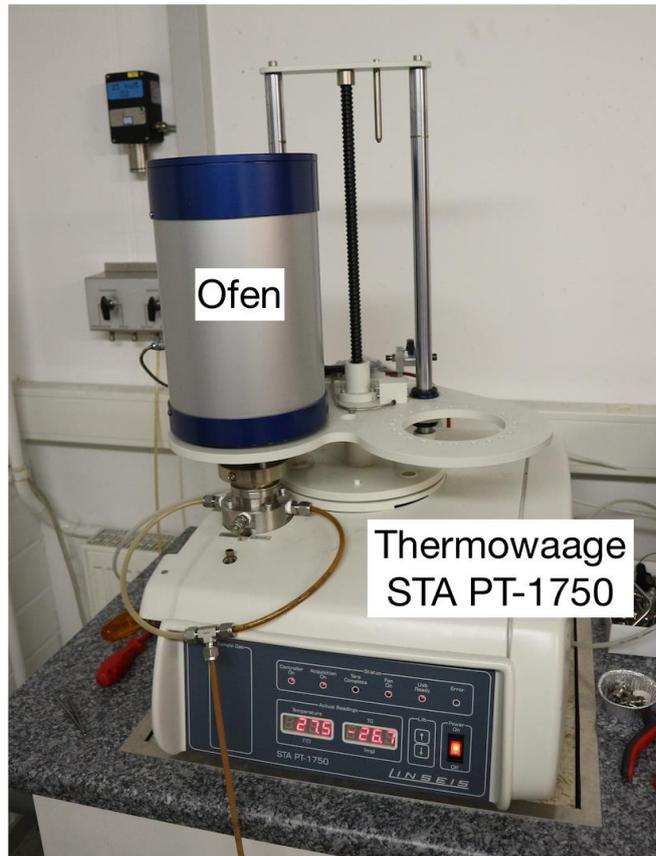


Abbildung 4-2: Thermowaage "Linseis STA PT-1750" [26]

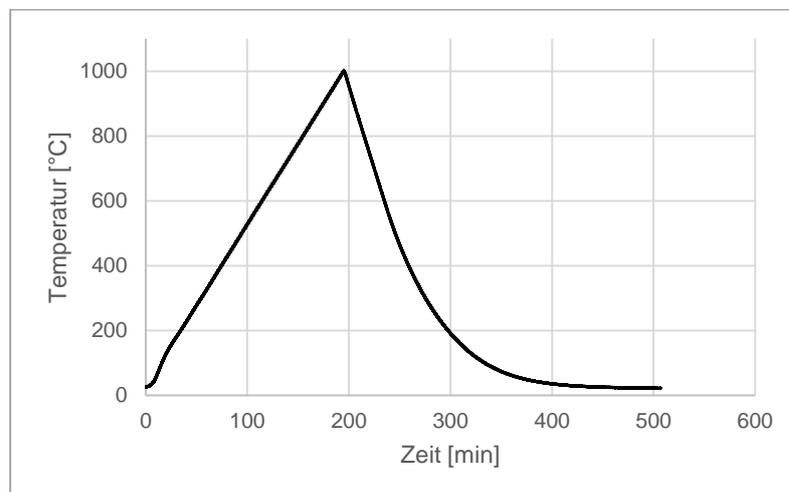


Abbildung 4-3: Temperatur-Zeit-Programm der TGA-Messung, Holzfaser,  $\beta = 5$  K/min

Das Temperaturmaximum wurde nach etwa 195 min erreicht. Im Anschluss erfolgte eine Abkühlung, die nach etwa 500 Minuten beendet war.

Für die Zelluloseflocken wurde eine nahezu identische Messung durchgeführt. Die Probenmasse zu Versuchsbeginn betrug  $m_{z,0} = 57,72$  mg. Die Probe wurde locker in den Tiegel eingebracht. Als Heizrate wurde wiederum  $\beta = 5$  K/min vorgegeben.

Die Temperatur wurde linear von etwa 20 °C bis auf 1200 °C erhöht und der Ofenraum mit 220 ml/s Stickstoff gespült.

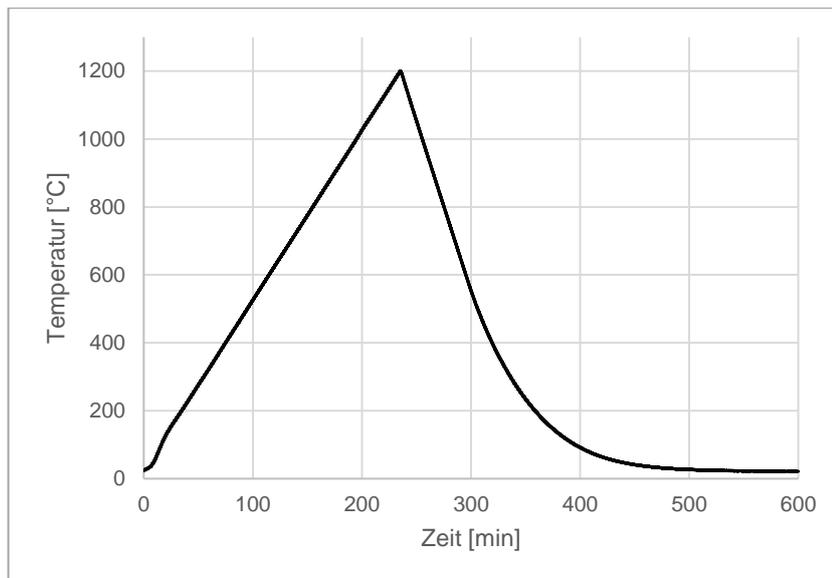


Abbildung 4-4: Temperatur-Zeit-Programm der TGA-Messung; Zelluloseflocken,  $\beta=5$  K/min

Nachdem das Temperaturmaximum bei 235 Minuten erreicht war, wurde die Messung nach erfolgter Abkühlung auf 21,6°C nach etwa 600 min beendet. Das Temperatur-Zeit-Programm ist Abbildung 4-4 zu entnehmen.

## 4.2.3 Ergebnisse

### 4.2.3.1 Holzfaser

In Abbildung 4-5 wird die Änderung der Probenmasse mit Hilfe der TG-Kurve und deren zeitliche Abbildung über die Temperatur dargestellt. Zusätzlich wird deren erste zeitliche Ableitung (Differentialfunktion), die DTG-Kurve, abgebildet. Die DTG-Kurve, deren Wert die Geschwindigkeit der Masseabnahme beschreibt, nähert sich im Laufe der Messung wieder der Nulllinie an, woraus geschlossen werden kann, dass die Pyrolyse zum Zeitpunkt der einsetzenden Abkühlung beendet ist.

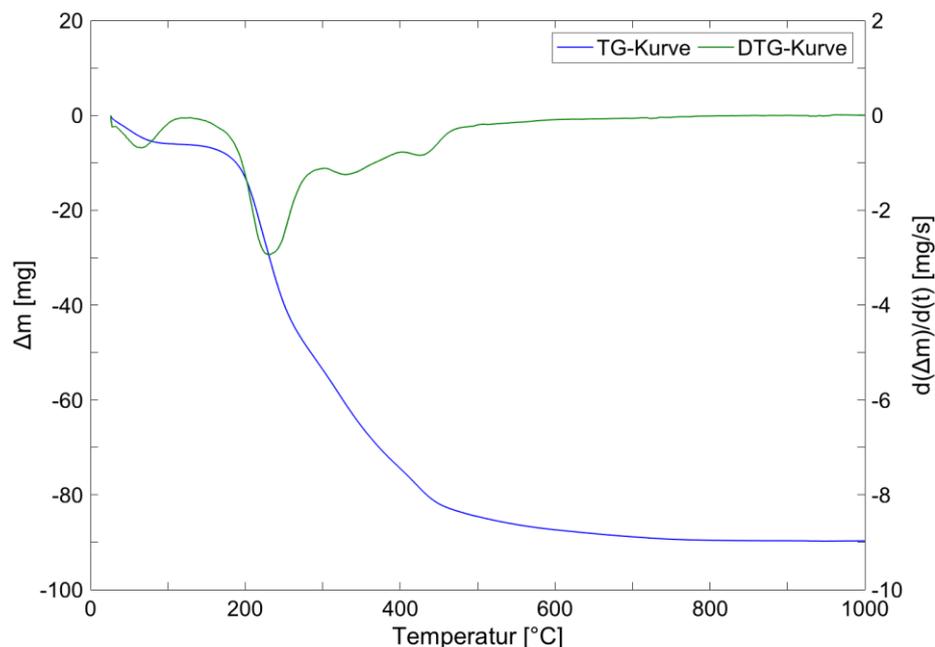


Abbildung 4-5: Holzfaser: TG- und DTG-Kurve der TGA-Messung;  $\beta = 5 \text{ K/min}$  [26]

Im Folgenden wird die TG-Messkurve auf Grundlage der in der DIN 51006 definierten charakteristischen Stufenanfangs- und Endtemperaturen in Bereiche mit unterschiedlichen Pyrolyseraten eingeteilt.

Bei Auswertung der TG-Kurve lassen sich sofort vier Bereiche identifizieren: Auf den ersten Bereich mit bereits deutlichem Masseverlust von Versuchsbeginn bei  $26 \text{ °C}$  bis  $105 \text{ °C}$  folgt ein Plateau ohne signifikante Abnahme der Probenmasse bis etwa  $150 \text{ °C}$ . Im Anschluss folgt von etwa  $150$  bis  $500 \text{ °C}$  der Bereich mit der größten Gewichtsreduktion. Die höchste Reaktionsgeschwindigkeit stellt sich in diesem Abschnitt bei etwa  $230 \text{ °C}$  ein. Ab einer Temperatur von ca.  $500 \text{ °C}$  nimmt die Masse bis Versuchsende nur noch geringfügig ab.

### 4.2.3.2 Zellulose

Die Änderung der Probenmasse und deren zeitliche Abbildung über die Temperatur (TG-Kurve) sowie deren erste zeitliche Ableitung (DTG-Kurve) werden in Abbildung 4-6 veranschaulicht.

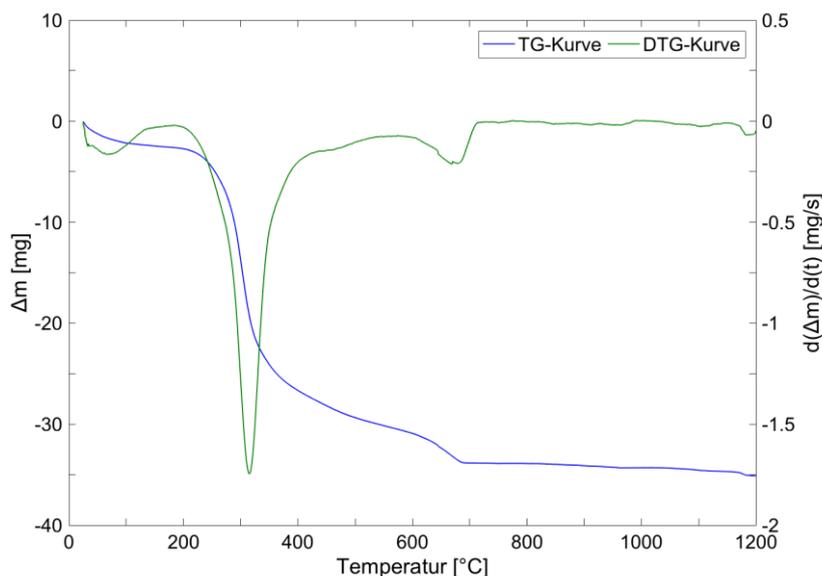


Abbildung 4-6: Zellulose: TG- und DTG-Kurve der TGA-Messung;  $\beta=5$  K/min [26]

Die Betrachtung der DTG-Kurve zeigt, wie bereits bei der Holzfaserdämmung beschrieben, dass sich die Kurve gegen Ende der Messung der Nulllinie annähert. Daher kann von einer abgeschlossenen Pyrolyse zu Beginn der Abkühlphase ausgegangen werden.

Eine Analyse der TG-Kurve ergibt sieben Bereiche mit unterschiedlichen Pyrolyseraten.

Auf den ersten Bereich mit bereits deutlichem Masseverlust von Versuchsbeginn bei 25 °C bis 150 °C folgt ein Plateau ohne signifikante Abnahme der Probenmasse bis etwa 200 °C. Im Anschluss folgt von etwa 200 bis 500 °C der Bereich mit der größten Gewichtsreduktion. Die höchste Reaktionsgeschwindigkeit stellt sich in diesem Abschnitt bei etwa 310 °C ein. Im Temperaturbereich von 500 bis 610°C verlangsamt sich der Masseverlust.

Ein weiterer Temperaturabschnitt mit einer deutlichen Zersetzungsreaktion kann im Bereich zwischen 610 und 715 °C ausgemacht werden. Darauf folgt ein Bereich mit etwas geringerer Massenabnahme. Ab einer Temperatur von ca. 1150 °C nimmt die Masse bis Versuchsende nur noch geringfügig ab.

## 4.3 Hot-Disk-Verfahren

### 4.3.1 Grundlagen

Mit Hilfe der instationären Messverfahren kann die Wärmeleitfähigkeit durch die Erzeugung eines dynamischen, mit der Zeit veränderlichen Temperaturfeldes bestimmt werden.

Mittels elektrischer Impulse wird ein Temperaturfeld erzeugt. Die gesuchten Materialparameter werden durch die Auswertung des Erwärmungs- bzw. Abkühlverhalten des Probekörpers bestimmt. Als Vorteile des instationären Verfahrens sind kurze Messzeiten, geringe Temperaturanstiege und einfache Versuchsanordnungen zu nennen. Nachteilig ist jedoch der zur Auswertung erforderliche erhöhte mathematische Aufwand und der Mehraufwand, der mit der Messung von anisotropen Materialien einhergeht.

Beim sogenannten Transient-Hot-Disk-Verfahren (THD), transientes Flächenquellenverfahren oder auch einfach Hot-Disk-Verfahren genannt wird ein flächiger, kreisrunder Heizstreifen zwischen zwei identische, ausreichend große Probekörper eingelegt, die sich in einer Prüfkammer befinden (siehe Abbildung 4-7).

Mittels festgesetzten Messprogramm muss die Temperatur der Probekörper derartig erhöht werden, dass sich bei jeder Temperaturstufe ein thermisches Gleichgewicht einstellen kann. Nach Erreichen dieses Gleichgewichtszustandes wird wahlweise ein einzelner elektrischer Impuls oder eine Abfolge aufeinander folgender elektrischer Impulse in den Heizstreifen geschickt. Dadurch wird ein dynamisches Temperaturfeld in der Probe erzeugt.

Der Heizstreifen besitzt eine vernachlässigbare Wärmekapazität und einen bekannten Temperaturkoeffizienten des spezifischen elektrischen Widerstandes  $\alpha$ . Eine Temperaturerhöhung des Heizstreifens erfolgt abhängig von den thermischen Eigenschaften der Probe.

Neben seiner Funktion als Heizstreifen, dient er gleichzeitig als Messsensor. Durch die Temperaturerhöhung erfolgt der Anstieg des elektrischen Widerstandes, der über die Zeit aufgetragen wird. Aus diesen Informationen werden mit Hilfe mathematischer Gleichungen die spezifische Wärmekapazität sowie die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit bestimmt. [28]

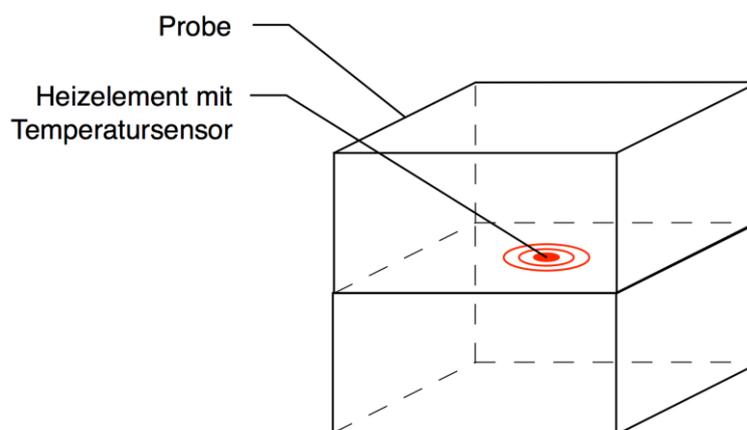


Abbildung 4-7: schematischer Aufbau des Hot-Disk-Verfahrens [29]

Der Sensor weist in der Regel die Form eines Kreises, Streifens oder eines Rechteckes auf. Außerdem ist eine Vielzahl von Materialien und Beschichtungen möglich. Nach Angaben des Herstellers (Hot Disk) erfolgt die Beheizung der Probe über eine Nickelspirale im vorderen Teil des Sensors. Der Durchmesser dieser Spirale ist variabel und kann an den zu untersuchenden Probengeometrien und Materialarten entsprechend gewählt werden. [30]

Der Sensor übernimmt dabei sowohl die Beheizung als auch die Messung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs.

#### **4.3.2 Messprogramm**

Wie bei der thermogravimetrischen Analyse wurden sowohl für die Holzfaserdämmung als auch die Zelluloseflocken Hot-Disk-Messungen im transienten Flächenquellenverfahren nach DIN EN ISO 22007-2 zur Ermittlung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit durchgeführt.

Die Untersuchungen wurden an die C3 Prozess und Analysentechnik GmbH München vergeben und bei der Firma Kagaku Analys AB in Göteborg, Schweden, durchgeführt.

Sowohl bei der Messung für Holzfaserdämmung als auch für die Zelluloseflocken wurde ein Gerät der Firma Hot-Disk, Modell TPS 3500 und ein Sensor aus 4922 Kapton mit einem Radius von 14,9 mm benutzt. Als Messmethode wurde das isotrope Standardverfahren gewählt.

Die Messzeiten betragen zwischen 160 und 320 Sekunden bei einer Heizleistung von 0,025 bis 0,030 Watt. Alle Messungen wurden in Normklima, d.h. bei einer Temperatur von 22 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % durchgeführt.

Die Probe der Holzfasern konnte im Lieferzustand als gepresste Zylinder untersucht werden, zur Analyse der Zelluloseflocken wurde eine Probe mit einer Masse von 14 g in einen zylindrischen Behälter mit einem Radius von 40 mm und einer Höhe von 50 mm eingebracht. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wurde für jede Probe die spezifische Wärmekapazität bei Raumtemperatur ermittelt. Hierfür wurden jeweils 1 g Holzfaserdämmstoff sowie Zelluloseflocken bei einer Heizleistung von 0,103 bis 0,107 Watt kalorimetrisch in einer Goldzelle vermessen. Die Versuche wurden nach dem in Abbildung 4-8 dargestellten Temperatur-Zeit-Programm durchgeführt. Die Temperatur-Plateaus waren vorgegeben und wurden jeweils für eine Zeit von zwei Stunden konstant gehalten, um die Ausbildung eines isothermen Zustandes zu gewährleisten. Die Steigerung von einem Temperaturplateau zum nächsten dauerte 15 Minuten.

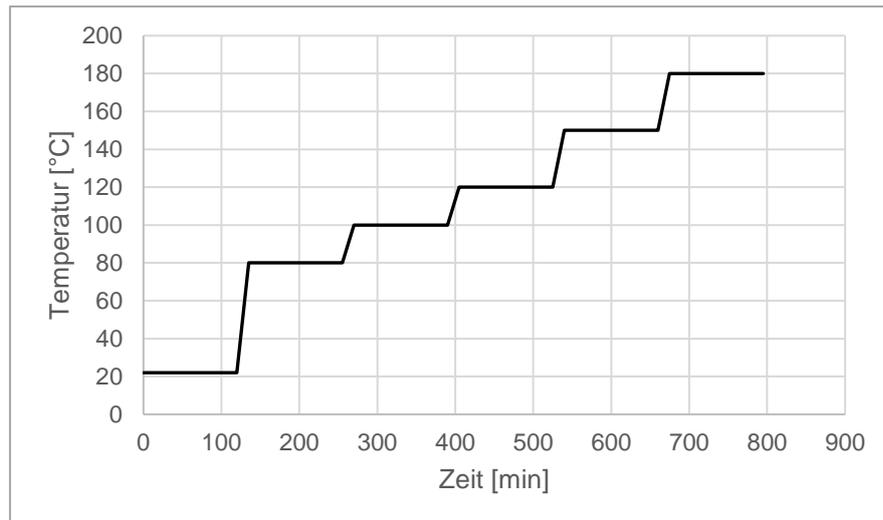


Abbildung 4-8: Temperatur-Zeit-Verlauf für die Hot-Disk Messung

### 4.3.3 Ergebnisse

#### 4.3.3.1 Holzfaser

Da bei der Versuchsdurchführung beider Proben eine Entzündung stattfand, stehen nur begrenzt Daten zur Wärmeleitfähigkeit der beiden Dämmstoffe zur Verfügung. Die Holzfaserprobe begann bei einer Temperatur von 180° zu brennen, weshalb der Versuch abgebrochen wurde. In Abbildung 4-9 sind die Messdaten dargestellt.

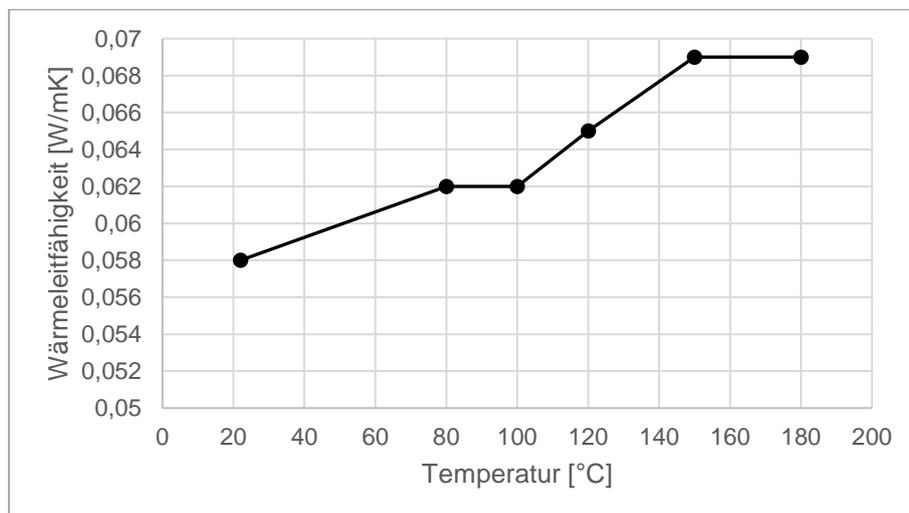


Abbildung 4-9: Wärmeleitfähigkeit der Holzfaserdämmung aus dem Hot-Disk-Verfahren

Die Holzfaserprobe erfuhr im gesamten Messbereich von 22 bis 180 °C eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von  $\Delta \lambda = 0,011 \text{ W}/(\text{m K})$ . Dies führte zu einem Zuwachs von 19% gegenüber einem Startwert bei Raumtemperatur von  $0,058 \text{ W}/(\text{m K})$ .

Vom Dämmstoffhersteller wird eine Wärmeleitfähigkeit unter Raumtemperatur von 0,039 W/(m K) angegeben. Die Differenzen sind auf die unterschiedliche Messmethode zurückzuführen. Die Werte des Herstellers wurden mit Hilfe des 2-Platten-Gerätes (stationäres Verfahren) ermittelt.

Im Zuge der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Hot-Disk-Verfahren wurde auch die temperaturabhängige Temperaturleitfähigkeit der Proben gemessen. Aus den gewonnenen Daten lässt sich rechnerisch die volumenbezogene Wärmespeicherkapazität in MJ/(m<sup>3</sup> K) und mit Kenntnis der Rohdichte auch die massebezogene spezifische Wärmespeicherkapazität in J/(kg K) nach Gleichung Gl. 4-1 bestimmen.

$$c_p = \frac{\lambda}{a \cdot \rho} \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit	$\lambda$ [W/(m K)]	Wärmeleitfähigkeit
	$a$ [mm <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
	$c_p$ [J/(kg K)]	spezifische Wärmespeicherkapazität
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte

Die eingesetzte Rohdichte wurde den Herstellerangaben gegenübergestellt. Für die Holzfaserdämmung ergab sich eine Rohdichte von 52,1 kg/m<sup>3</sup>, was in etwa den Angaben des Herstellers (50 kg/m<sup>3</sup>) entspricht.

In Abbildung sind die Werte der spezifischen Wärmespeicherfähigkeit der Holzfaser bezogen auf die Dichte bei Raumtemperatur  $c_p(\rho(T_0))$  dargestellt.

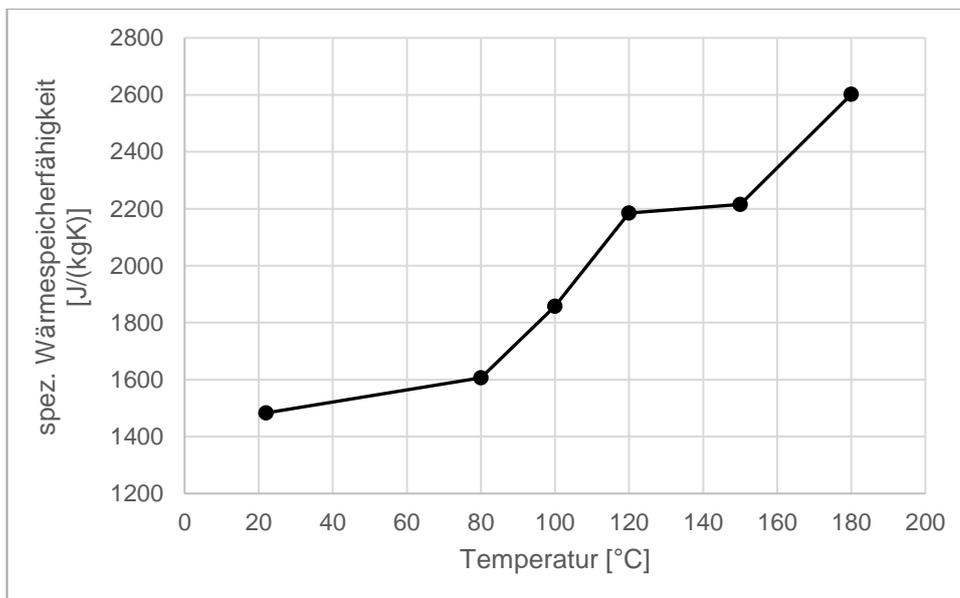


Abbildung 4-10: spez. Wärmespeicherkapazität der Holzfaserdämmung aus dem Hot-Disk-Verfahren

#### 4.3.3.2 Zellulose

Die Zellulosedämmung entzündete sich während des Versuchs zwischen 220 und 250 °C, weshalb Daten zu Temperaturbereichen größer 220°C nicht ermittelt werden konnten.

Anders als bei der Holzfaser- ist bei der Zelluloseprobe eine deutliche Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 0,028 W/(mK) zu erkennen. Dies entspricht einem Zuwachs der Wärmemenge je Meter und Kelvin um 56%. Bei Raumtemperatur besaß die untersuchte Probe eine Wärmeleitfähigkeit von 0,05 W/(mK). Im Verlauf der Temperaturerhöhung nahm sie nahezu linear zu, sodass die Wärmeleitzahl bei 220 °C zu 0,078 W/(mK) bestimmt werden konnte.

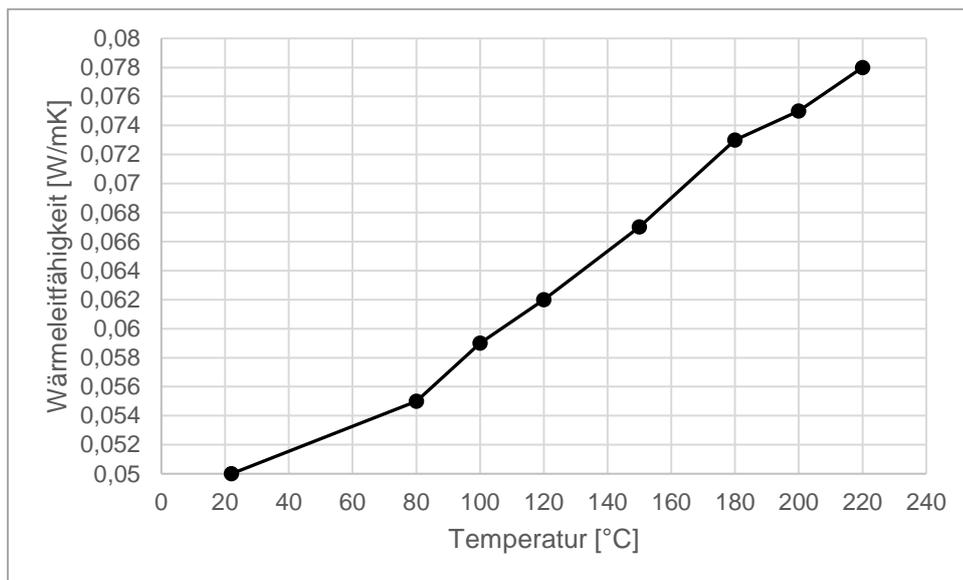


Abbildung 4-11: Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung nach dem Hot-Disk-Verfahren

Aus den gewonnenen Daten lässt sich rechnerisch die volumenbezogene und mit Kenntnis der Rohdichte auch die massebezogene spezifische Wärmespeicherkapazität bestimmen.

In Abhängigkeit der Einbausituation gibt der Hersteller der Zelluloseflocken eine Rohdichte von 27 bis 60 kg/m<sup>3</sup> an. Die aus der Messung errechnete Rohdichte liegt bei 61,1 kg/m<sup>3</sup>.

In Abbildung 4-12 sind die Werte der spezifischen Wärmeleitfähigkeit der Zellulose bezogen auf die Dichte bei Raumtemperatur  $c_p(\rho(T_0))$  dargestellt

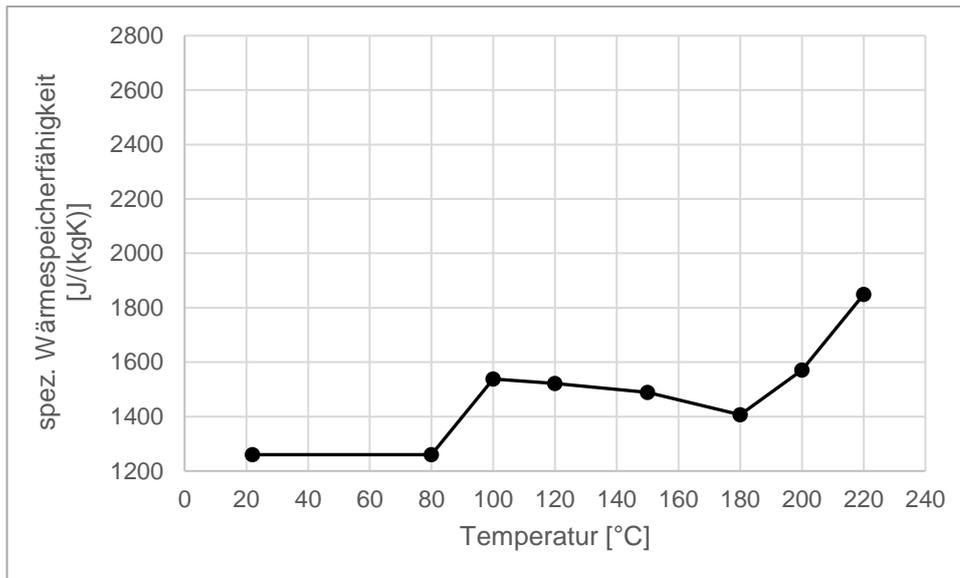


Abbildung 4-12: spez. Wärmespeicherkapazität der Zellulosedämmung nach dem Hot-Disk-Verfahren

Die spezifische Wärmekapazität der Zellulose zeigt im Vergleich zur Holzfaserdämmung keine deutliche Zunahme. Zu Beginn bleibt die spezifische Wärmespeicherkapazität bei 1260 J/(kg K) und steigen zwischen 80°C und 100°C an. Zwischen 100° und 180°C befinden sich die Werte auf nahezu konstantem Niveau zwischen 1400 und 1540 J/(kg K) mit leichtfallender Tendenz. Ab 180 °C findet dann wieder ein Anstieg statt, sodass über den gesamten Messbereich ein Zuwachs von etwa 590 J/(kg K) beobachtet werden kann.

## 4.4 Guarded-Hot-Plate-Verfahren

### 4.4.1 Grundlagen

Bei stationären Messverfahren wird die Wärmeleitfähigkeit mittels eines örtlich eindimensionalen Temperaturfeldes, welches über die Zeit konstant gehalten wird, bestimmt. Um dieses Temperaturfeld zu generieren, werden zwei identische ebene Oberflächen auf unterschiedliche Temperaturen erwärmt und sich gegenübergestellt. Hierdurch stellt sich ein Wärmestrom  $Q$  ein. Aus diesem Wärmestrom, der Temperaturdifferenz zwischen den Probenoberflächen und den bekannten Probenabmessungen, kann anschließend die Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden. [30]

Beim Guarded-Hot-Plate (GHP)-Verfahren kann zwischen der Ausführung als Ein- oder Zweiplattengerät unterschieden werden. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen und zur Realisierung des eindimensionalen Wärmeflusses sind sowohl beim Ein- als auch Zweiplattengerät Schutzheizbereiche, sogenannte „Guards“ angeordnet. Die genaue Anordnung der Guards ist bei beiden Varianten unterschiedlich.

Beim Einplattengerät, dargestellt in Abbildung 4-14, befindet sich der Probekörper zwischen einer elektrischen Heiz- und einer Kühlplatte. Diese beiden Platten werden auf definierte

Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  gebracht. Es stellt sich ein konstantes Temperaturfeld ein. Der die Probe durchfließende Wärmestrom  $Q$ , gerichtet von der wärmeren zur kälteren Platte, wird gemessen. [30, 31]

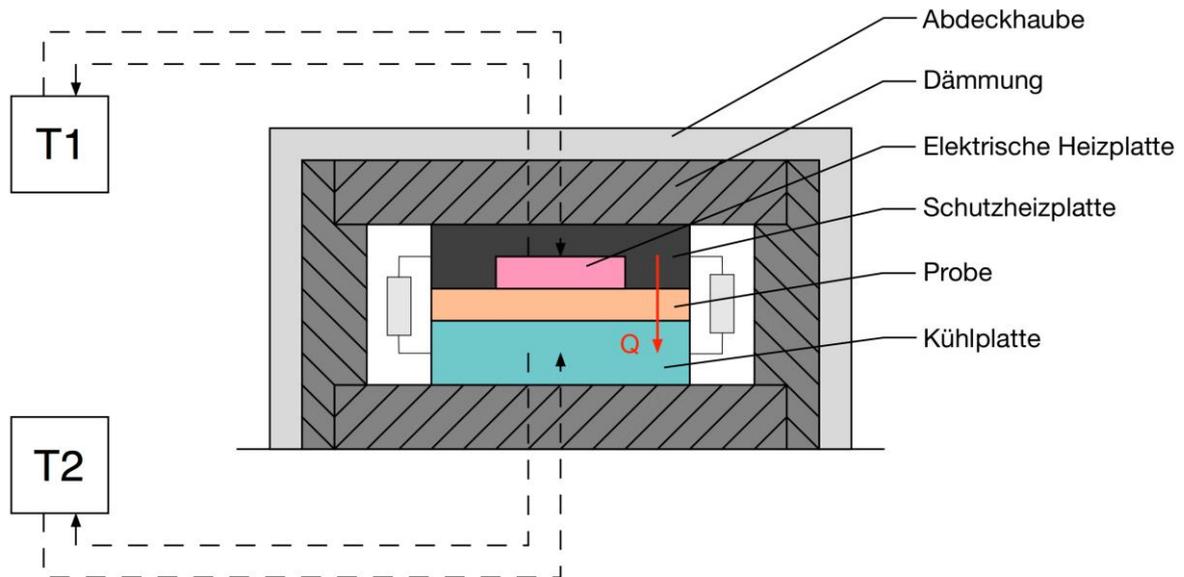


Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Einplattengeräts [30]

Beim Zweiplattengerät, schematisch dargestellt in Abbildung 5-2, befinden sich zwei identische Probekörper ober- und unterhalb jeweils zwischen der elektrischen Heizplatte und einer Kühlplatte, die ebenso wie beim Einplattengerät auf definierte Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  gebracht werden. Der Wärmestrom, der sich aus der zugeführten elektrischen Leistung in die Heizplatte ergibt, teilt sich zu gleichen Teilen auf die beiden Probekörper auf. [30, 32]

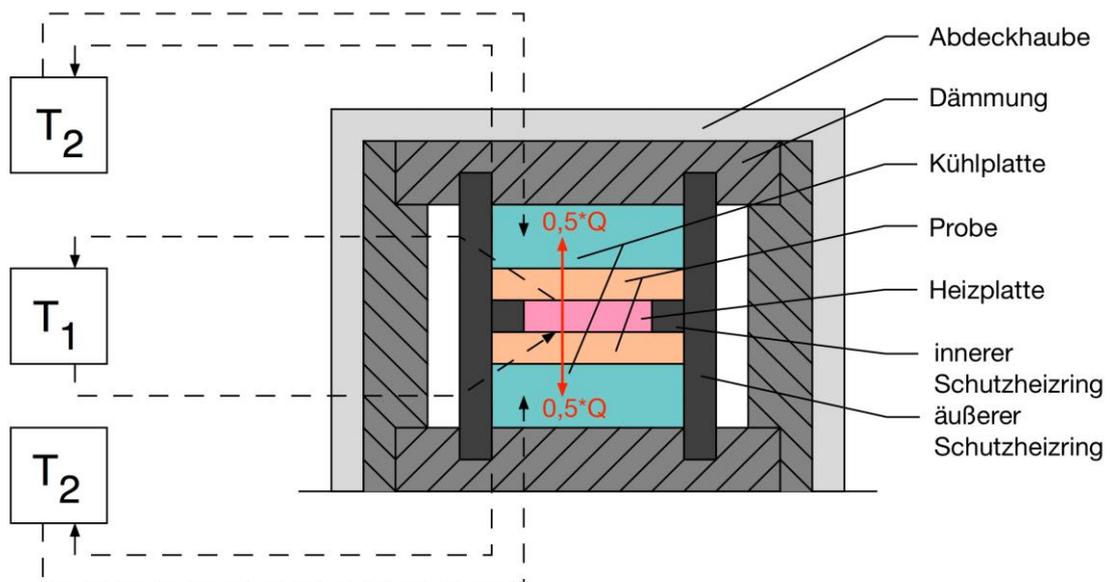


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung des Zweiplattengerätes [30]

Die plattenförmigen Dämmstoffe werden in der Regel so angeordnet, dass der Wärmestrom senkrecht zur Plattenebene stattfindet. Da die Faserstrukturen von faserartigen Dämmstoffen

im Allgemeinen parallel zur Oberfläche verlaufen, findet eine Wärmeleitung senkrecht zur Faser statt. Diese Situation entspricht auch der späteren Wärmebeanspruchung der Dämmstoffplatten nach dem Einbau.

Die Lage der Fasern zueinander kann jedoch nicht vernachlässigt werden, da bei dem Extremfall der parallel verlaufenden Fasern ein erhöhter Wärmetransport, bedingt durch eine flächenmäßig größere Wärmebrücke als bei einer punktuellen Kontaktstelle, stattfindet. Diese beiden Extremfälle sind in Abbildung 4-15 dargestellt. Bei der sich kreuzenden Anordnung (links) entsteht eine punktförmige Wärmebrücke, liegen die Fasern parallel zueinander (rechts) ist diese linienförmig. Die Kontaktfläche der parallelen Anordnung ist erkennbar größer, daher erfolgt eine höhere Wärmeleitung. [33]



Abbildung 4-15: mögliche Anordnungen der Wärmebrücken zwischen Holzfasern innerhalb eines Dämmstoffes nach Kollmann & Malmquist [33]

Betrachtet man die Oberflächenstruktur einer Holzfaserdämmplatte, ist im Allgemeinen keine einheitliche Richtung des Faserverlaufes erkennbar. Das ist auch von den Herstellern angestrebt, die somit eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit realisieren möchten.

Diese Vereinfachung ermöglicht eine zweidimensionale Betrachtung senkrecht beziehungsweise parallel zur Plattenebene. Wird parallel zur Faser gemessen, ist der Wärmetransport im Material in Messrichtung deutlich größer. Daraus ergeben sich deutlich höhere Werte der Wärmeleitfähigkeit.

Das Guarded-Hot-Plate-Verfahren ist daher grundsätzlich zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit faserartigen Dämmstoffe geeignet, da in der Regel eine Betrachtung senkrecht zur Faserebene erfolgt. Sollen Aussagen über die Wärmeleitung parallel dazu getroffen werden, ist eine zusätzliche Messung nötig.

#### 4.4.2 Messprogramm

Tabelle 4-1: Messprogramm der Guarded-Hot-Plate-Versuche

Messpunkt	Wärme- strom	Temperatur an der		Temperatur- differenz an der Probe	Mittelwert Temperatur	Wärmeleit-fähig- keit
		warmen	kalten			
		Probenoberflä- che				
	[W]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[W/(m K)]
Holzweichfaserdämmung						
1	3,5	80,2	42,4	37,8	61,3	0,0451
2	4,83	120,4	73	47,4	96,7	0,0515
3	5,99	150,1	99,6	50,5	124,85	0,0561
Zellulose						
1	3,23	78,3	42,5	35,8	60,4	0,0443
2	4,49	120,5	71,1	49,4	95,8	0,0478
3	5,36	150	99,5	50,5	124,75	0,0519

#### 4.4.3 Ergebnisse

Nachfolgende Abbildung 4-16 stellt die messtechnisch ermittelten Wärmeleitfähigkeiten für die Holzfaser- und Zellulosedämmung für die betrachteten Temperaturstufen dar.

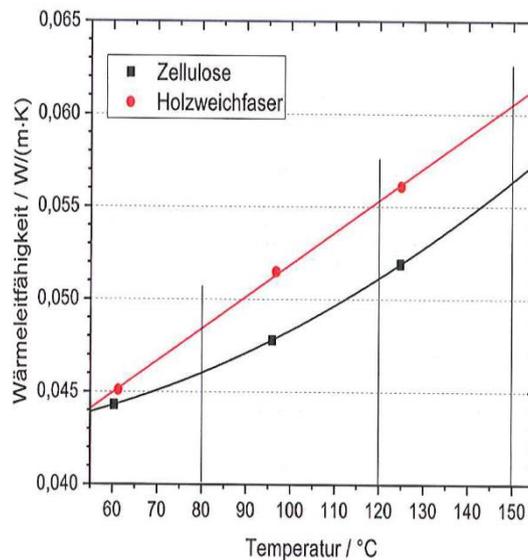


Abbildung 4-16: Werte der Wärmeleitfähigkeit der Holzfaser und Zellulosedämmung über der Temperatur nach einer Konditionierung bei den jeweiligen Warmseitentemperaturen [34]

## 5 Sammlung und Auswertung von Großbrandversuchen

### 5.1 Allgemeines

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden über Forschungsberichte sowie verschiedene Hersteller von biogenen Dämmstoffen Prüfberichte von Klein- sowie Großbrandversuchen gesammelt und in einer Database zusammengestellt.

Ziel dieser Sammlung war es, auf bestehende Versuchskonstellationen zur Validierung der entwickelten Verfahren zurückgreifen zu können.

Zu folgenden Punkten wurden Informationen, soweit diese aus den Prüfberichten erkenntlich waren zusammengetragen:

- Ausrichtung des geprüften Elements (Wand oder Decke)
- Beanspruchung
  - o Art der Beflammung (ein-/zweiseitig)
  - o Mechanische Belastung
  - o Beanspruchungsdauer
  - o Art der Brandbeanspruchung (Normbrand-/Naturbrandkurve)
- Versagen
  - o Zeitpunkt
  - o Art (R/E/I)
  - o Vorzeitiger Abbruch
- Abmessung des Probekörpers
  - o Maßstab (Real-/Kleinmaßstab)
  - o Abmessungen des Versuchskörpers
  - o Anzahl der Gefache
- Aufbau der Schichten vor bzw. hinter der Rahmenkonstruktion
  - o Art der Schicht (Bekleidung, Installationsebene, hinterlüftete Ebene, etc.)
  - o Art des Produktes
  - o jeweilige Dicke
  - o Rohdichte
  - o Art der Unterkonstruktion
  - o Anmerkung zu z.B. Fugenausbildung, Befestigungsmitteln etc.
- Brandverlauf hinterhalb der jeweiligen Schicht
  - o Start der Verkohlung
  - o Versagen der Schicht
  - o zeitabhängiger Temperaturverlauf hinterhalb der Schicht
- Informationen zur tragenden Struktur
  - o Material der Balken/Ständer
  - o Querschnittsprofil (Rechteck-/I-/C-Profil etc.)
  - o Abmessungen
  - o Achsabstand
- Informationen zur Gefachdämmung
  - o Typ
  - o Rohdichte
  - o Dicke

- Haltevorrichtungen
- Brandverlauf hinterhalb der Dämmung
  - Start der Verkohlung
  - Versagen der Schicht
  - zeitabhängiger Temperaturverlauf hinterhalb der Schicht
  - Temperaturverlauf am Ständer/Balken
- Zusätzliche Beobachtungen wie Abfallen, Abtropfen etc.

Die Information wurden innerhalb der Datenbank zusammengefasst. Nachstehend wurden die vorhandenen Versuche hinsichtlich der wichtigsten Parameter ausgewertet.

## 5.2 Auswertung der vorhandenen Daten

Im Gesamten wurden in der Database 133 verschiedene Versuche zusammengestellt. Die Angaben in den nachfolgenden Darstellungen beziehen sich grundsätzlich auf die Gesamtanzahl der Datenbank.

Den Hauptanteil bilden Wandelemente, gefolgt von Deckenelementen.

Gut die Hälfte der Prüfkörper wurde unter Belastung geprüft, in den restlichen Versuchen wurde ausschließlich der Raumabschluss beurteilt:

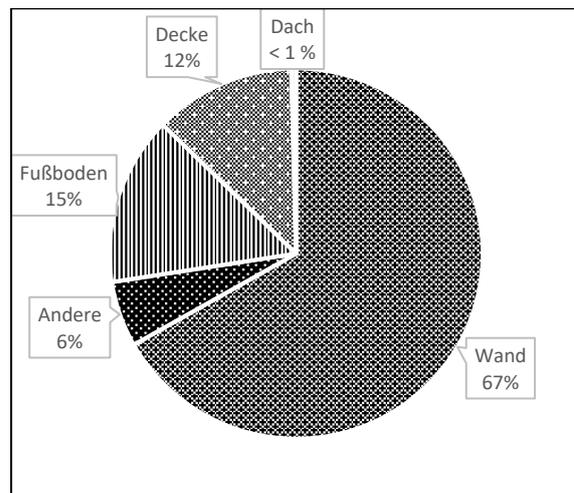


Abbildung 5-1: Art des Probekörpers

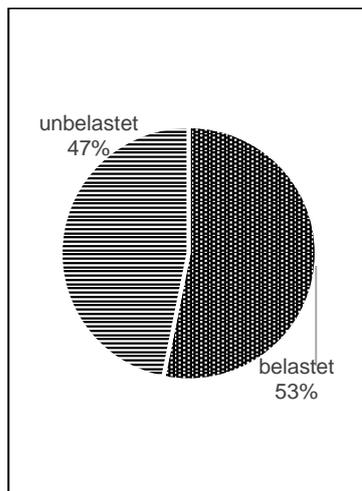


Abbildung 5-2: Ausführung der Belastung des Prüfkörpers

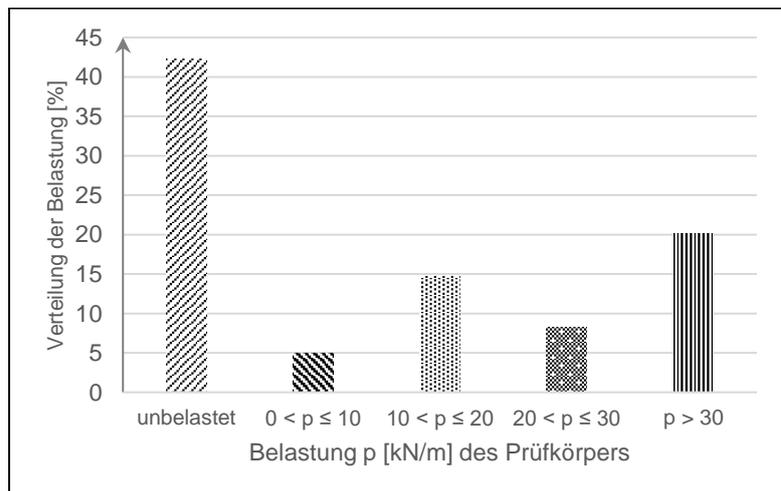


Abbildung 5-3: Art der Belastung für wandartige Prüfkörper

Hinsichtlich der Versagensarten lassen sich die Versuche in Raumabschluss (EI) und Tragfähigkeit (R) unterteilen. Nachfolgende Abbildung zeigt die Anzahl der verschiedenen Versagensarten. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass ein Versuch gleichzeitig auf mehrere Arten versagen kann. Zu erkennen ist, dass sowohl für die Versagenskriterien des Raumabschlusses als auch der Tragfähigkeit Versuche vorhanden sind. Je nach Versagensart und verwendeter Materialien, lassen sich diese zur Validierung der innerhalb diesen Forschungsprojektes entwickelten Gleichungen verwenden.

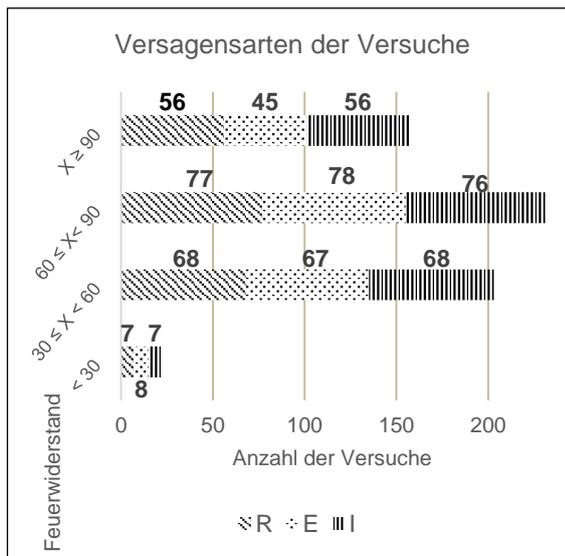


Abbildung 5-4: Verteilung der Feuerwiderstandsdauern der Versuche

Nachfolgende Diagramme stellen dar, welche Arten von Bekleidungen bei den zusammengestellten Prüfberichten geprüft wurden. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die Kombination aus mehreren verschiedenen Bekleidungs-schichten bestehen kann und deshalb auch mehrere Bekleidungen pro Prüfbericht zutreffend sein können.

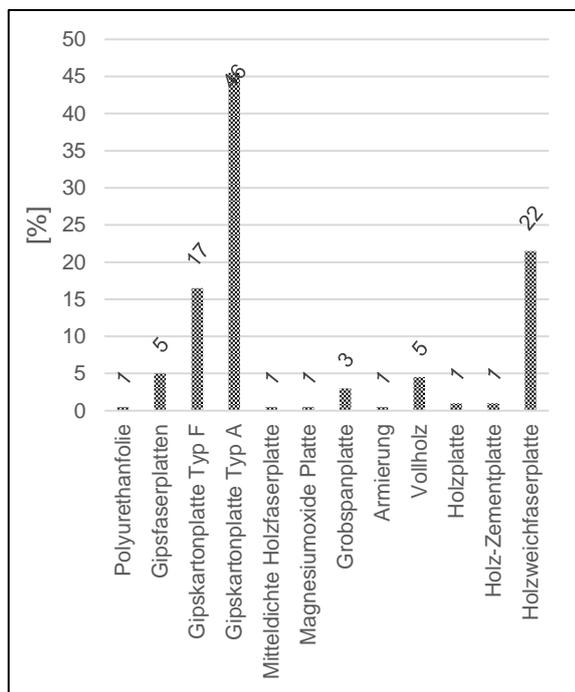


Abbildung 5-5: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Bekleidungen auf der feuerzugewandten Seite

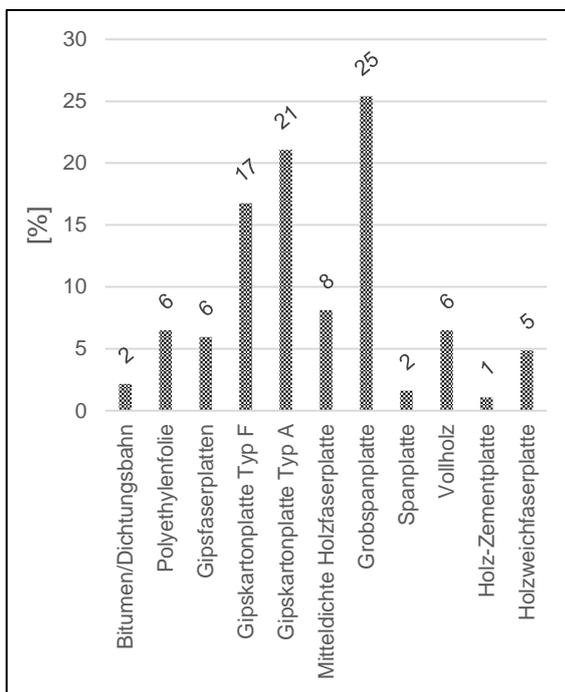


Abbildung 5-6: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Bekleidungen auf der feuerzugewandten Seite

Zudem wird nachfolgend der prozentuale Anteil an Konstruktionen mit Hinterlüftung jeweils auf der feuerzu- bzw. abgewandten Seite dargestellt.

Hinsichtlich der Ausbildung der tragenden Querschnitte sowie der Art der verbauten Gefachdämmung geben die folgenden Diagramme Einblick. In die Database wurden auch Prüfberichte mit aufgenommen, welche keine biogenen Dämmstoffe als Gefachdämmstoffe haben, da so ein Vergleich zwischen biogenen und mineralischen Baustoffen hinsichtlich des Raumabschlusses und der Tragfähigkeit gezogen werden konnte.

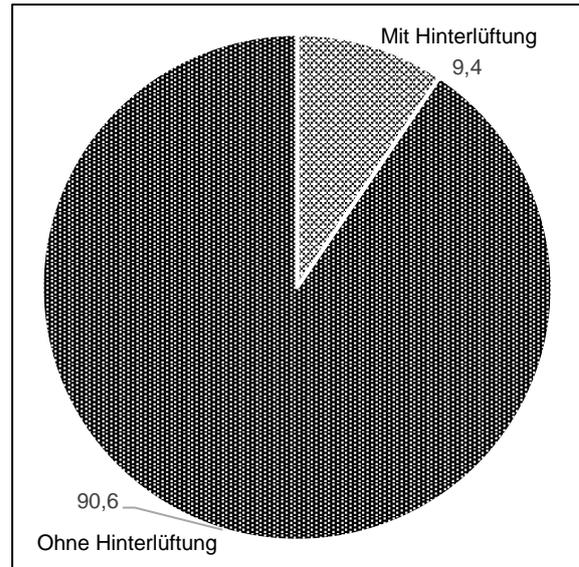


Abbildung 5-7: Prozentualer Anteil der Probekörper mit einer Hinterlüftung an der feuerzugewandten Seite

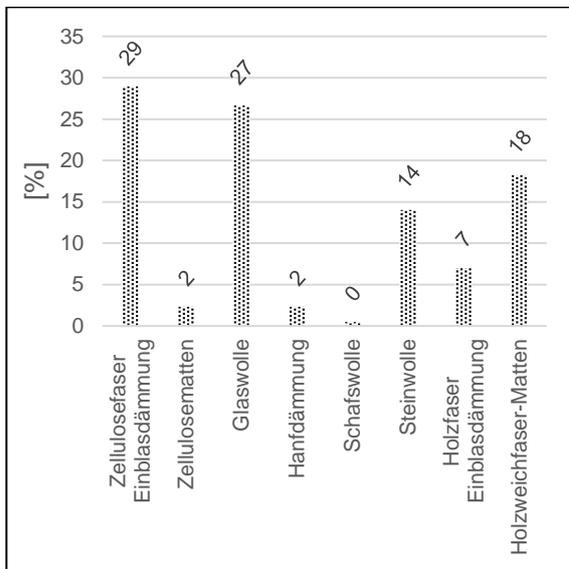


Abbildung 5-8: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Zwischendämmungen

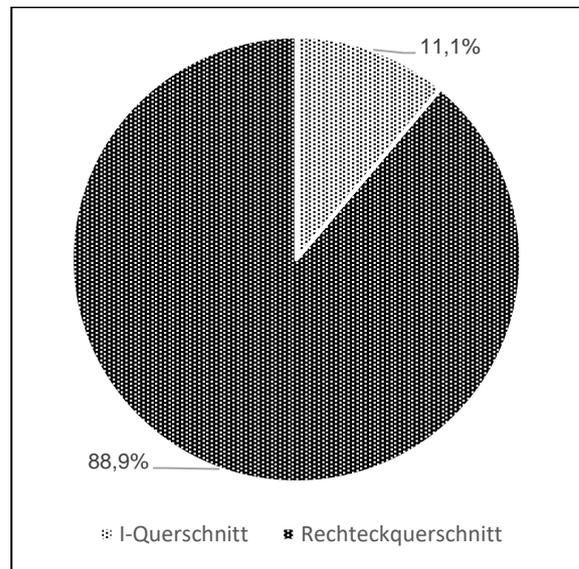


Abbildung 5-9: Prozentuale Verteilung der Querschnittsprofile

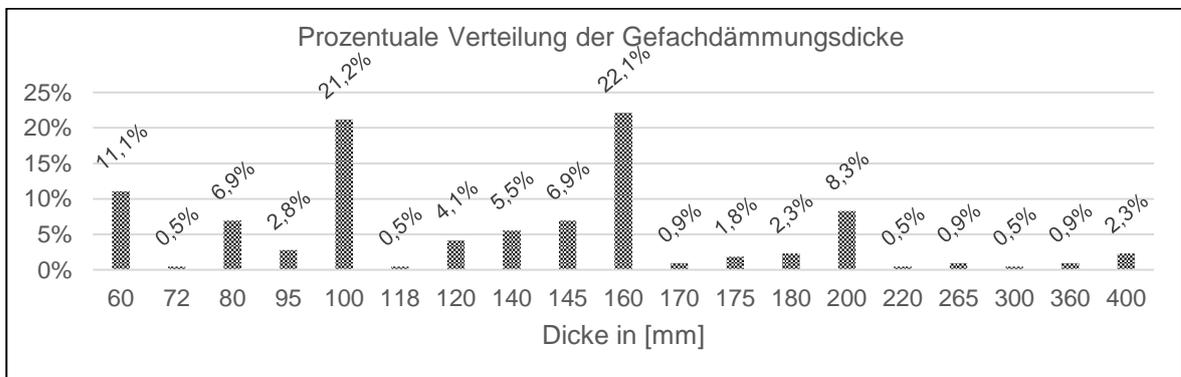


Abbildung 5-10: Prozentuale Verteilung der Dicke der Gefachdämmung

## 6 Numerische Bauteiluntersuchungen

### 6.1 Wärmetransportvorgänge

Auf das Brandverhalten und Durchwärmungsverhalten eines Materials haben die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmespeicherkapazität und die Rohdichte zusammen mit verschiedenen chemisch-physikalischen Prozessen einen maßgeblichen Einfluss. Um ein realitätsnahes Verhalten der Holzfaserdämmplatte und der Zellulose bei Brandbeanspruchung in einem Finite-Elemente-Modell nachbilden zu können, wird die Wärmeleitung mithilfe der Fourier-Gleichung Gl. 6-1 [35] ohne innere Wärmequellen oder –senken, die durch den Pyrolyseprozess sowie Feuchteveränderungen im Bauteil entstehen, simuliert.

$$c_p(\vartheta) \cdot \rho(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda_x(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda_y(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda_z(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) \quad \text{Gl. 6-1}$$

mit	$c_p(\vartheta)$ [J/(kg K)]	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität
	$\rho(\vartheta)$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperaturabhängige Rohdichte
	$\lambda(\vartheta)$ [W/(m K)]	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit in x-,y- oder z-Richtung
	$\partial \vartheta$ [-]	Temperaturgradient
	t [s]	Zeit
	x, y, z [-]	Weg in Richtung der Koordinatenachse

Diese Gleichung bezieht keine chemisch-physikalischen Vorgänge im betrachteten Material unter Brandbeanspruchung ein. Dadurch wird der Massetransport von Wasserdampf und brennenden Gasen, die Pyrolyse sowie Risse nicht spezifisch in der Berechnung betrachtet. Um diese Effekte trotzdem nicht unberücksichtigt zu lassen, werden die Werte für die spezifische Wärmespeicherkapazität, die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit zu effektiven Kenngrößen verändert [36] Dabei ist es wichtig, die angepassten effektiven Materialkennwerte nicht mit den gemessenen Werten aus Versuchen zu verwechseln, da deutliche Unterschiede auftreten.

## 6.2 Eingangsdaten für die numerische Simulation

### 6.2.1 Verwendetes Simulationsmodell

Um den Temperaturverlauf durch ein Bauteil unter Brandbeanspruchung nachbilden zu können, wird ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) in der Simulationssoftware ANSYS generiert. Das Modell bildet Dämmschichten, Bekleidungen als zweidimensionale Elemente des Typs PLANE55 ab. Fugen werden nicht anhand vom FE-Modell untersucht, sondern auf Grundlage von Versuchen oder nach DIN EN 1995-1-2 [37] beurteilt.

Die Brandeinwirkung wird durch die Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1991-1-2 und die Brandquelle anhand eines Umgebungsknotens auf der brandzugewandten Seite des Bauteils simuliert.

Auf der brandabgewandten Seite wird ebenfalls ein Umgebungsknoten generiert, der die Raumtemperatur von 20 °C abbildet. Der Wärmeaustausch durch Konvektion und Strahlung zwischen den Außenlinien des Modells und den Umgebungsknoten wird durch das Oberflächenelement SURF151 idealisiert. Das entstehende FE-Modell mit den jeweiligen Elementtypen ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

Die Beiwerte, die zur Berechnung der Temperaturen durch das und am Bauteil infolge Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmeströmung notwendig sind, entsprechen dem FE-Modell von Schleifer [1]. Dabei werden an den jeweiligen Umgebungsknoten als Wärmeübergangskoeffizient gemäß DIN EN 1991-1-2 [38] auf der feuerzugewandten Seite für alle Materialien  $\alpha_{\text{exp}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  und auf der feuerabgewandten Seite  $\alpha_{\text{unexp}} = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$  verwendet. Als Emissionskoeffizient wurde den Umgebungsknoten gemäß Schleifer auf beiden Seiten  $\varepsilon = 0,8$  zugewiesen.

Die temperaturabhängigen Materialkennwerte der einzelnen Schichten des Modells sind entscheidende Größen für die Temperaturberechnungen. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmespeicherkapazität und der Masseverlust für OSB-Platten, Massivholz-, Span-, Gips- und Gipsfaserplatten sowie für Stein- und Glaswolle werden der Dissertation von Schleifer [1] übernommen. Für Holzfaserdämmungen und Zellulose werden auf Basis der in Kapitel 6.2.2 versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerte effektive Materialkennwerte ermittelt, um Vorgänge wie den Massetransport von Wasserdampf und brennenden Gasen, die Pyrolyse sowie Risse im Material berücksichtigen zu können. Das Ergebnis stellt ein Finite-Elemente-Modell als Idealisierung eines Bauteilquerschnitts dar, mit dem der zeitabhängige Temperaturverlauf im brandbeanspruchten Bauteil berechnet werden kann. Das FE-Modell wurde verifiziert, indem die berechneten Temperaturen mit Messergebnissen aus Brandversuchen verglichen wurden. Das überprüfte Modell dient zusammen mit

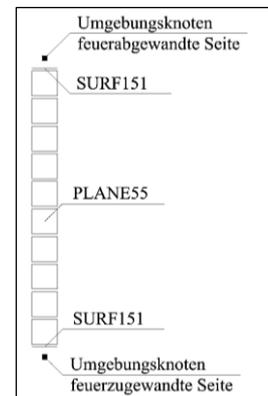


Abbildung 6-1: FE-Modell nach Schleifer [1]

den definierten Beiwerten und Materialkenngrößen als Grundlage für die Herleitung der Berechnungsgleichungen des analytischen Nachweisverfahrens zum Raumabschluss.

## 6.2.2 Effektive Materialkennwerte

### 6.2.2.1 Bestimmung effektiver Materialkennwerte

Zur Ermittlung der effektiven temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmespeicherkapazität und des Masseverlusts von Holzfaserdämmplatten und Zellulose unter Brandbeanspruchung werden Brandversuche aus Kapitel 3.3.2 mit den Ergebnissen einer numerischen Simulation verglichen. Hierfür wurden Versuche ausgewählt, in welchen das Abfallen der Dämmung durch konstruktive Maßnahmen verhindert wurde. Die Versuchsaufbauten bestehen auf der brandzugewandten Seite aus dem zu untersuchenden Dämmstoff variierender Dicke hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte. Das FE-Modell hingegen besteht aus dem gleichen Schichtenaufbau, wie es das Bauteil des Brandversuchs aufweist. Die Materialkennwerte der verwendeten Spanplatte werden bereits durch Schleifer [1] definiert. Für die Holzfaserdämmung sowie die Zellulose werden die Ausgangswerte aus Kapitel 4 für die temperaturabhängigen effektiven Materialkenngrößen herangezogen. Sie stellen einen Startpunkt für die zu ermittelnden effektiven Werte dar. Mit Hilfe eines Programmcodes in MATLAB nach Maeger [39]- wird eine Annäherung der berechneten Simulationstemperaturen aus dem FE-Modell durch Anpassung der eingehenden Materialkennwerte an die Temperaturen des Brandversuchs erzielt. Wenn die beiden Temperatur-Zeit-Kurven aus dem Versuch und der FE-Simulation übereinstimmen oder kaum voneinander abweichen, dann entsprechen die mit Hilfe von MATLAB in die Simulation eingesetzten Materialkenngrößen den gesuchten effektiven Materialkennwerten für Holzfaserdämmstoffe oder Zellulose.

Zur Anpassung der Temperatur-Zeit-Kurven wurden zunächst nur die Ausgangswerte der Wärmeleitfähigkeit verändert. Die Auswirkungen der veränderten temperaturabhängigen Wärmeleitkoeffizienten auf den resultierenden Temperaturverlauf im brandbeanspruchten Bauteil sind dadurch klar erkennbar und vermischen sich nicht durch eine zusätzliche Modifizierung der spezifischen Wärmespeicherkapazität oder des Masseverlustes. Diese Materialkenngrößen entsprechen somit durchgehend den jeweiligen Ausgangswerten aus der experimentellen Untersuchung gemäß Kapitel 3.3.2.

Zur Angleichung der beiden Kurven wird mittels eines Befehls des MATLAB-Codes die Software ANSYS angesteuert und der Temperaturverlauf im Bauteil unter Brandbeanspruchung berechnet. Dabei werden die Ausgangswerte der thermischen Materialkennwerte für das zu untersuchende Material verwendet. Die resultierenden Temperaturergebnisse werden in MATLAB eingelesen und als Ausgangstemperaturen gespeichert.

Anschließend werden die Temperaturen in 5 Sekunden-Schritten aus den Brandversuchen aus der entsprechenden Excel-Datei in MATLAB übertragen. Um die anfänglichen Unterschiede zwischen den berechneten Temperaturen der Simulation in ANSYS und den Versuchsmessungen darzustellen, wird ein Diagramm generiert, in welchem beide Temperatur-Zeit-Verläufe dargestellt werden. Damit die Versuchs- und Simulationsverläufe verglichen werden können, ist zu beachten, dass die Temperaturen an derselben Stelle im Querschnitt berechnet beziehungsweise gemessen sind. Die maßgebende Messstelle der Temperatur ist dabei der Übergangspunkt zwischen betrachteten Material und Spanplatte.

Um die Qualität der Ausgangssituation mit den späteren Anpassungen vergleichen zu können, wird in MATLAB die  $R^2$ -Methode angewandt. Dafür werden die einzelnen Punkte der zeitabhängigen Temperaturergebnisse der ANSYS-Kurve relevant. Durch jeden Punkt der Kurve werden zwei Vektoren erzeugt, die im  $45^\circ$ - und  $135^\circ$ -Winkel zur x-Achse stehen. Anschließend lässt sich der Schnittpunkt der Vektoren mit der Kurve der Versuchsergebnisse ermitteln und die Länge des Vektors vom Punkt der ANSYS-

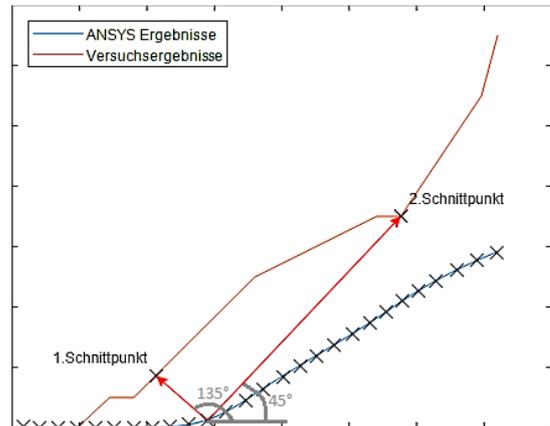


Abbildung 6-2: Generierung zweier Vektoren im  $45^\circ$ - und  $135^\circ$ -Winkel durch einen Punkt der ANSYS-Kurve

Simulationenkurve bis zum Schnittpunkt berechnen. Die Vektorlänge beschreibt den Abstand zwischen den beiden Kurven. Der kleinere Abstand  $R$  der beiden Vektoren eines jeden Punktes wird quadriert, wodurch man den Wert  $R^2$  für jeden Punkt der simulationstechnisch ermittelten Kurve erhält. Diese Werte werden als Anfangsabstände gespeichert und dessen Summe durch Addition der  $R^2$ -Werte aller Punkte einer Kurve erfasst. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6-2 beispielhafte Punkte entlang einer ANSYS-Ergebniskurve eingezeichnet und an einem Punkt die beiden Vektoren und deren Schnittpunkte dargestellt.

In diesem Beispiel ist die Länge des Vektors, der durch den ersten Schnittpunkt verläuft, kürzer als die zweite Vektorlänge und wird daher als Abstand  $R$  definiert und anschließend quadriert. Nun werden mittels dreier Programmschleifen in MATLAB die jeweilige Versuchs- und Simulationskurve aneinander angenähert.

Für die erste Näherung der ANSYS-Kurve an die Versuchsmessungen wird der APDL-Code in MATLAB eingelesen. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Materials wird aus dem Code herausgefiltert und gespeichert, wobei die Werte nach aufsteigender Temperatur geordnet sind. In der ersten Iteration der Anpassungsschleife wird der Wärmeleitkoeffizient der niedrigsten Temperatur betrachtet und um  $+100\%$  geändert. Dieser verdoppelte Wert ersetzt die entsprechende Ausgangsgröße im Code. Die ANSYS-Software wird aufgerufen und die Simulation läuft mit dem ausgetauschten Koeffizienten ab, wodurch

sich ein veränderter zeitabhängiger Temperaturverlauf im Bauteil ergibt. Nun soll bewertet werden, ob aus der Verdopplung des ersten Ausgangswertes eine Annäherung des Temperaturverlaufs an die Versuchskurve resultiert. Die Qualität der Anpassung der beiden Kurven wird erneut mithilfe der  $R^2$ -Methode abgeschätzt, wobei die beiden Vektoren durch jeden Punkt der ANSYS-Ergebniskurve generiert und die maßgebenden quadrierten Abstände berechnet werden. Die Summe über alle  $R^2$ -Werte wird gespeichert. Im Folgenden wird der anfängliche Wärmeleitkoeffizient iterativ um +80%, +60%, +40%, +20%, -20%, -40%, -60% und -80% geändert. Die Temperaturberechnung in ANSYS, die Bestimmung der  $R^2$ -Werte und das Berechnen der Summe laufen für jede Iteration erneut ab. Im Anschluss daran wird der minimale Wert der verschiedenen Summen ermittelt, wobei die Summe der Ausgangssituation ebenso zur Auswahl steht. Durch das Herausfiltern der minimalen Summe der quadrierten Abstände wird die beste Anpassung der ANSYS-Ergebniskurve an den Versuchsgraphen ermittelt. Der zugehörige Wärmeleitkoeffizient wird in den ANSYS-Code eingefügt und gespeichert.

Nun werden erneut die Werte der Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Materials aus dem veränderten ANSYS-Code herausgelesen. Der erste Wärmeleitkoeffizient an der niedrigsten Temperatur ist bereits überprüft. Infolgedessen wird der zweite Wert der Reihe betrachtet und analog zu dem eben beschriebenen Verfahren nacheinander in 20%-Schritten geändert. Die beste Anpassung wird ebenfalls mit der geringsten Summe der  $R^2$ -Werte ermittelt und der betrachtete Koeffizient im ANSYS-Code ausgetauscht. Dabei wird auch die vorher ermittelte minimale Summe einbezogen, bei dessen Werten nur der erste Wärmeleitkoeffizient verändert ist.

Die restlichen Größen der Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Materials werden entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise nacheinander angepasst. Zuletzt befindet sich für jeden Temperaturpunkt der Wert der Wärmeleitfähigkeit für das betrachtete Material im ANSYS-Code, der zu der besten Anpassung des Temperaturverlaufs an die Versuchsmessungen führt.

Die zweite Programmschleife für die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Materials verläuft ähnlich zu der ersten Anpassung. Zunächst werden die Wärmeleitkoeffizienten aus dem APDL-Code ermittelt und in MATLAB eingelesen. Hier handelt es sich um die Koeffizienten, die mithilfe der ersten Schleife bereits verändert sind. Nun wird der erste Wärmeleitkoeffizient ausgewählt und um +50% verändert. Dieser neue Wert wird in den ANSYS-Code eingefügt und der Temperaturverlauf zwischen betrachtetem Material und Spanplatte berechnet. Die ermittelten Temperaturergebnisse werden an MATLAB zurückgegeben und mithilfe der Vektoren im  $45^\circ$ - und  $135^\circ$ -Winkel ermittelt sich der minimale Abstand  $R$  zwischen einem Punkt der Simulationskurve und der Kurve der Versuchsergebnisse. Die

Summe über den  $R^2$ - Wert eines jeden Punktes der ANSYS- Kurve wird gespeichert. Daraufhin wird der anfänglich betrachtete Wärmeleitkoeffizient um +40% verändert, woraufhin der beschriebene Vorgang erneut abläuft. Im Folgenden ändert sich der Wert um +30%, +20%, +10%, -10%, -20%, -30%, -40% und um -50% und die jeweilige Summe der quadrierten Kurvenabstände wird berechnet. Die erfassten Summenwerte werden miteinander verglichen, wobei auch die Summe nach der ersten Anpassungsschleife zur Auswahl steht. Die minimale Summe wird ermittelt und der zugehörige Wärmeleitkoeffizient als neuer Wert in den Code eingefügt. Analog zu diesem Vorgehen werden die restlichen Werte der Wärmeleitfähigkeit verändert und ebenfalls iterativ im ANSYS-Code ausgetauscht.

Die dritte Annäherung der ANSYS-Kurve an die Versuchsergebnisse läuft überwiegend analog zur ersten und zweiten Anpassung ab. Der Unterschied liegt jedoch in der prozentualen Veränderung des jeweils betrachteten Wärmeleitkoeffizienten. Die Werte werden in dieser Schleife schrittweise um +20%, +16%, +12%, +8%, +4%, -4%, -8%, -12%, -16% und -20% geändert. Die Summen der quadrierten Abstände werden berechnet, das Minimum davon ausgewählt und die geeignetsten Wärmeleitkoeffizienten bestimmt.

### 6.2.2.2 Flexible Holfaserdämmung

Für die flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca.  $50 \text{ kg/m}^3$  wurden unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmespeicherkapazität, der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit bei  $20^\circ\text{C}$  effektive Kenngrößen ermittelt.

Dabei wird die spezifische Wärmespeicherkapazität im Temperaturbereich von  $80^\circ\text{C}$  -  $100^\circ\text{C}$  angepasst, um die bei der Verdampfung von Wasser freiwerdende Verdampfungsenergie sowie die aus der exothermen Pyrolyse resultierende Reaktionswärme zu berücksichtigen. Dafür wird die latente Verdampfungswärme  $q_{\text{lat}}$  des enthaltenen Wassers wie folgt berücksichtigt.

$$q_{\text{lat}} = 2.257 \cdot \frac{\frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \cdot 10^3 \quad \text{Gl. 6-2}$$

mit	$q_{\text{lat}}$ [J/kg]	Verdampfungswärme
	$u$ [%]	Feuchte
	2.257 [kJ/kg]	spezifische Verdampfungswärme von Wasser

Sie wird durch eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität im Bereich der stattfindenden Verdampfung erfasst und stellt dort die Fläche unter der Kurve dar.

Nach Gleichung Gl. 6-2 kann die Verdampfungswärme  $q_{\text{lat}}$  zu  $q_{\text{lat,HF}} = 167 \text{ kJ/kg}$  bei einer Feuchte von ca. 8 M-% berechnet werden. Die Berücksichtigung dieser Verdampfungsenthalpie erfolgt durch die Annahme einer konstanten Erhöhung der effektiven spezifischen Wärmekapazität im Bereich von 80 °C bis 100 °C. Daher wird sie in diesem Temperaturbereich mit  $c_{p,\text{lat,HF}} = 8.360 \text{ J/(kg K)}$  angesetzt. Bei 20 °C wurde die von den Herstellern angegebene Wärmespeicherkapazität von 2100 J/(kg K) übernommen. Die restlichen Werte bis 150 °C entsprechen den Messergebnissen aus der Hot-Disk-Messung multipliziert mit einem Faktor von ca. 1,4, um die Abweichung zu den Herstellerangaben unter Raumtemperatur zu berücksichtigen. Ab 200 °C wurden die Werte mit Hilfe des in Kapitel 6.2.2 vorgestellten Modells ermittelt.

Mittels des relativen Masseverlustes nach Tabelle 6-2 kann das Verhältnis der temperaturabhängigen Rohdichte zur Darrrohichte berechnet werden.

Die Rohdichte für die untersuchten flexiblen Holzfaserdämmungen beträgt bei 20°C ca. 50 kg/m<sup>3</sup>.

Die effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit wurde mit Hilfe des in Kapitel 6.2.2

vorgestellten Modells ermittelt. Bei einer Temperatur von 600°C wurde die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich dickenabhängig angepasst. Eine schnellere Rissbildung bei dünneren Dämmmaten führte zum schnelleren Anstieg der Temperaturen auf der brandabgewandten Seite. Diesem Verhalten soll durch eine dickenabhängige Modellierung Rechnung getragen werden.

Tabelle 6-1: Effektive temperaturabhängige spezifische Wärmespeicherkapazität für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>

T [°C]	c [J/(kg K)]
20	2.100
79	2.275
80	8.360
100	8.360
101	2.630
120	3.094
150	3.136
200	1.856
400	3.801
600	4.831
800	5.412
1.200	4.158

Tabelle 6-2: Effektiver temperaturabhängiger Masseverlust für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>

T [°C]	$\rho(T) / \rho_0$ [%]
20	108
80	102
99	101
100	100
120	100
150	100
200	95
400	44
600	37
800	30
1.200	0

Tabelle 6-3: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>

T [°C]	$\lambda$ [W/(m*K)]								
	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	160 mm	180 mm	200 mm	240 mm
20	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
60	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
80	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
100	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
110	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
120	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
150	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
200	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132
400	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432
600	4	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339
800	20	8	3,35	2,4	2,0	1,8	1,8	1,8	1,8
1.200	20	8	3,5	2,4	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16

In Tabelle 6-1 bis Tabelle 6-3 werden die für die thermische Simulation verwendeten effektiven Materialkennwerte für flexible Holzfaserdämmungen einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup> dargestellt.

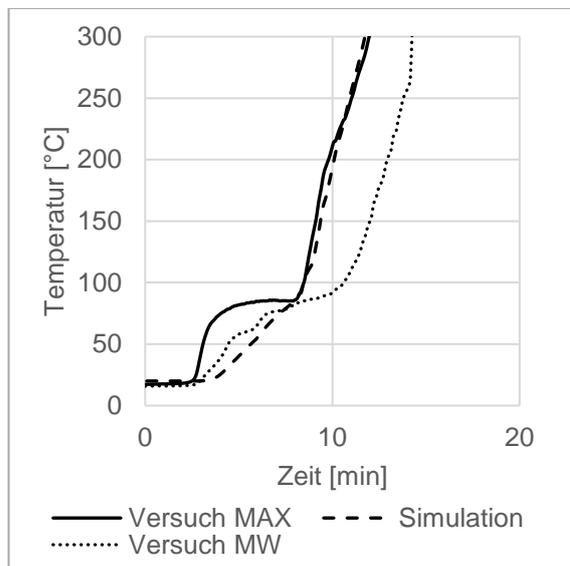


Abbildung 6-3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf feuerabgewandter Seite der 60 mm Holzfaserdämmung

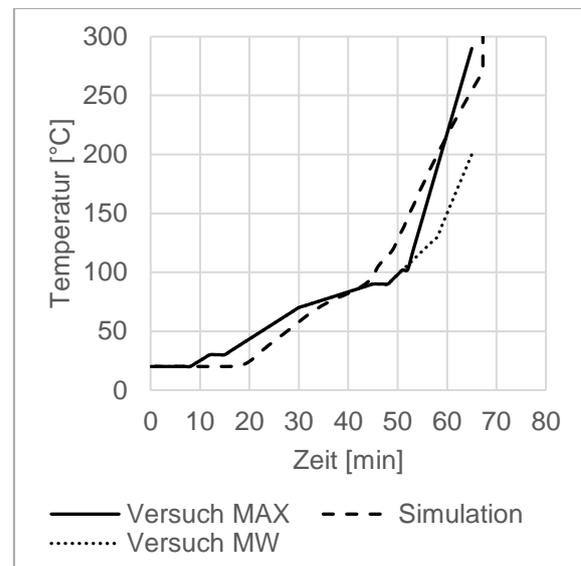


Abbildung 6-4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf feuerabgewandter Seite der 160 mm Holzfaserdämmung

Ein Vergleich der Temperaturverläufe der thermischen FE-Simulation mit Versuchsergebnissen, in welchen das Abfallen der Dämmung verhindert wurde, ist für eine Dämmstoffdicke von 60 mm Abbildung 6-3 und für eine Dämmstoffdicke von 160 mm Abbildung 6-4 zu entnehmen.

Für das in Kapitel 0 vorgestellte Modell zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie der spezifischen Wärmespeicherkapazität wurden die in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellten Versuche herangezogen.

### 6.2.2.3 Druckfeste Holzfaserdämmung (Trockenverfahren)

Die temperaturabhängige spezifische Wärmeleitfähigkeit und der Masseverlust für druckfeste Holzfaserdämmungen, die im Trockenverfahren hergestellt wurden und eine Rohdichte von ca.  $140 \text{ kg/m}^3$  aufweisen, entsprechen den Werten der spezifischen Wärmeleitfähigkeit und des Masseverlustes der flexiblen Holzfaserdämmung aus Kapitel 6.2.2.

Bei der Berechnung der temperaturabhängigen Rohdichte ist jedoch auf die höhere Rohdichte von  $140 \text{ kg/m}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$  für die druckfeste Holzfaserplatte zu achten.

Für die effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit wurden als Ausgangswerte die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung aus Tabelle 6-3 herangezogen. Lediglich die Werte ab einer Temperatur größer  $800^\circ\text{C}$  wurden an-

angepasst. Bei einer Temperatur von  $800^\circ\text{C}$  wurde die Wärmeleitfähigkeit wie bei der flexiblen Holzfaserdämmung dickenabhängig verändert.

Zur Festlegung der Kennwerte wurden ebenfalls die Temperaturverläufe der thermischen FE-Simulation mit Versuchsergebnissen verglichen. Hierfür wurden Versuche mit einer Dämmstoffdicke von 60 mm und 100 mm gemäß Kapitel 3.3.2 herangezogen.

Tabelle 6-4: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für druckfeste Holzfaserdämmung (Trockenverfahren) mit einer Rohdichte von ca.  $140 \text{ kg/m}^3$

T [°C]	λ [W/(m*K)]		
	60 mm	80 mm	100 mm
20	0,04	0,04	0,04
60	0,13	0,13	0,13
80	1,5	1,5	1,5
100	0,13	0,13	0,13
110	0,044	0,044	0,044
120	0,044	0,044	0,044
150	0,046	0,046	0,046
200	0,132	0,132	0,132
400	0,13	0,13	0,13
600	0,13	0,13	0,13
800	1,1	1,8	2,5
1.200	5	5	5

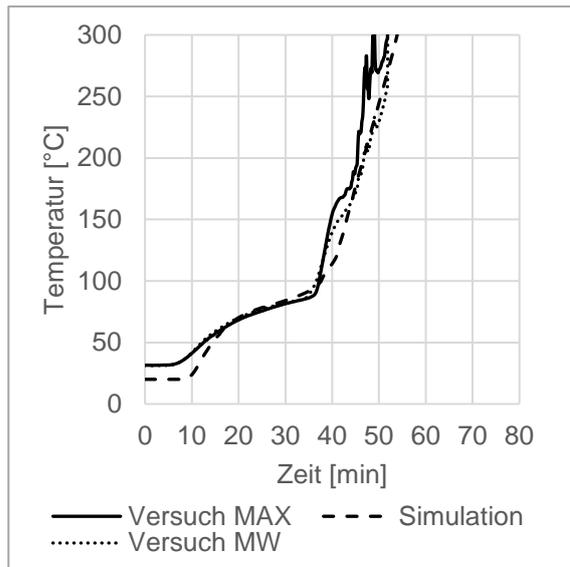


Abbildung 6-5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)

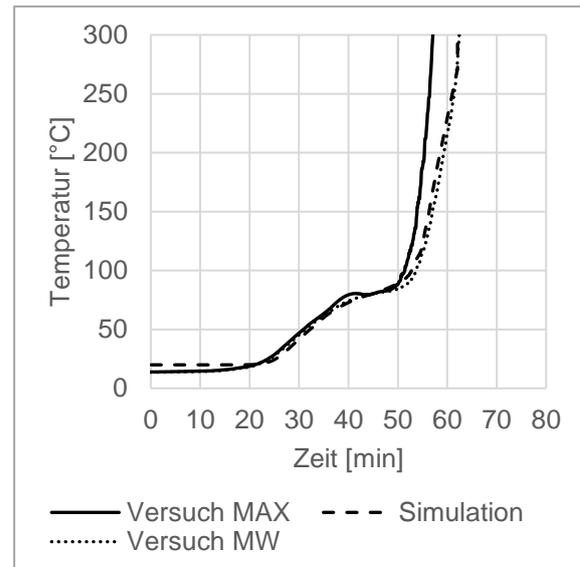


Abbildung 6-6: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 100 mm Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)

#### 6.2.2.4 Druckfeste Holzfaserdämmung (Nassverfahren)

Die temperaturabhängige spezifische Wärmeleitfähigkeit und der Masseverlust für druckfeste Holzfaserdämmungen, die im Nassverfahren hergestellt wurden und eine Rohdichte von ca.  $230 \text{ kg/m}^3$  aufweisen, entsprechen ebenfalls den Werten der spezifischen Wärmeleitfähigkeit und des Masseverlustes der flexiblen Holzfaserdämmung aus Kapitel 6.2.2.

Bei der Berechnung der temperaturabhängigen Rohdichte ist auch hier auf die höhere Rohdichte von  $230 \text{ kg/m}^3$  bei  $20 \text{ °C}$  für die druckfeste Holzfasерplatte zu achten.

Für die effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit wurden als Ausgangswerte innerhalb der Kalibrierung die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der flexiblen Holzfaserdämmung aus Ta-

belle 7.3 herangezogen. Lediglich die Werte ab einer Temperatur größer  $800 \text{ °C}$  wurden angepasst. Bei einer Temperatur von  $800 \text{ °C}$  wurde die Wärmeleitfähigkeit wie bei der flexiblen Holzfaserdämmung dickenabhängig verändert.

Tabelle 6-5: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für druckfeste Holzfaserdämmung (Nassverfahren) mit einer Rohdichte von ca.  $230 \text{ kg/m}^3$

T [°C]	λ [W/(m·K)]		
	60 mm	80 mm	100 mm
20	0,04	0,04	0,04
60	0,13	0,13	0,13
80	1,5	1,5	1,5
100	0,13	0,13	0,13
110	0,044	0,044	0,044
120	0,044	0,044	0,044
150	0,046	0,046	0,046
200	0,132	0,132	0,132
400	0,13	0,13	0,13
600	0,13	0,13	0,13
800	1,5	1,375	1,25
1.200	20	20	20

Zur Festlegung der Kennwerte wurden auch hier die Temperaturverläufe der thermischen FE-Simulation mit Versuchsergebnissen verglichen. Hierfür wurden ebenfalls Versuche mit einer Dämmstoffdicke von 60 mm und 100 mm gemäß Kapitel 3.3.2 herangezogen.

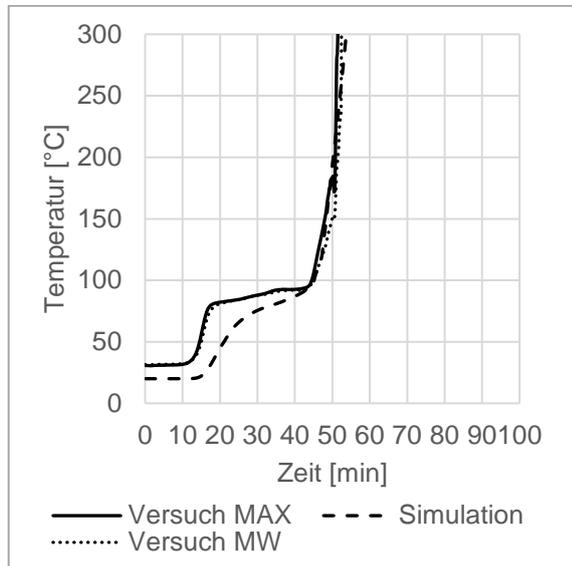


Abbildung 6-7: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)

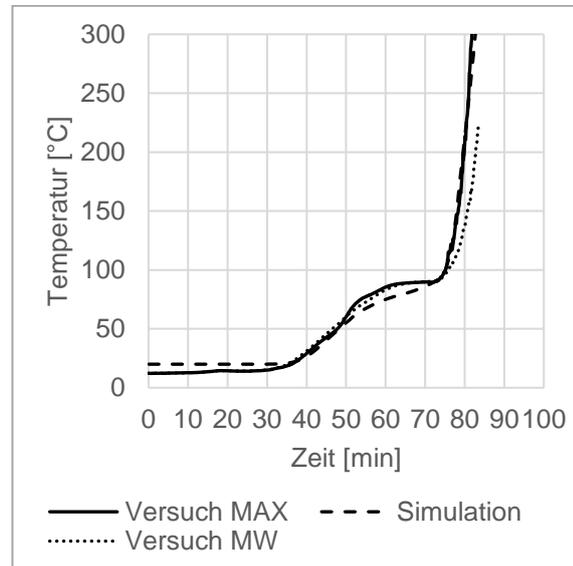


Abbildung 6-8: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 100 mm Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)

### 6.2.2.5 Zellulose

Für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca.  $50 \text{ kg/m}^3$  wurden unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmespeicherkapazität, der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit bei  $20^\circ\text{C}$  effektive Kenngrößen ermittelt.

Nach Gl. 6-2 kann die Verdampfungswärme  $q_{\text{lat}}$  zu  $q_{\text{lat,Zell}} = 186 \text{ J/kg}$  bei einer Feuchte von ca. 9 M-% berechnet werden. Die Berücksichtigung dieser Verdampfungsenthalpie erfolgt durch die Annahme einer konstanten Erhöhung der effektiven spezifischen Wärmekapazität im Bereich von  $80$  bis  $100^\circ\text{C}$ . Daher wird sie in diesem Temperaturbereich mit  $c_{p,\text{lat,Zell}} = 9.500 \text{ J/(kg K)}$  angesetzt. Bei  $20^\circ\text{C}$  wurde die von den Herstellern angegebene Wärmespeicherkapazität von  $2.100 \text{ J/(kg K)}$  übernommen. Die restlichen Werte bis  $150^\circ\text{C}$  entsprechen den Messergebnissen aus der Hot-Disk-Messung multipliziert mit einem

Faktor von ca. 1,2, um die Abweichung zu den Herstellerangaben unter Raumtemperatur zu berücksichtigen.

Tabelle 6-6: Effektive temperaturabhängige spezifische Wärmespeicherkapazität für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca.  $50 \text{ kg/m}^3$

T [°C]	c [J/(kg K)]
20	2.100
79	1.570
80	9.500
100	9.500
101	1.917
120	1.896
150	1.855
200	751
400	2.653
600	1.816
800	3.882
1.200	7.560

Mittels relativen Masseverlustes nach Tabelle 6-7 kann die temperaturabhängige Rohdichte durch die Rohdichte bei 20 °C berechnet werden.

Die Rohdichte für die untersuchte Zellulosedämmung beträgt bei 20 °C ca.  $\rho(T) = 50 \text{ kg/m}^3$ . Die effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit wurde mit Hilfe des in Abschnitt 6.2 vorgestellten Modells ermittelt. Bei einer Temperatur von 800°C wurde die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich dickenabhängig angepasst. Eine schnellere Rissbildung und Formänderung bei dünneren Dämmmatten führte wie bei der flexiblen Holzfaserdämmung zum schnelleren Anstieg der Temperaturen auf der brandabgewandten Seite. Diesem Verhalten soll durch die dickenabhängige Modellierung Rechnung getragen werden.

Tabelle 6-7: Effektiver temperaturabhängiger Masseverlust für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>

T [°C]	$\rho(T) / \rho_0$ [%]
20	109
80	103
99	102
100	102
120	101
150	101
200	100
400	56
600	48
800	44
1.200	0

Tabelle 6-8: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m<sup>3</sup>

T [°C]	$\lambda$ [W/(m*K)]								
	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm	140 mm	160 mm	180 mm	200 mm	240 mm
20	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
60	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
80	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
100	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
110	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
120	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
150	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
200	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
400	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
600	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
800	8	4,66	3,55	2,6	2,1	1,7	1,3	1,0	0,55
1.200	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16

Zur Festlegung der Kennwerte wurden auch hier die Temperaturverläufe der thermischen FE-Simulation mit Versuchsergebnissen verglichen. Hierfür wurden Versuche mit einer Dämmstoffdicke von 60 mm und 120 mm gemäß Kapitel 3.3.2 Abschnitt herangezogen.

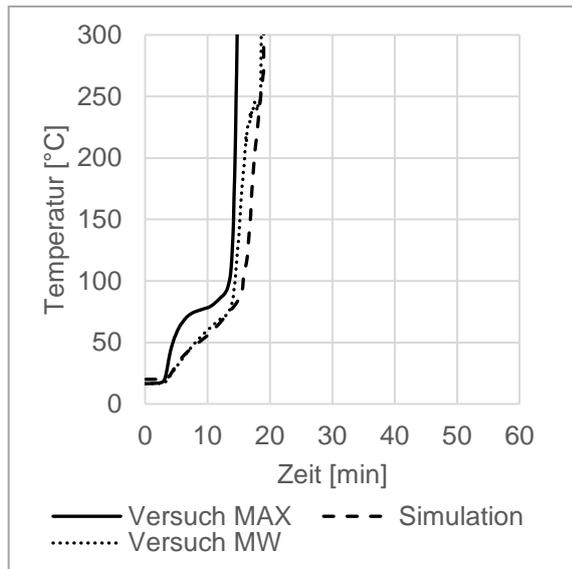


Abbildung 6-9: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Zellulosedämmung

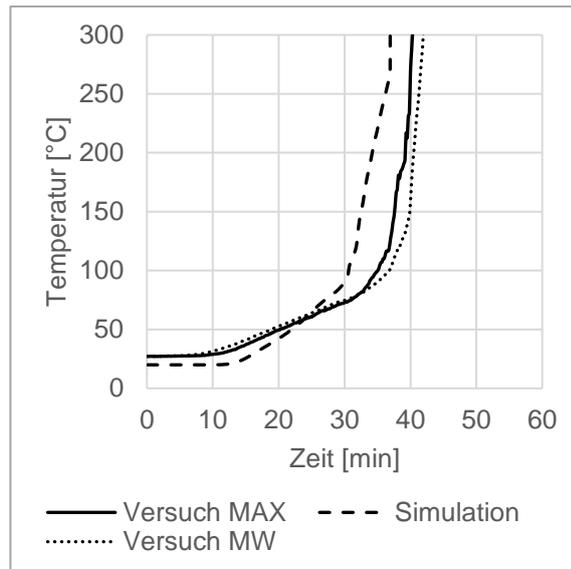


Abbildung 6-10: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 120 mm Zellulosedämmung

## 6.3 Vorgehensweise zur Ermittlung der Grundzeiten und Positionsbeiwerte

### 6.3.1 Bestimmung der Grundzeiten $t_{\text{ins},0,i}$ und $t_{\text{prot},0,i}$

Wie in Abbildung 6-11 veranschaulicht, erfolgt die Bestimmung der Grundisolationszeit  $t_{\text{ins},0,i}$  ausschließlich aus dem zu untersuchenden Material verschiedener Dicken. Für die Grundschutzzeit  $t_{\text{prot},0,i}$  besteht das Modell hingegen aus dem zu untersuchenden Material hinterlegt durch eine 19 mm dicke Spanplatte (vgl. hierzu Kapitel 7.2.5).

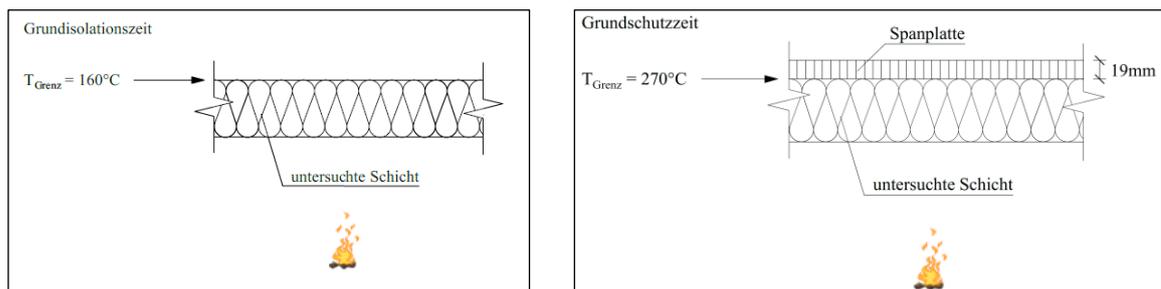


Abbildung 6-11: Aufbau der FE-Modelle und zugehörige Temperaturkriterien zur Ermittlung der Grundzeiten [1]

Die Spanplatte symbolisiert dabei etwaige Schichten auf der brandabgewandten Seite. Für diese Schicht tritt eine Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion zur Raumseite auf. Daher darf bei der Ermittlung der Grundschutzzeit diese Wärmeübertragung berücksichtigt werden.

Bei der Ermittlung der Grundzeiten von flexibler Holzfaser und Zellulose wurden praxisrelevante Dämmstoffdicken von 60 mm bis 240 mm untersucht. Für die druckfeste Holzfaserdämmung wurde der in der Praxis üblich verwendete Dickenbereich von 60 mm bis 100 mm in den Untersuchungen betrachtet.

Da die Zellulosedämmung und die flexible Holzfaserdämmung in der Regel nicht den Abschluss einer Wand- oder Deckenkonstruktion bilden, sondern immer durch andere Schichten geschützt werden, wurde auf die Bestimmung der Isolationszeit verzichtet.

Die druckfesten Holzfaserdämmungen werden meist als Wärmedämmverbundsysteme oder Unterdeckungen eingesetzt und bilden daher die äußere Schicht einer Wand- oder Deckenkonstruktion. Demnach wurde hierfür neben der Schutzzeit auch die Isolationszeit untersucht, obwohl auch hier bei Wänden immer noch ein Deckputz vorliegt.

### 6.3.2 Bestimmung des Positionsbeiwertes $k_{\text{pos,exp}}$

Der Positionsbeiwert  $k_{\text{pos,exp}}$  sorgt dafür den Einfluss davorliegender Schichten auf das untersuchte Material zu berücksichtigen. Bis zum Erreichen von  $270^\circ\text{C}$  zwischen der untersuchten Schicht  $i$  und den davorliegenden Schichten  $i-1$  schützen diese die untersuchte Schicht  $i$ . Bei

Erreichen dieser Grenztemperatur gelten die schützenden Schichten mit Ausnahme von GKF als abgefallen. Vor dem Abfallen der schützenden Schichten  $i-1$  wird die Schicht  $i$  bereits vorerwärmt. Die Schutzzeit  $t_{ins,i}$  oder  $t_{prot,i}$  der untersuchten Schicht  $i$ , die nach dem Abfallen der schützenden Schichten beginnt, wird daher um den Beiwert  $k_{pos, exp}$  reduziert. Der Vorerwärmung wird somit Rechnung getragen.

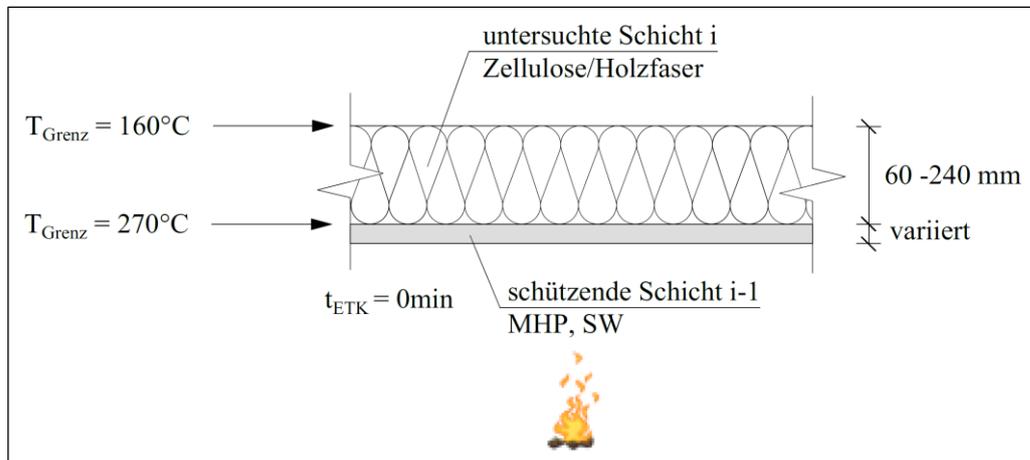


Abbildung 6-12: Ermittlung des Einflusses der Vorerwärmung durch schützende Schichten  $i-1$  [1]

Zur Ermittlung des Einflusses der Vorerwärmung aus davorliegenden Schichten muss die Isolationszeit durch die Grundisolationszeit bzw. die Schutzzeit durch die Grundschutzzeit dividiert werden:

$$k_{pos,exp,i} = \frac{t_{ins,i}}{t_{ins,0,i}} \quad \text{Gl. 6-3}$$

$$k_{pos,exp,i} = \frac{t_{prot,i}}{t_{prot,0,i}} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Die Isolationszeit  $t_{ins,i}$ , berechnet sich nach der Zeit, die ab Simulationsbeginn benötigt wurde um  $160^{\circ}\text{C}$  auf der brandabgewandten Seite der untersuchten Schicht  $i$  zu erreichen, abzüglich der Zeit, die bis zum Versagen der schützenden Schichten  $i-1$  ( $T_{Grenz} = 270^{\circ}\text{C}$ ) benötigt wurde. (siehe Abbildung 6-12)

Die Schutzzeit  $t_{prot,i}$ , berechnet sich hingegen nach der Zeit, die ab Simulationsbeginn benötigt wurde um  $270^{\circ}\text{C}$  zwischen der untersuchten Schicht  $i$  und einer dahinterliegenden 19 mm Spanplatte zu erreichen, abzüglich der Zeit, die bis zum Abfallen der schützenden Schichten  $i-1$  ( $T_{Grenz} = 270^{\circ}\text{C}$ ) benötigt wurde.

Für die Zellulosedämmung und die flexible Holzfaserdämmung wurde ausschließlich der Einfluss der Vorerwärmung auf die Schutzzeit  $t_{prot,i}$  der Dämmung untersucht. Hierfür wurden die beiden untersuchten Dämmstoffe mit Dicken von 60 mm, (80 mm, 100 mm), 120 mm, 160 mm und 240 mm durch Massivholzplatten (MHP) oder Steinwolleplatten (SW) variierender

Dicken geschützt. Die untersuchte Zellulose- oder flexible Holzfaserdämmung war zur Ermittlung von  $t_{\text{prot},i}$  durch eine 19 mm dicken Spanplatte hinterlegt.

Bei der Verwendung von Massivholzplatten mit einer Rohdichte von  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$  als schützende Schicht i-1 wurden Plattendicken in folgender Abstufung verwendet: 6 mm, 10 mm, 16 mm, 22 mm, 32 mm, 40 mm.

Sofern Steinwolle einer Rohdichte von  $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$  als schützende Schicht i-1 eingesetzt wurde, wurden Mattendicken in folgender Abstufung verwendet: 40 mm, 60 mm, 100 mm, 160 mm. Die temperaturabhängigen Materialkennwerte der Massivholzplatte und der Steinwolle für die thermische Simulation wurden aus Schleifer [1] entnommen.

Für die druckfesten Holzfaserplatten wurden sowohl der Einfluss der schützenden Schichten auf die Isolationszeit als auch auf die Schutzzeit bestimmt. Innerhalb der numerischen Untersuchungen wurden FE-Modelle mit druckfesten Holzfaserplatten der Dicken 60 mm, 80 mm und 100 mm verwendet. Zur Ermittlung von  $t_{\text{prot},i}$  wurden die Holzfaserdämmplatten zusätzlich mit einer 19 mm Spanplatte hinterlegt.

Als schützenden Schichten wurden Massivholzplatten und Steinwollematten gleicher Dicken und Rohdichten wie bei der Untersuchung der Zellulosedämmung und der flexiblen Holzfaserdämmung verwendet.

### 6.3.3 Bestimmung des Positionsbeiwertes $k_{\text{pos}, \text{unexp}}$

Mit Hilfe des Positionsbeiwertes  $k_{\text{pos}, \text{unexp}}$  kann der Einfluss dahinterliegender Schichten i+1 auf die untersuchte Schicht i berechnet werden. Schleifers Untersuchungen ergaben hierbei, dass Massivholzplatten, Spanplatten und OSB-Platten kaum Einfluss auf die Schutzzeit des zu untersuchten Materials besaßen. Sofern jedoch Dämmstoffe als dahinterliegende Schichten eingesetzt werden, entsteht ein Wärmestau zwischen dem untersuchten Material und der Dämmung, der zu einer Reduzierung der Schutzzeiten führt. Die Dicke sowie die Rohdichte der Dämmung hatte kaum Einfluss auf die Ergebnisse.

Für die Untersuchung des Einflusses von dahinterliegenden Schichten wurden gemäß Schleifer [1] die zu untersuchenden Dämmstoffe ausschließlich mit einer 60 mm dicken Steinwolledämmung der Rohdichte  $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$  hinterlegt. (siehe Abbildung 6-13)

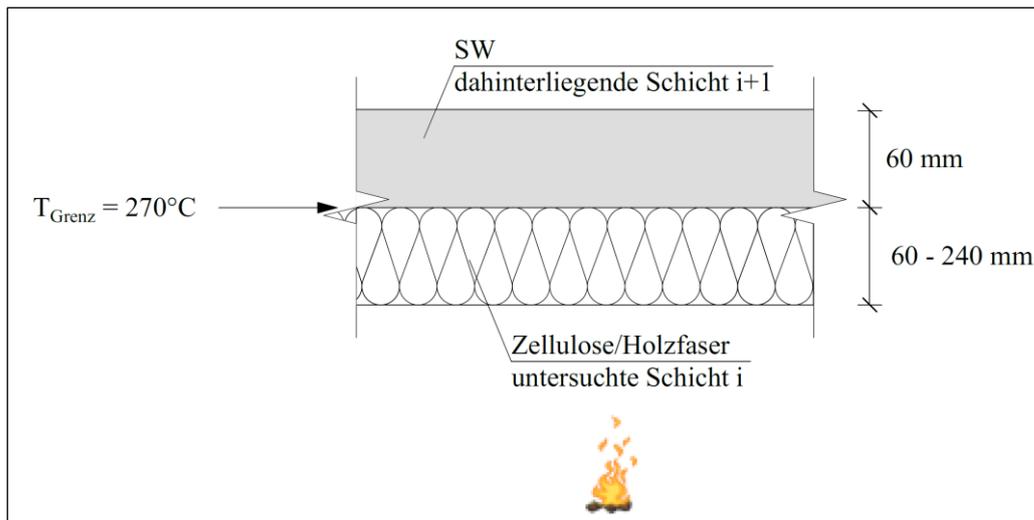


Abbildung 6-13: Einteilung des Bauteils in schützende und isolierende Schichten nach Schleifer [1]

Zur Ermittlung des Einflusses dahinterliegender Dämmungen muss die Schutzzeit durch die Grundschutzzeit dividiert werden:

$$k_{pos,unexp,i} = \frac{t_{prot,i}}{t_{prot,0,i}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

Die Schutzzeit  $t_{prot,i}$ , berechnet sich nach der Zeit, die ab Simulationsbeginn benötigt wurde um 270°C zwischen der untersuchten Schicht i und der dahinterliegenden 60 mm dicken Steinwolle zu erreichen.

Bei der Untersuchung des Einflusses einer dahinterliegenden 60 mm dicken Steinwollendämmung auf eine Zellulosedämmung oder flexible Holzfaserdämmung, wurde die zu untersuchende Schicht i (Zellulose oder flexible Holzfaser) mit Dicken von 60 mm, 80 mm, 120 mm, 160 mm, 200 mm 240 mm in der thermischen FE-Simulation nachgebildet.

Bei den druckfesten Holzfasermatten wurden die Dicken 60 mm, 80 mm und 100 mm untersucht.

### 6.3.4 Bestimmung der Zeitdifferenz $\Delta t_i$ bei Verwendung von Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht

Sofern Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht i-1 eines zu untersuchten Materials herangezogen werden, verändert sich die Isolationszeit bzw. Schutzzeit dieser Schicht. Es wird angenommen, dass Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten, vorausgesetzt sie sind in Wänden (vertikal) eingebaut, erst bei einer Grenztemperatur von 600°C zwischen der Gipsplatte und der untersuchten Schicht abfallen. Der Einbau der Platten in Decken (horizontal) bewirkt hingegen ein Abfallen bereits bei 400°C zwischen der Gipsplatte

und der untersuchten Schicht, was auf den Einfluss des Eigengewichtes der Platte zurückzuführen ist. Für alle anderen schützenden Materialschichten wird ein Abfallen bei einer Grenztemperatur von 270 °C festgesetzt [1].

Durch den Abfall der Gipsplatte des Typ F bzw. der Gipsfaserplatte bei Grenztemperaturen von 400 °C bzw. 600 °C wird die dahinterliegende Schicht i länger vor der direkten Brandeinwirkung geschützt. Dies hat zur Folge, dass sich die Isolationszeit bzw. Schutzzeit der untersuchten Schicht i verlängert.

Zur Bestimmung dieser Zeitdifferenz muss die Isolationszeit bzw. Schutzzeit wie folgt berechnet werden:

- I. Die Isolationszeit bzw. Schutzzeit wird für den Fall berechnet, in welchen man von einem Abfallen der Gipsplatte Typ F/Gipsfaserplatte bei einer Grenztemperatur von 270°C ausgeht (siehe Abbildung 6-14)
- II. Die Isolationszeit bzw. Schutzzeit wird für den Fall berechnet, in welchen man von einem Abfallen der Gipsplatte Typ F/Gipsfaserplatte bei einer Grenztemperatur von 600°C für den Einbau in Wänden bzw. 400°C für den Einbau in Decken ausgeht (siehe Abbildung 6-15 und Abbildung 6-16)
- III. Die Zeitdifferenz kann nun bestimmt werden, indem man das Ergebnis aus I vom Ergebnis aus II abzieht.

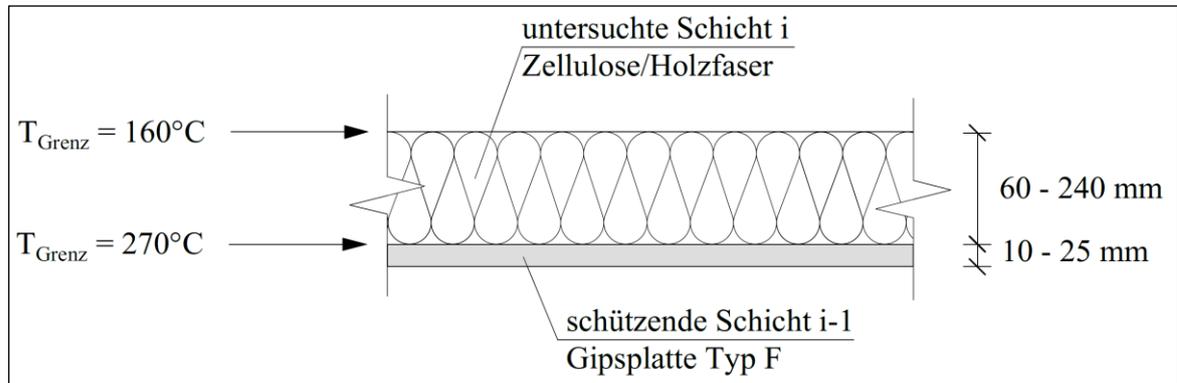


Abbildung 6-14: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Massivholzplatten geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei  $T_{\text{Grenz}} = 270^\circ\text{C}$  abfallen

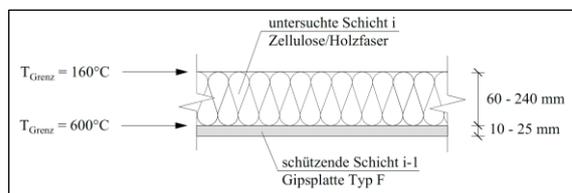


Abbildung 6-15: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose/Holzfasern geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei  $T_{\text{Grenz}} = 600^\circ\text{C}$  abfallen

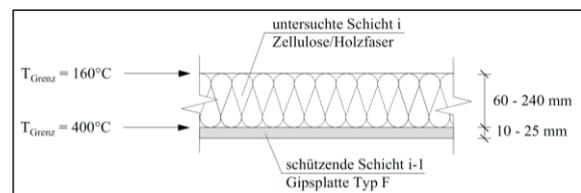


Abbildung 6-16: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose/Holzfasern geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei  $T_{\text{Grenz}} = 400^\circ\text{C}$  abfallen

Als schützende Schichten wurden für die thermische FE-Simulation Gipsplatten des Typ F mit Dicken von 10 mm, 15 mm und 25 mm herangezogen.

Bei der Untersuchung der Zeitdifferenz für Zellulose- und die flexible Holzfaserdämmung wurden Dämmstoffdicken von 60 mm, 120 mm, 160 mm und 240 mm herangezogen.

Bei den druckfesten Holzfaserplatten wurden die Dicken 60 mm, 80 mm und 100 mm untersucht.

## 6.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse aus der numerischen Untersuchung in Bezug auf die Grundzeiten werden in Abhängigkeit der untersuchten Dämmstoffdicken in einem Diagramm zusammengefasst (siehe Abbildung 6-17 beispielhaft für die Grundschutzzeit von Zellulose).

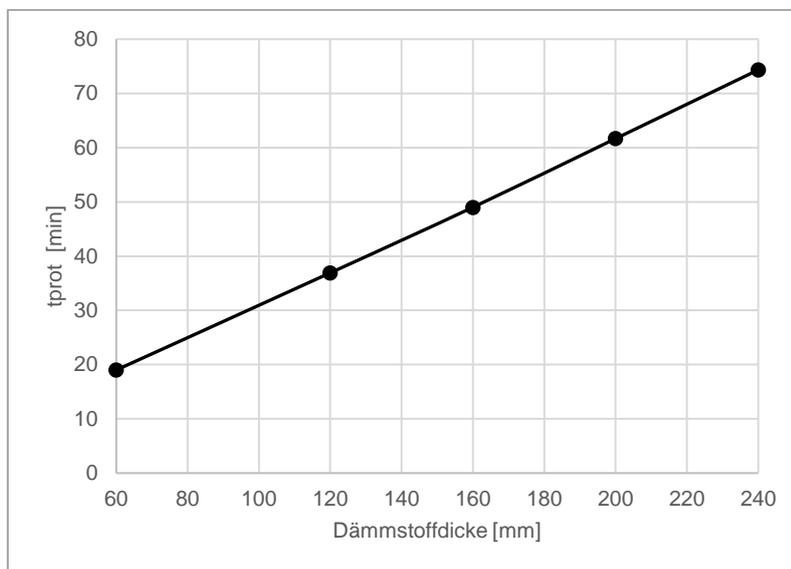
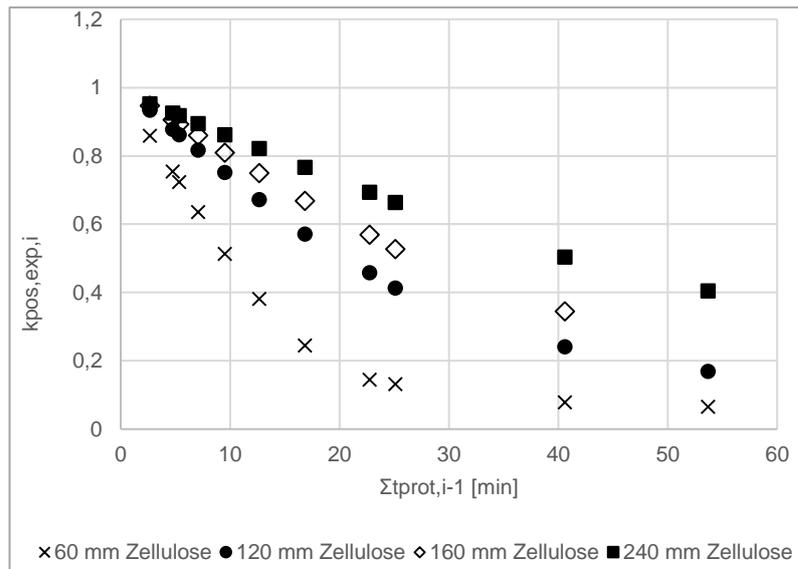


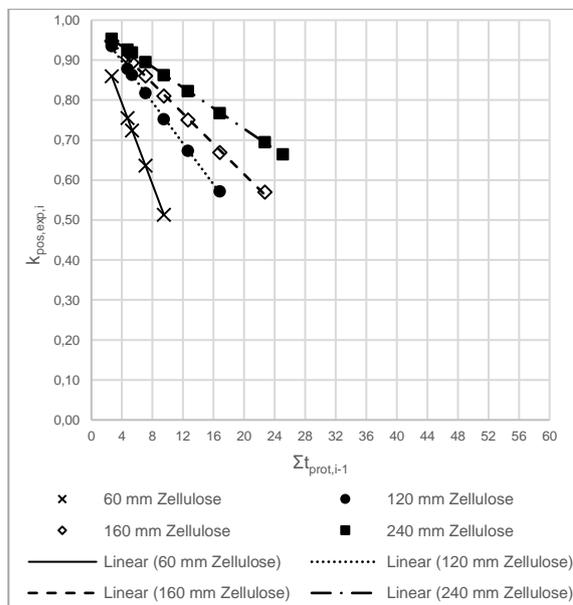
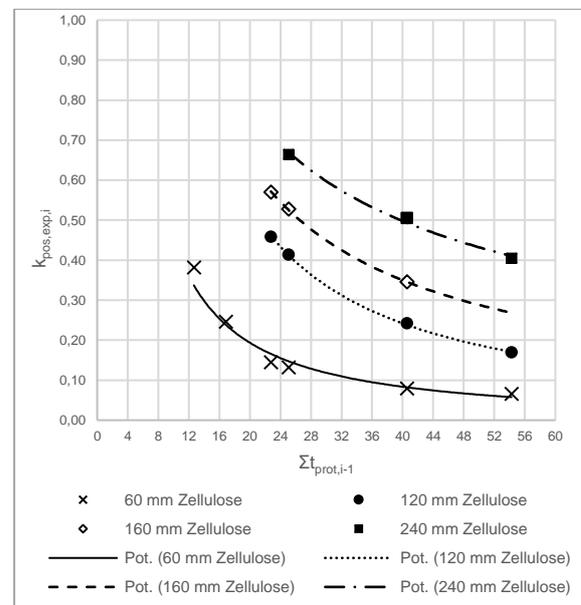
Abbildung 6-17: Grundschutzzeiten für Zellulose  $\rho=50 \text{ kg/m}^3$  in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke

Mit Hilfe des Kurvenverlaufes kann die entsprechende Gleichung zur Ermittlung der Grundschutzzeit entwickelt werden.

Der Positionsbeiwert  $k_{pos,exp}$  hingegen wird gemäß Schleifer [1] für jede untersuchte Dämmstoffdicke in Abhängigkeit der Summe der davorliegenden Schutzzeiten  $\Sigma t_{prot,i-1}$  abgebildet (siehe Abbildung 6-18). Die Summe der davorliegenden Schutzzeiten ist diejenige Zeit, die benötigt wird um  $270^\circ\text{C}$  vor der untersuchten Dämmschicht  $i$  zu erreichen. Um hierfür unterschiedliche Ergebnisse zu erzielen, wurden Massivholzplatten und Steinwolle in unterschiedlichen Dicken als Schutzschichten verwendet. (Siehe Abschnitt 6.3.2)

Abbildung 6-18: Positionsbeiwert  $k_{pos,exp}$  zur Berücksichtigung davorliegender Schichten für Zellulose

Die dickenabhängigen Kurvenverläufe, die sich aus der numerischen Simulation ergeben, wurden zur Erstellung von Gleichungen jeweils in zwei Anteile aufgeteilt. Ein Anteil der Kurve entspricht dabei einer Geraden (siehe Abbildung 6-19) und der andere Teil der Kurve stimmt mit dem Verlauf einer Potenzfunktion überein (siehe Abbildung 6-20). Die Aufteilung der Kurven folgt in Abhängigkeit der Summe der davorliegenden Schutzschichten  $\Sigma t_{prot,i-1}$  im Vergleich zur halben Schutzzeit  $t_{prot,i}$  der untersuchten Schicht  $i$ . Sofern  $\Sigma t_{prot,i-1}$  kleiner gleich  $t_{prot,i}/2$  gilt, entspricht die Gleichung der Funktion einer Geraden. Andernfalls findet eine Potenzfunktion Anwendung.

Abbildung 6-19: Positionsbeiwert für  $\Sigma t_{prot,i-1}$  kleiner gleich  $t_{prot,i}/2$ Abbildung 6-20: Positionsbeiwert für  $\Sigma t_{prot,i-1}$  größer als  $t_{prot,i}/2$ 

Die Ergebnisse der Simulation ergeben gemäß Abschnitt 6.3.3 den Positionsbeiwert  $k_{pos,unexp}$  in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke.

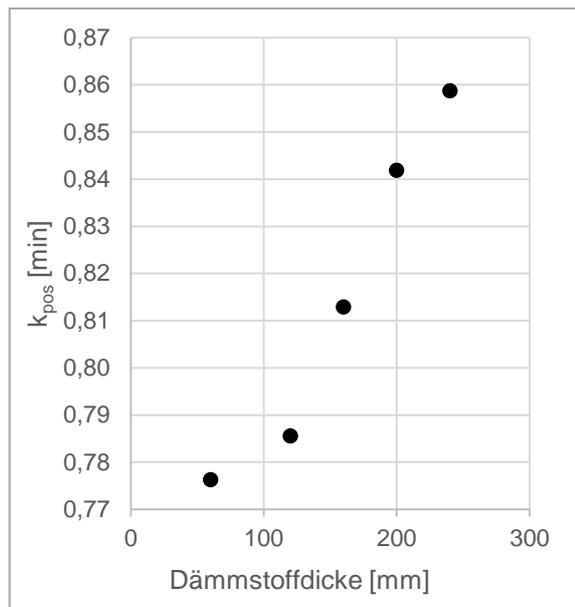


Abbildung 6-21: Positionsbeiwert  $k_{pos,unexp}$  zur Berücksichtigung dahinterliegender Dämmschichten für Zellulose

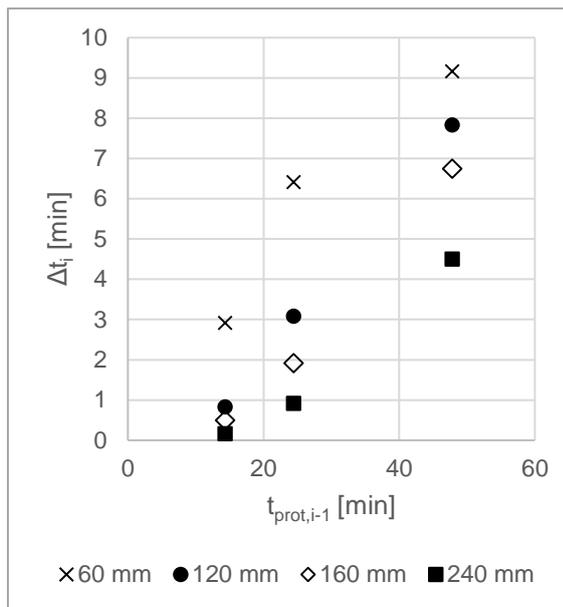


Abbildung 6-22: Zeitdifferenz  $\Delta t_i$  bei Verwendung von Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht vor Zellulose bei einer Wandkonstruktion

Die Zeitdifferenz  $\Delta t_i$ , die bei Verwendung von Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht in Wand- und Deckenkonstruktionen hinzugefügt werden darf, wird gemäß Abschnitt 6.3.4 entsprechend der Schutzzeiten der Gipsplatten  $t_{prot,i-1}$  dargestellt. Dabei wird die Schutzzeit der Gipsplatte herangezogen, die sich bei dem Erreichen von 270°C zwischen der Gipsplatte und der untersuchten Schicht  $i$  ergibt.

## 7 Rechenverfahren für den Raumabschluss

### 7.1 Allgemeines

Erweiternd zum bisherigen additiven Berechnungsmodell nach Schleifer [1] (siehe Kapitel 7.2.2) werden die Beiträge von Zellulose- sowie Holzfaserdämmstoffen zum Raumabschluss von Holzrahmenkonstruktionen abgeleitet.

Das Modell von Schleifer basiert auf der Ermittlung des Wärmedurchgangs durch einzelne Bauteilschichten. Mit Hilfe des untersuchten Wärmedurchgangs lässt sich eine Zeit angeben, ab welcher die untersuchte Schicht eine vorgegebene Temperaturerhöhung auf der brandabgewandten Seite überschreitet. Innerhalb eines Bauteils darf die Schicht auf der brandabgewandten Seite als Isolationsschicht eine Temperaturerhöhung von 140 K (bzw. eine Grenztemperatur von  $20^{\circ}\text{C} + 140^{\circ}\text{C} = 160^{\circ}\text{C}$ ) nicht überschreiten, um die Kriterien zur Erfüllung des Raumabschlusses einzuhalten.

Alle davorliegenden Schichten werden als Schutzschichten bezeichnet. Ihre schützende Funktion wird gemäß DIN EN 13501-2 solange beibehalten sofern eine Temperaturerhöhung von 250 K (bzw. Grenztemperatur von  $20^{\circ}\text{C} + 250^{\circ}\text{C} = 270^{\circ}\text{C}$ ) nicht überschritten wird.

Durch die Addition der Beiträge der schützenden Schichten mit dem der Isolationsschicht kann die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils in Bezug auf den Raumabschluss ermittelt werden.

Voraussetzung hierfür ist, dass die einzelnen Schichten ihre Position im Bauteil solange wahren, bis die Grenztemperaturen durch den material- und dickenabhängigen Wärmedurchgang erreicht werden.

Bei der Verwendung von Zellulose- und flexiblen Holzfaserdämmstoffen als Hohlraumdämmung in Holztafelelementen fallen diese Schichten teilweise jedoch ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen durch ein Schrumpfen des Dämmstoffes vorzeitig ab.

Das Abfallen des Dämmstoffes vor Erreichen der Grenztemperatur infolge des Wärmedurchgangs muss demnach separat berücksichtigt werden.

### 7.2 Berechnungsmodell für den Raumabschluss

#### 7.2.1 Allgemeines

Im Brandfall muss ein Bauteil tragend und/oder raumabschließend wirken. In der DIN EN 1995-1-2 wird festgehalten, dass raumabschließende Wand- oder Deckenkonstruktionen das Kriterium des Raumabschlusses (Kriterium E) und der Wärmedämmung (Kriterium I) erfüllen müssen. Das Kriterium I ist dann eingehalten, wenn der mittlere Temperaturanstieg  $\Delta T_{MW}$  auf

der feuerabgewandten Seite des Bauteils maximal 140°C beträgt. Außerdem darf der maximale Temperaturanstieg über die Anfangstemperatur an keinem Punkt auf der brandabgewandten Bauteiloberfläche eine Temperaturerhöhung von 180°C überschreiten.

Gemäß DIN EN 1995-1-2 wird auch das Kriterium E als eingehalten angenommen, wenn die Anforderungen bezüglich des Kriteriums I erfüllt sind, wobei hierüber das Öffnen von Fugen und Spalten und der Durchtritt von Heißgasen ausgeschlossen wird. Für tragende Bauteile ist der Nachweis der Tragfähigkeit (Kriterium R) zu führen. Das Kriterium R ist bestätigt, wenn die Tragfähigkeit des Bauteils während der geforderten Zeit unter Brandbeanspruchung erhalten bleibt.

Ergänzend zum aktuellen Berechnungsverfahren für raumabschließende Bauteile gemäß DIN EN 1995-1-2 Anhang E wird nachfolgend das Verfahren nach Schleifer [1] beschrieben. Infolge des weiterentwickelten Ansatzes im Vergleich zur DIN EN 1995-1-2 werden alle Arbeiten innerhalb dieses Vorhabens auch auf dieses Verfahren ausgelegt. Im Rahmen der aktuellen Überarbeitung des EC 5 wird dieses erfahrungsbasierte Verfahren den bestehenden Ansatz zukünftig ersetzen.

### 7.2.2 Grundlagen zum Berechnungsmodell nach Schleifer

Das Berechnungsverfahren zum Raumabschluss nach Schleifer [1] ist ein additives Verfahren zur Berechnung der Zeitdauer, in der das brandbeanspruchte Bauteil eine raumabschließende Funktion aufweist. Dabei werden die Beiträge der einzelnen Schichten zum Raumabschluss des Bauteils ermittelt und anschließend addiert. Der Nachweis wird durch den Vergleich der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer mit der berechneten Isolationszeit des Bauteils geführt. Das Modell ist bisher für OSB-Platten, Massivholz-, Furnierschichtholz-, Span-, Faser-, Gips- und Gipsfaserplatten sowie für Stein- und Glaswolle mit unterschiedlichen Dicken und in nahezu freier Kombinationsmöglichkeit anwendbar. Innerhalb des Berechnungsverfahrens werden zunächst die Grundschutzzeiten und die Grundisolationszeit der einzelnen Schichten berechnet. Mit diesen Grundzeiten und den zugehörigen Positions- und Fugenbeiwerten werden anschließend die Schutzzeiten der feuerzugewandten Lagen und die Isolationszeit der feuerabgewandten Schicht ermittelt und addiert.

Für Holztafelkonstruktionen haben das Abfallen von Bekleidung sowie das Herausfallen und Schmelzen der Dämmung einen großen Einfluss auf die raumabschließende Wirkung. Das Versagen der Bekleidungen erfolgt nach Schleifer für alle untersuchten Bekleidungsarten und Dämmungen mit Ausnahme der Gipsplatten Typ F und der Gipsfaserplatten bei einer Temperaturerhöhung von 250 K auf der brandabgewandten Seite. Ausschließlich die Gipsplatten des Typ F und die Gipsfaserplatten fallen in Abhängigkeit ihrer Einbaulage (horizontal oder vertikal) erst bei Temperaturen von ca. 400°C bzw. 600°C auf der brandabgewandten Seite ab. Diese erhöhte Grenztemperatur führt zum Einsatz des Beiwertes  $\Delta t$ , der die verspätete

Abfallzeit im Vergleich zum Abfallzeitpunkt bei 270°C auf der brandabgewandten Seite berücksichtigt.

Das Versagen von Ständer und Balken der Konstruktion wird in dem Modell nicht berücksichtigt, wodurch ein Tragsicherheitsnachweis gesondert zu führen ist. Risse im Material, die bei Brandbeanspruchung entstehen, werden ausschließlich implizit innerhalb des materialspezifischen Berechnungsansatzes durch die effektiven temperaturabhängigen Materialkennwerte berücksichtigt. Das Berechnungsmodell ist aktuell auf eine maximale Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten beschränkt.

Als Beispiel ist in Abbildung 7-1 der Querschnitt einer Holztafelkonstruktion inklusive Ständer und Fugen dargestellt. Zudem sind die verschiedenen Wege des Wärmedurchgangs durch das Bauteil markiert. Die Konstruktion aus Weg zwei und vier ist für das Berechnungsverfahren maßgebend, da die Fugen einen negativen Einfluss auf den Raumabschluss haben können. Es kommt aufgrund der niedrigen Temperaturen im brandabgewandten Raum zusammen mit dem Überdruck aufgrund hoher Temperaturen auf der brandzugewandten Bauteilseite zu einer Sogwirkung innerhalb der Konstruktion. [1]

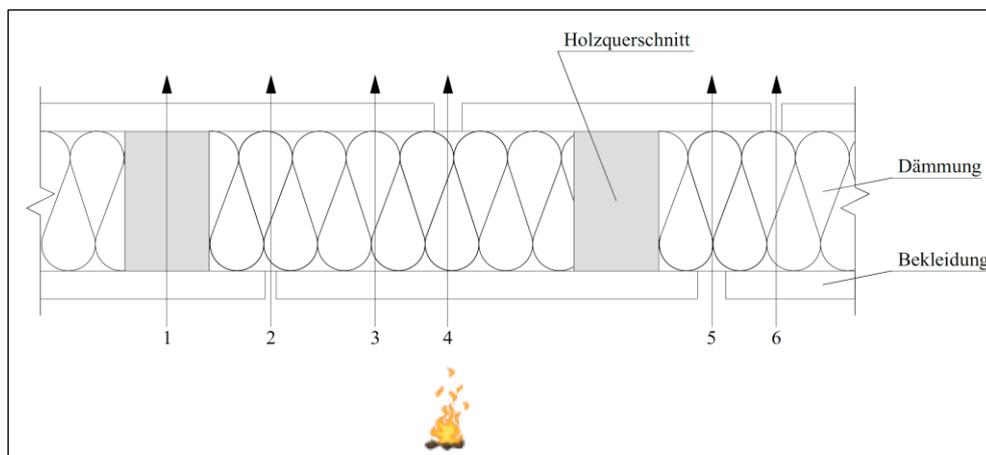


Abbildung 7-1: verschiedene Wege des Wärmedurchgangs durch eine Holzkonstruktion

Der vierte Weg gibt den Verlauf des zu berechnenden Wärmedurchgangs vor. Hierfür müssen die einzelnen Anteile der Bauteilschichten an der Isolationszeit berechnet werden. Diese Zeit lässt sich durch Addition aller Schutzzeiten der einzelnen Lagen zusammen mit der Isolationszeit der brandabgewandten Schicht entsprechend Gleichung Gl. 7-1 ermitteln. Sofern die berechnete Isolationszeit kleiner als die erforderliche Feuerwiderstandsdauer ist, kann von einer raumabschließenden Funktion des gesamten Bauteils ausgegangen werden.

$$t_{ins} = \sum t_{prot,i-1} + t_{ins,i} \quad \text{Gl. 7-1}$$

mit	$t_{ins}$ [min]	Isolationszeit bis zum Versagen der raumabschließenden Funktion des gesamten Bauteils
	$\sum t_{prot,i-1}$ [min]	Summe der Schutzzeiten der Schicht 1 bis Schicht i-1
	$t_{ins,i}$ [min]	Isolationszeit der Schicht i

In Abbildung 7-2 sind die Lagen einer mehrschichtigen Konstruktion und deren Funktionen beschriftet. Schicht i ist am weitesten von der Brandeinwirkung entfernt und hat eine „isolierende“ Wirkung, wohingegen alle anderen Schichten diese Lage vor den Temperaturen des Brandes schützen. [1]

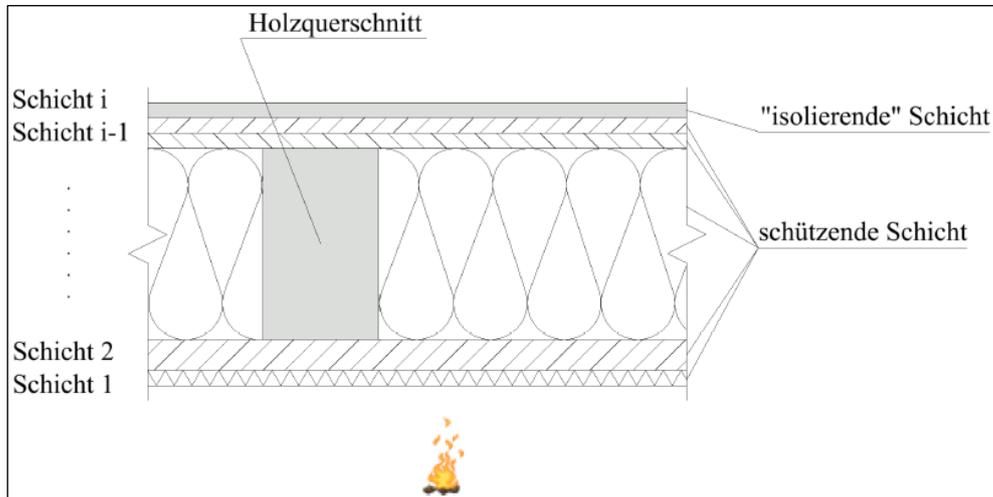


Abbildung 7-2: Einteilung des Bauteils in schützende und isolierende Schichten nach Schleifer [1]

### 7.2.3 Ermittlung der Schutzzeiten

Die Schichten 1 bis i-1 aus Abbildung 7-2 wirken schützend und werden daher als Brandschutzbekleidungen angesehen. Sie bewahren die Schicht i vor Entzündung, Verkohlung sowie sonstigen Brandschäden und müssen daher die Brandschutzfunktion K einhalten. Durch die Funktion K wird definiert, dass die mittlere Temperaturerhöhung auf der feuerabgewandten Seite der betrachteten Brandschutzschicht höchstens 250°C betragen darf. Außerdem soll die maximale Temperaturerhöhung an keinem Punkt den Wert von 270°C überschreiten. (DIN EN 13501-2) Da von einer anfänglichen Raumtemperatur von 20°C ausgegangen wird, betragen die Temperaturkriterien folglich 270°C und 290°C, wobei das Kriterium der mittleren Temperaturerhöhung von 270°C maßgebend ist. Die Zeitdauer bis diese Temperatur auf der Rückseite der betrachteten brandbeanspruchten Schicht erreicht ist, wird als Schutzzeit bezeichnet. Im Modell wird angenommen, dass nach dieser Zeit die jeweilige Schicht abfällt und die nächste Lage brandbeansprucht wird. [1]

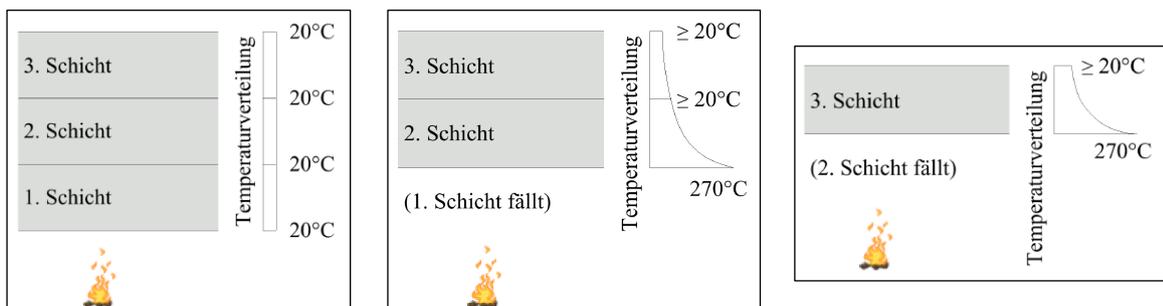


Abbildung 7-3: Ermittlung der Schutzzeiten  $t_{\text{prot},1}$  und  $t_{\text{prot},2}$  nach Schleifer [1]

In Abbildung 7-3 ist die Ermittlung von Schutzzeiten graphisch dargestellt. Das linke Bild illustriert die Temperaturverteilung des beispielhaften Bauteilquerschnitts vor Brandbeginn. Alle drei Schichten weisen durchgängig die Raumtemperatur von 20°C auf. In der mittleren Abbildung wird zunächst die erste Schicht direkt brandbeansprucht. Nach der Zeit  $t_{prot,1}$  ist die Temperatur von 270°C auf der brandabgewandten Seite dieser Lage erreicht und die Schicht fällt ab. Die dahinterliegenden Lagen sind bereits vorgewärmt. Im rechten Bild der Abbildung 7-3 ist das Temperaturkriterium hinter der zweiten Schicht nach der Zeit  $t_{prot,2}$  erreicht und die Lage fällt ab. Die Schutzzeiten aller Schichten, mit Ausnahme der „isolierenden“ Lage  $i$ , werden nach Gleichung Gl. 7-2 addiert.

$$\sum t_{prot,i-1} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + \dots + t_{prot,i-1} \quad \text{Gl. 7-2}$$

Da die Schutzzeiten im Berechnungsmodell nicht tatsächlich gemessen werden, ist Gleichung Gl. 7-3 heranzuziehen. Die Zeit einer beliebigen Schutzschicht  $i$  wird dabei durch Vorwärmung von davor- und dahinterliegenden Schichten sowie durch die Grundschutzzeit der betrachteten Lage beeinflusst. Die Grundschutzzeit ist vom Material und der Schichtdicke abhängig. [1]

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad \text{Gl. 7-3}$$

mit	$t_{prot,i}$ [min]	Schutzzeit der schützenden Schicht $i$
	$t_{prot,0,i}$ [min]	Grundschutzzeit der Schicht $i$
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht $i$ aus dem Einfluss davorliegender Schichten $i$
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht $i$ aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht $i$ , falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht $i$ ; falls keine Fuge: $k_{j,i} = 1,0$

#### 7.2.4 Ermittlung der Isolationszeit

Die Isolationszeit  $t_{ins,i}$  ist die Zeit, die bis zum Erreichen der mittleren Temperaturerhöhung von 140°C oder einer maximalen Temperaturerhöhung von 180°C auf der feuerabgewandten Seite der Schicht  $i$  verstreicht [37]. Diese Schicht ist vom Feuer am weitesten entfernt und hat eine „isolierende“ Funktion. Da eine Raumtemperatur von 20°C im Modell angenommen wird, betragen die Grenztemperaturen an der Oberfläche 160°C, beziehungsweise 200°C. Der Wert von 160°C ist maßgebend, wobei die Zeit bis zum Erreichen dieser Grenztemperatur durch die davorliegenden Schichten und die Grundisolationszeit der Lage  $i$  beeinflusst wird. Analog zur Grundschutzzeit variiert die Grundisolationszeit ebenfalls je nach Schichtdicke und Material.

$$t_{ins,i} = (t_{ins,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad \text{Gl. 7-4}$$

mit	$t_{ins,i}$ [min]	Isolationszeit der schützenden Schicht i
	$t_{ins,0,i}$ [min]	Grundisolationszeit der Schicht i
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten i
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i} = 1,0$

### 7.2.5 Ermittlung der Grundzeiten und Positionsbeiwerte

In der Dissertation von Schleifer [1] wird für jedes betrachtete Material eine Gleichung zur Berechnung der Grundschutzzeit, der Grundisolationszeit und der Positionsbeiwerte entwickelt. Die Gleichungen werden durch Temperaturberechnungen mithilfe eines bereits verifizierten FE-Modells erstellt. Der Aufbau des Modells variiert für die verschiedenen Analysen, jedoch entsprechen die definierten Randbedingungen, die Elementtypen und die Beiwerte des Wärmetransports stets dem ursprünglichen Modell. Die Materialkennwerte sind je nach Material der untersuchten Schicht verschieden. Die jeweils verwendeten geometrischen Aufbauten des FE-Modells zur Ermittlung der Grundzeiten sind in Abbildung 6-11 dargestellt.

Das Modell zur Bestimmung der materialspezifischen Grundisolationszeit ist im linken Bild der Abbildung 6-11 veranschaulicht und besteht nur aus dem untersuchten Plattenmaterial. Alle davorliegenden Schichten sind in der Idealisierung bereits abgefallen und es befinden sich keine weiteren Schichten auf der dahinterliegenden Seite. Somit wird für die Temperaturberechnung mit der Finite-Elemente-Simulation der Wärmeübergang sowie Wärmeleitung im Material berücksichtigt. Die zulässige maximale Grenztemperatur auf der feuerabgewandten Seite der Schicht beträgt  $160^\circ\text{C}$  [1]. Im rechten Modell der Abbildung 6-11 wird eine 19 Millimeter dicke Spanplatte auf der feuerabgewandten Seite der betrachteten Schicht dargestellt. Die Spanplatte tritt als Ersatz aller dahinterliegenden Schichten auf, wodurch in dieser Simulation der Wärmeabtransport durch Strahlung und Konvektion über die Spanplatte hinaus stattfindet. Als zulässige maximale Grenztemperatur wird am Übergang zwischen der untersuchten Schicht und der Spanplatte  $270^\circ\text{C}$  definiert, was dem Kriterium der zulässigen Grenztemperatur hinter einer Brandschutzbekleidung gemäß DIN EN 13501-2 [5] entspricht. Mit Zeitpunkt des Erreichens der jeweiligen Grenztemperatur in der Simulation wird die gesuchte Grundzeit ermittelt.

Analog zur Berechnung der Grundzeiten wird für die Ermittlung der Positionsbeiwerte und der Zeitdifferenz  $\Delta t_i$  das Finite-Elemente-Modell umgestellt und weitere Temperaturberechnungen durchgeführt. Die Positionsbeiwerte  $k_{pos,exp}$  und  $k_{pos,unexp}$  beziehen den Einfluss davor- und dahinterliegender Schichten in das Berechnungsmodell von Schleifer [1] ein. Die Zeitdifferenz  $\Delta t_i$  wird zur Isolations- und Schutzzeit addiert, wenn die betrachtete Schicht durch eine

Gipsplatte des Typs F oder durch eine Gipsfaserplatte vor der Brandeinwirkung geschützt wird.

Anhand der FE-Analysen werden materialspezifische Gleichungen zur Berechnung der Grundzeiten, der Positionsbeiwerte und der Zeitdifferenz abgeleitet. Die Gleichungen sind beispielsweise von der Schichtdicke und der Rohdichte des Materials abhängig und werden durch Versuche verifiziert.

### 7.3 Umsetzung

Das durch das Schrumpfen ausgelöste Abfallen der Dämmung vor Erreichen der festgelegten Grenztemperaturen, wird durch einen separaten Beiwert berücksichtigt. Dieser neue Beiwert  $k_{fall}$  wird anhand von Großbrandversuchen bestimmt und erfasst damit ein in den Kleinbrandversuchen nicht vollständig erfassbares Phänomen. Dies kann bei der Bestimmung der Schutzzeit wie folgt berücksichtigt werden:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \cdot k_{fall} \quad \text{Gl. 7-5}$$

mit	$t_{prot,i}$ [min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i
	$t_{prot,0,i}$ [min]	Grundsutzzeit der Schicht i
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$
	$k_{fall}$ [-]	Beiwert zur Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens infolge Schrumpfens

Vorab müssen jedoch die Schutzzeiten von Zellulose und flexibler Holzfaserdämmung für den material- und dickenabhängigen Wärmedurchgang ohne Berücksichtigung des vorzeitigen Abfallens ermittelt werden.

Beim Vergleich der mittels des additiven Modells gemäß Schleifer [1] errechneten Schutzwirkung von Zellulose oder flexibler Holzfaserdämmung mit den Schutzzeiten aus Großbrandversuchen aus der Database (vgl. Kapitel 5), kann die Funktionsgleichung für  $k_{fall}$  bestimmt werden.

Bei druckfesten Holzfaserplatten kann das vorzeitige Abfallen durch entsprechende Befestigungen nicht festgestellt werden.

## 7.4 Entwickelte Gleichungen

### 7.4.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die Schutzzeiten und Beiwerte für die flexible Holzfaserdämmung, die druckfeste Holzfaserdämmung und den Zellulose-Einblasdämmstoff zur Anwendung des Berechnungsmodells zum Nachweise der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen gemäß Schleifer [1] vorgestellt. Auf Basis von Kleinbrandversuche, in welchen das Abfallen des Dämmstoffes durch konstruktive Maßnahmen (Drahtgitter, Latten, Gipsplatten an den Rändern des Dämmstoffes) verhindert wurde (vgl. Kapitel 3.3.2) werden effektive Materialkennwerte (vgl. Kapitel 4) abgeleitet. Mit Hilfe dieser Materialkennwerte werden thermische FE-Simulationen durchgeführt, die zur Bestimmung der Gleichungen von Schutzzeiten ohne Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens des Dämmstoffes gemäß Schleifer führen (vgl. Kapitel 7.2.2).

### 7.4.2 Flexible Holzfaserdämmung

Auf Grundlage der im Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen konnten für die Ermittlung der Schutzzeit und zugehörigen Beiwerte ohne Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens folgende Gleichungen für flexible Holzfaserdämmstoffe mit einer Nennrohdichte von  $50 \text{ kg/m}^3$  hergeleitet werden. Gleichungen für die Isolationszeit als letzte Schicht wurden infolge der praktischen Relevanz nicht erarbeitet. Für  $t_{\text{ins},i}$  soll hier der Wert von 0 angenommen werden.

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad \text{Gl. 7-6}$$

$$t_{\text{prot},0,i} = 0,56 \cdot h_i - 22 \quad \text{für } 40 \text{ mm} \leq h_i \leq 240 \text{ mm} \quad \text{Gl. 7-7}$$

$$k_{\text{pos,exp},i} = 1 - 0,9 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} \quad \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-8}$$

$$k_{\text{pos,exp},i} = 0,2 \cdot \frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}} - 0,03 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} + 0,2 \quad \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-9}$$

$$k_{\text{pos,unexp},i} = 0,97 \cdot h^{-0,077} \quad \text{für Schichten mit dahinterliegende Dämmungen} \quad \text{Gl. 7-10}$$

$$k_{\text{pos,unexp},i} = 1 \quad \text{für Schichten mit dahinterliegende Bekleidung/Beplankung} \quad \text{Gl. 7-11}$$

$$\Delta t_i = 0,04 \cdot t_{prot,i-1} - 0,012 \cdot t_{prot,0,i} + 0,33 \quad \text{für Deckenkonstruktionen} \quad \text{Gl. 7-12}$$

$$\Delta t_i = 0,22 \cdot t_{prot,i-1} - 0,1 \cdot t_{prot,0,i} + 9 \quad \text{für Wandkonstruktionen} \quad \text{Gl. 7-13}$$

$$k_{j,i} = 1 \quad \text{für vollausgedämmten Hohlraum und durch Bekleidung oder Dämmung hinterlegt} \quad \text{Gl. 7-14}$$

mit	$t_{prot,i}$ [min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i
	$t_{prot,0,i}$ [min]	Grundschutzzeit der Schicht i
	$\sum t_{prot,i-1}$ [min]	Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schichten i-1
	$t_{prot,i-1}$ [min]	Schutzzeit der davorliegenden Schicht i-1
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$
	$h_i$ [mm]	Dicke der Schicht i

### 7.4.3 Druckfeste Holzfaserdämmung

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes bestand in der Erarbeitung von Bestimmungsgleichungen zur Beschreibung der brandschutztechnischen Schutz- und Isolationszeit für druckfeste Holzfaserdämmungen nach DIN EN 13171 [40] unabhängig vom Hersteller. Demzufolge wurden alle durch die TU München durchgeführten Brandversuche und jene Großbrandversuche aus der Database (vgl. Kapitel 5) mit druckfesten Holzfaserdämmungen einander gegenübergestellt. Hierfür wurde unterschieden, ob die Dämmstoffe im Nass- oder im Trockenverfahren hergestellt wurden.

Um die Versuchsdaten miteinander vergleichen zu können, wurden zunächst nur jene Versuche betrachtet, bei welchen die druckfeste Holzfaserdämmplatte auf der brandzugewandten Seite lag. Innerhalb dieser Versuchsdaten wurden die Messstellen auf der Rückseite der Holzfaserdämmplatte herangezogen, um deren Versagenszeiten zu definieren. Für eine direkt brandbeanspruchte druckfeste Holzfaserdämmplatte, hinterlegt durch eine Bekleidung bzw. einen Holzständer, findet keine Vorerwärmung durch davorliegende Schichten statt. Der Positionsbeiwert  $k_{pos,unexp}$  bei dahinterliegender Bekleidung bzw. einem dahinterliegenden Holzständer ist mit 1 sowie der Fugenbeiwert infolge der Hinterlegung mit  $k_{j,i} = 1$  anzusetzen. Dadurch wird eine Schutzzeit verglichen, die der Grundschutzzeit  $t_{prot,0}$  gleichgesetzt werden kann.

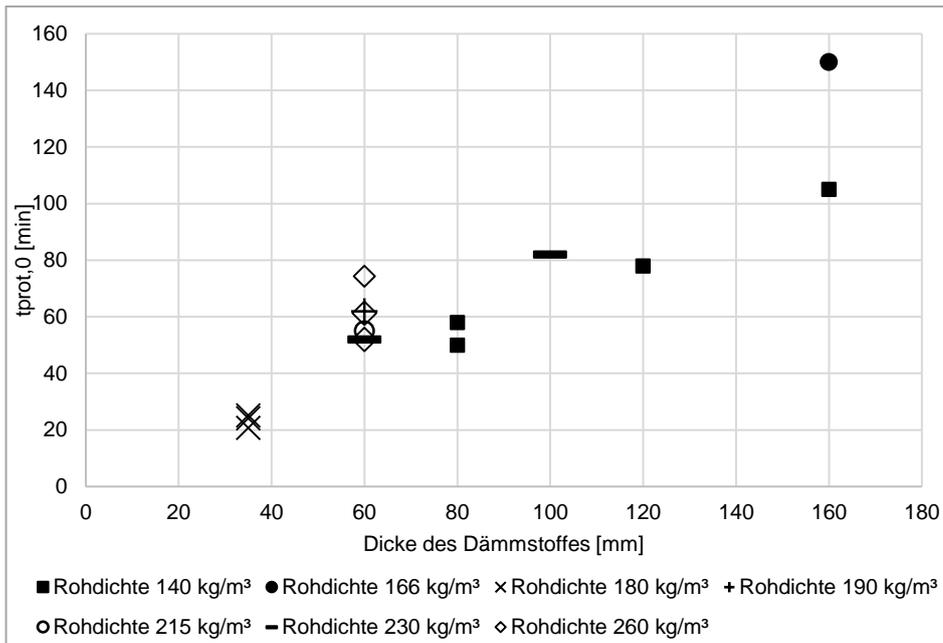


Abbildung 7-4: Schutzzeit/Grundschutzzeit der druckfesten Holzfaserplatte hergestellt im Nassverfahren aus verschiedenen Großbrandversuchen in Abhängigkeit der Rohdichte

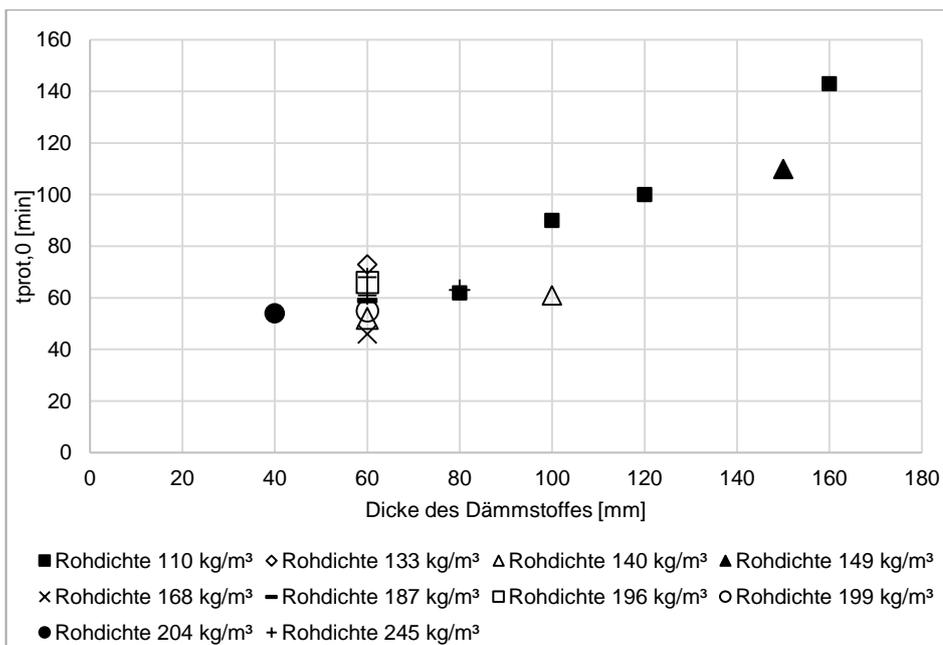


Abbildung 7-5: Schutzzeit/Grundschutzzeit der druckfesten Holzfaserplatte hergestellt im Trockenverfahren aus verschiedenen Großbrandversuchen in Abhängigkeit der Rohdichte

Die häufigsten Versuche mit druckfesten Holzfaserdämmungen auf der brandzugewandten Seite wurden unabhängig vom Herstellungsverfahren mit einer Dämmdicke von 60 mm durchgeführt. Beim Vergleich der Versuche mit Dämmdicken von 60 mm erreichen im Nassverfahren hergestellte Platten Schutzzeiten von 52 bis 74 Minuten (vgl. Abbildung 7-4). Im Trockenverfahren hergestellte Holzfaserplatten erreichen hierbei Schutzzeiten von 46 bis 73 Minuten (vgl. Abbildung 7-5).

Bei Betrachtung der Schutzzeiten für eine Dämmstoffdicke kann nach Meinung der Autoren keine eindeutige Rohdichteabhängigkeit festgestellt werden, da Holzfaserdämmplatten mit geringeren Rohdichten teilweise höhere Schutzzeiten bieten als Holzfaserplatten mit höheren Rohdichten. Zudem können weitere Einflüsse, wie Art des Hinterlegungsmaterials oder vor allem die Fugenausführung eine Auswirkung auf die Schutzzeiten besitzen und so zur großen Varianz beitragen.

Um den Einfluss des Herstellungsverfahrens betrachten zu können, wurden nur jene Versuche herangezogen, in welchen die druckfeste Holzfaserdämmung dem Feuer direkt zugewendet war und durch eine 19 mm dicke Spanplatte hinterlegt war.

In Abbildung 7-6 ist zu erkennen, dass es keinen signifikanten Unterschied für die Grundschutzzeit in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens (Nass- oder Trockenverfahren) gibt.

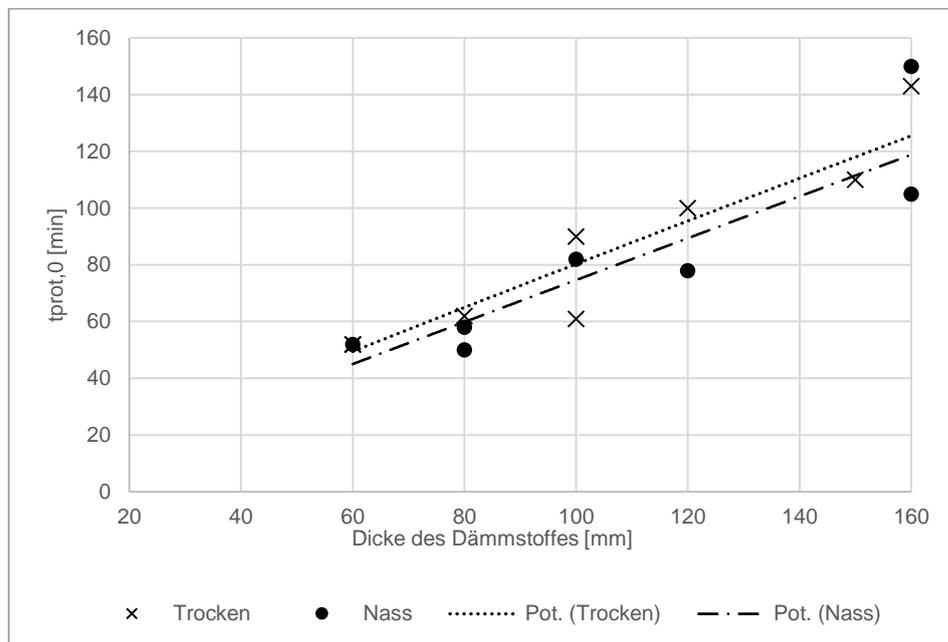


Abbildung 7-6: Grundschutzzeiten der druckfesten Holzfaserdämmung EN 13171 in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens (Nass- oder Trockenverfahren)

Demzufolge konnte eine lineare Funktion zur Beschreibung der Grundschutzzeiten unabhängig vom Herstellungsverfahren und der Rohdichte in Abbildung 7-7 erarbeitet werden.

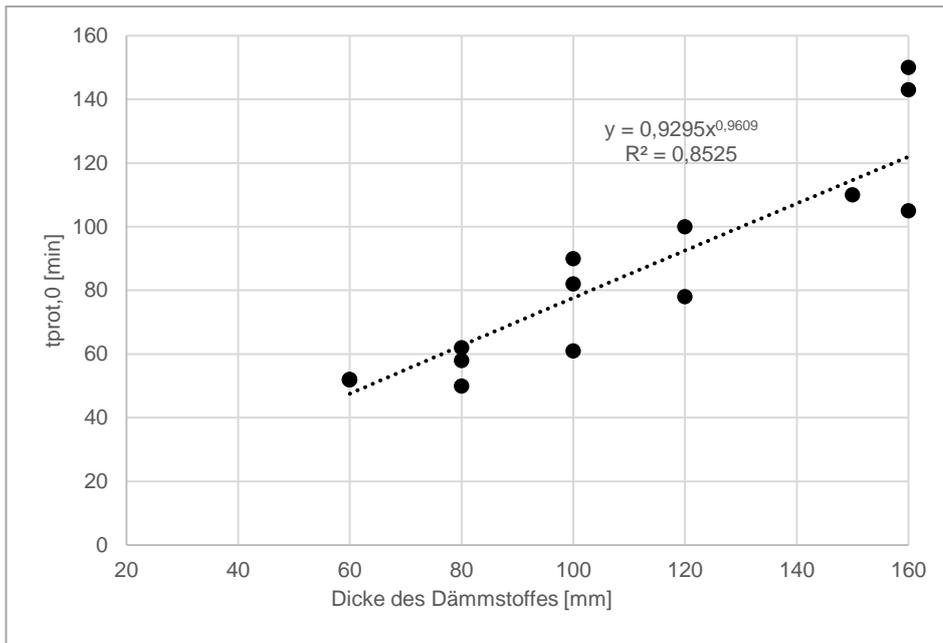


Abbildung 7-7: Grundschutzzeiten aller druckfesten Holzfaserplatten aus vorliegenden Versuchen

Auf Basis dieser linearen Funktion (vgl. Abbildung 7-7) wurden die effektiven Materialkennwerte zur Wärmeleitfähigkeit nochmals validiert und damit die Werte aus Kapitel 6.2.2.3 und 6.2.2.4 auf Grundlage der erweiterten Datenlage optimiert. Anschließend wurden die thermischen FE-Simulationen zur Ermittlung der Berechnungsgleichungen mit den Werten zur Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 7-1 durchgeführt. Die spezifische Wärmespeicherkapazität und der Masseverlust in Abhängigkeit der Temperatur entsprachen hierbei den eingesetzten Werten für druckfeste, im Nassverfahren hergestellten Holzfaserdämmplatten (vgl. 6.2.2.4).

Auf dieser Grundlage wurden folgende Schutzzeit und zugehörige Beiwerte hergeleitet.

Tabelle 7-1: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für alle druckfesten Holzfaserdämmungen

T [°C]	λ [W/(m K)]				
	35 mm	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm
20	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
60	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
80	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
100	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
110	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
120	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
150	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
200	0,132	0,132	0,132	0,132	0,132
400	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
600	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
800	3,3	3,0	2,4	2,0	1,75
1.200	20	20	20	20	20

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \tag{Gl. 7-15}$$

$$t_{prot,0,i} = 0,93 \cdot h_i^{0,96} \tag{Gl. 7-16}$$

für 40 mm ≤ h<sub>i</sub> ≤ 240 mm

$$k_{pos,exp,i} = 1 - \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-17}$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,28 \cdot \left( \frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{0,9} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-18}$$

$$k_{pos,unexp,i} = 0,52 \cdot h^{0,125} \quad \text{für Schichten mit dahinterliegende Dämmungen} \quad \text{Gl. 7-19}$$

$$k_{pos,unexp,i} = 1 \quad \text{für Schichten mit dahinterliegende Bekleidung/Beplankung} \quad \text{Gl. 7-20}$$

$$\Delta t_i = 0,08 \cdot t_{prot,i-1} - 0,016 \cdot t_{prot,0,i} + 1,33 \quad \text{für Deckenkonstruktionen} \quad \text{Gl. 7-21}$$

$$\Delta t_i = 0,24 \cdot t_{prot,i-1} - 0,093 \cdot t_{prot,0,i} + 4,28 \quad \text{für Wandkonstruktionen} \quad \text{Gl. 7-22}$$

$$k_{j,i} = 1 \quad \text{mit Bekleidung oder Dämmung hinterlegt} \quad \text{Gl. 7-23}$$

mit	$t_{prot,i}$ [min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i
	$t_{prot,0,i}$ [min]	Grundsutzzeit der Schicht i
	$\sum t_{prot,i-1}$ [min]	Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schichten i-1
	$t_{prot,i-1}$ [min]	Schutzzeit der davorliegenden Schicht i-1
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$
	$h_i$ [mm]	Dicke der Schicht i

Für die Ermittlung der Isolationszeit und zugehörige Beiwerte wurden folgende Gleichungen bestimmt.

$$t_{ins,i} = (t_{ins,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad \text{Gl. 7-24}$$

$$t_{ins,0,i} = 0,47 \cdot h_i^{1,1} \quad \text{Gl. 7-25}$$

$$k_{pos,exp,i} = 1 - \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{ins,0,i}} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{ins,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-26}$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,28 \cdot \left( \frac{t_{ins,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{0,9} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{ins,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-27}$$

$$k_{j,i} = 0,4 \quad \text{Bekleidung mit Nut Feder Ausführung} \quad \text{Gl. 7-28}$$

mit	$t_{ins,i}$ [min]	Isolationszeit der schützenden Schicht i
	$t_{ins,0,i}$ [min]	Grundisolationszeit der Schicht i
	$\sum t_{prot,i-1}$ [min]	Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schichten i-1
	$t_{prot,i-1}$ [min]	Schutzzeit der davorliegenden Schicht i-1
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$
	$h_i$ [mm]	Dicke der Schicht i

Angaben zur Zeitdifferenz  $\Delta t$  für Decken und Wände innerhalb der Bestimmung der Isolationszeit wurden infolge der praktischen Relevanz dieser Wertes nicht gemacht. Vereinfacht können hier jedoch die Angaben aus Gleichung Gl. 7-21 und Gl. 7-22 angewendet werden.

#### 7.4.4 Zellulose

Auf Grundlage der im Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen konnten für die Ermittlung der Schutzzeit und zugehöriger Beiwerte, ohne Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens, für Zellulosedämmstoff folgende Gleichungen abgeleitet werden. Vergleichbar zur flexiblen Gefachdämmung aus Holzfaser, wird infolge der nicht gegebenen praktischen Relevanz von Zellulosedämmstoff als letzte Schicht keine Bestimmungsgleichung für die Isolationszeit angegeben. Es soll  $t_{ins,i}$  zu 0 angenommen werden.

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \quad \text{Gl. 7-29}$$

$$t_{prot,0,i} = 19 \cdot \left( \frac{h_i}{60} \right)^{0,98} \quad \text{für } 40 \text{ mm} \leq h_i \leq 240 \text{ mm} \quad \text{Gl. 7-30}$$

$$k_{pos,exp,i} = 1 - \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-31}$$

$$k_{pos,exp,i} = 0,27 \cdot \left( \frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right)^{1,1} \quad \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \quad \text{Gl. 7-32}$$

$$k_{pos,unexp,i} = 0,53 \cdot h^{0,08}$$

für Schichten mit dahinterliegende Dämmungen Gl. 7-33

$$k_{pos,unexp,i} = 1$$

für Schichten mit dahinterliegende Bekleidung/Beplankung Gl. 7-34

$$\Delta t_i = 0,04 \cdot t_{prot,i-1} - 0,012 \cdot t_{prot,0,i} + 0,33$$

für Deckenkonstruktionen Gl. 7-35

$$\Delta t_i = 0,22 \cdot t_{prot,i-1} - 0,1 \cdot t_{prot,0,i} + 2,5$$

für Wandkonstruktionen Gl. 7-36

$$k_{j,i} = 1$$

für vollausgedämmten Hohlraum und durch Bekleidung oder Dämmung hinterlegt Gl. 7-37

mit	$t_{prot,i}$ [min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i
	$t_{prot,0,i}$ [min]	Grundschutzzeit der Schicht i
	$\sum t_{prot,i-1}$ [min]	Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schichten i-1
	$t_{prot,i-1}$ [min]	Schutzzeit der davorliegenden Schicht i-1
	$k_{pos,exp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
	$k_{pos,unexp,i}$ [-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
	$\Delta t_i$ [min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
	$k_{j,i}$ [-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$
	$h_i$ [mm]	Dicke der Schicht i

## 7.5 Validierung

### 7.5.1 Flexible Holzfaserdämmung

Um das entwickelte Rechenverfahren bezüglich der praktischen Anwendbarkeit überprüfen zu können, wurden alle zur Verfügung stehenden Großbrandversuche mit flexiblen Holzfaserdämmungen gesammelt und analysiert.

33 Großbrandversuche von Wandkonstruktionen mit Dämmstoffdicken von 60 mm bis 200 mm enthielten auswertbare Daten, die entweder die Schutzzeit  $t_{\text{prot},i}$  der einzelnen Dämmstoffschicht oder/und die Zeit für das Versagen im Hinblick auf den Raumabschluss oder die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion enthielten.

29 Versuchen von Wandkonstruktionen dienten zum Vergleich der Schutzzeiten des Gefachdämmstoffs aus den Großbrandversuchen mit den errechneten Schutzzeiten aus dem Handrechenverfahren (vgl. Abbildung 7-8). Hierbei wird zwischen Ausführung mit Holzfaser-Einblasdämmstoff und Holzfaserdämmmatten unterschieden, jeweils für die Gefachbreiten von 625 mm und 833 mm.

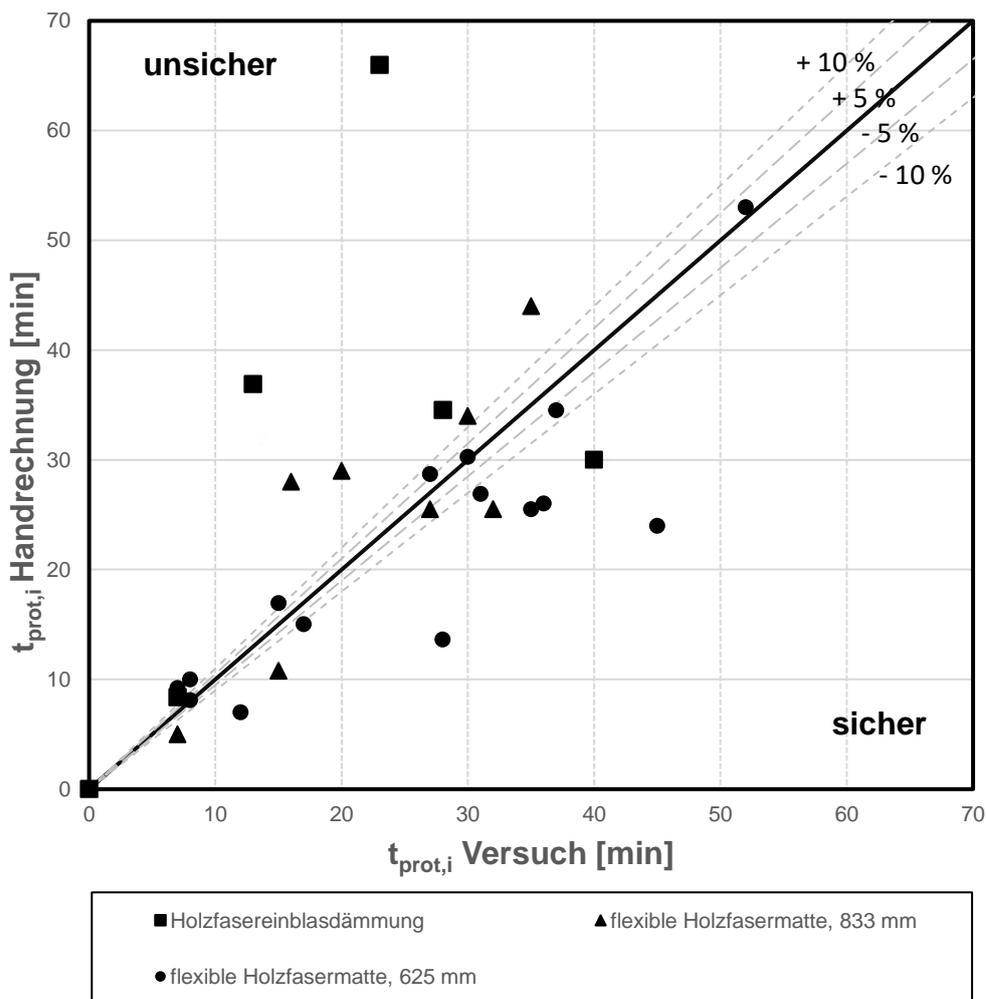


Abbildung 7-8: Vergleich der Schutzzeiten von flexibler Holzfaserdämmung in Wandkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten der Holzfaserdämmung in Wandkonstruktionen im Handrechenverfahren

Die Winkelhalbierende teilt die Bereiche oberhalb und unterhalb der Geraden in Abbildung 7-8 in eine „sichere“ Seite und „unsichere“ Seite ein. Das bedeutet, dass das Handrechenverfahren für alle Punkte/Versuche, die sich oberhalb der Geraden befinden, auf der „unsicheren“ Seite liegt und die Versuchsergebnisse überschätzt werden.

Für alle Punkte/Versuche, die sich unterhalb der Geraden befinden, liegt das Handrechenverfahren auf der „sicheren Seite“ und die Versuchsergebnisse werden unterschätzt.

Nahezu alle Versuchs-/Berechnungsergebnisse mit Holzfaserdämmmatte und Achsraster der Gefache mit 625 mm befinden sich in unmittelbarer Nähe der Winkelhalbierenden. Für diese Versuche liefert das Handrechenverfahren damit nahezu identische Ergebnisse für die Schutzzeit der Holzfaserdämmmatte wie in den Großbrandversuchen. Im Hinblick auf Holzfasereinblasdämmung und Achsmaß der Gefache größer 625 mm liegen für den vorgestellten Ansatz größere Abweichungen zur unsicheren Seite hin vor. Hierbei muss festgehalten werden, dass diese Randbedingungen zu einem schnelleren Herausfallen des Dämmstoffes beitragen können, was auch aus der vorliegenden Streuung der Versuchsergebnisse für Holzfasereinblasdämmung ersichtlich ist.

Da keines der Versuchsergebnisse mit mattenförmiger Holzfaserdämmung und Achsmaß der Gefache von 625 mm durch das Rechenverfahren überschätzt wird, kann der  $k_{\text{fall}}$ -Faktor für alle Wandkonstruktionen gleich 1 gesetzt werden. Demzufolge entsprechen die Ergebnisse aus den Kleinbrandversuchen, auf deren Basis die Bestimmungsgleichungen abgeleitet wurden, den Großbrandversuchen, innerhalb der zugehörigen Randbedingungen. Es ist davon auszugehen, dass innerhalb der Kleinbrandversuche bereits heiße Gase über die Flanken hinter die Dämmung strömten und kein direkter Wärmedurchgang durch die ungestörten Gefachflächen stattfand (vgl. Abbildung 7-9).

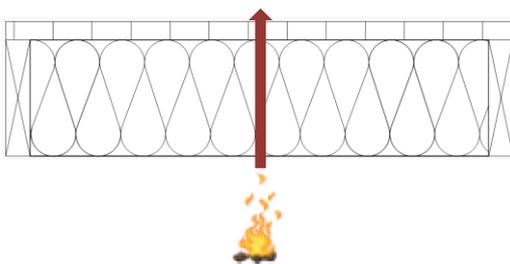


Abbildung 7-9: a) Direkter Wärmedurchgang durch das Bauteil

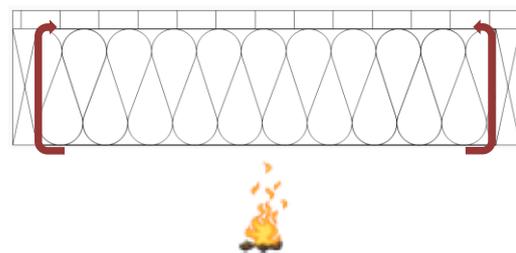


Abbildung 7-10: b) Heiße Gase strömen über die Flanken hinter die Dämmung infolge des Schrumpfen des Dämmstoffes

Zur Validierung der Isolationszeiten  $t_{\text{ins}}$  der gesamten Konstruktion aus dem Handrechenverfahren wurden Großbrandversuche von Wandkonstruktionen mit flexibler Holzfaser als Hohlraumdämmung herangezogen. Zusätzlich wurden ebenso die vorliegenden Versuchsergebnisse mit Holzfasereinblasdämmung weiterführend mit betrachtet, (vgl. Abbildung 7-11).

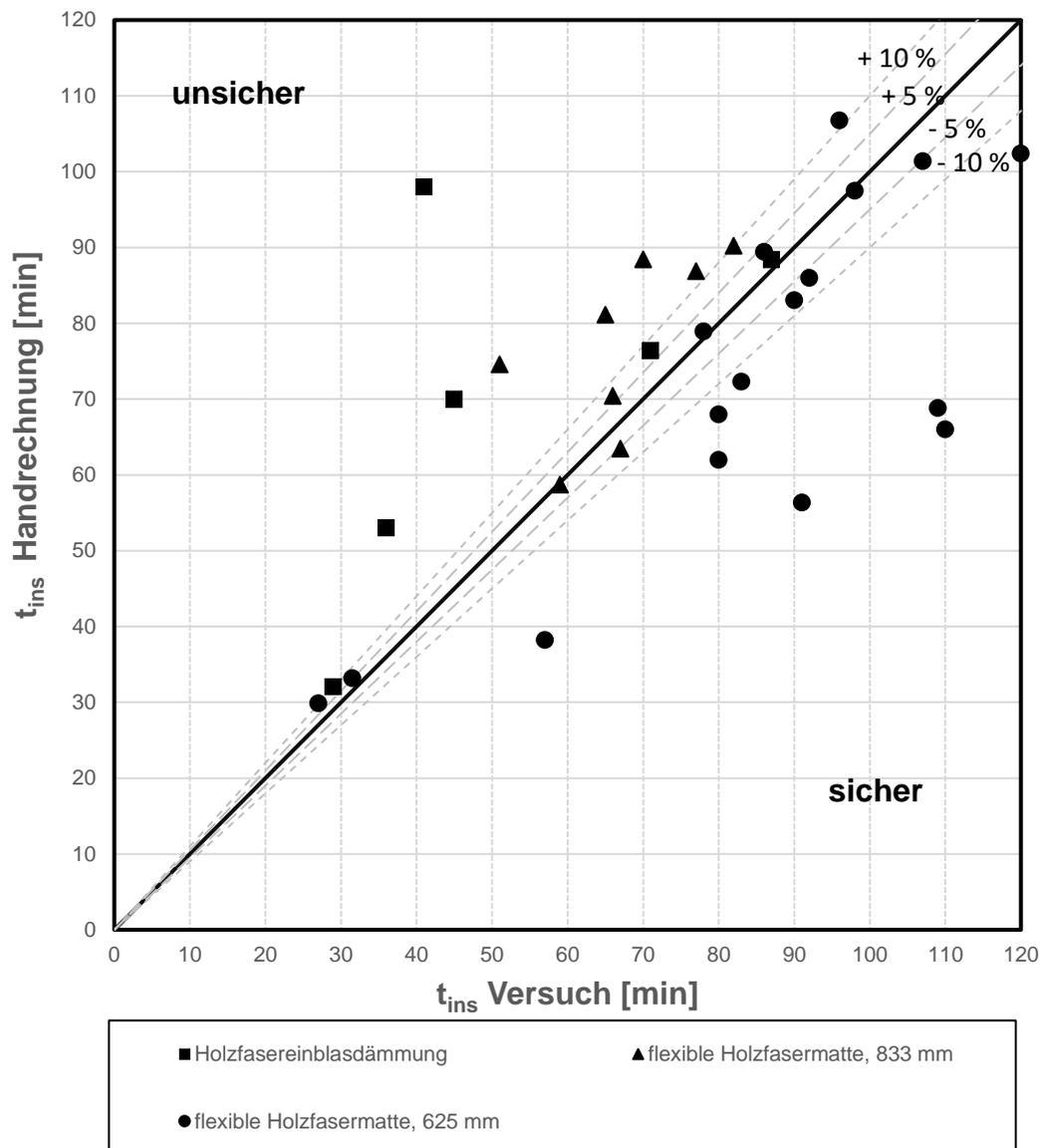


Abbildung 7-11: Vergleich der Gesamtisoliationszeit  $t_{\text{ins}}$  von Wandkonstruktionen mit flexiblen Holzfaserdämmungen im Versuch mit der Gesamtisoliationszeit im Handrechenverfahren

Die Gegenüberstellung der Isolationszeiten aus den Versuchen mit flexiblen Holzfaserdämmungen (Achismaß Gefache 625 mm) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Berechnungsverfahren (vgl. Abbildung 7-11). Die Versuche mit Achsmaßen von 835 mm zeigen dagegen vorrangig Ergebnisse auf der unsicheren Seite. Dies muss jedoch auf den Umstand zurückgeführt werden, dass all diese Versuche auf Tragfähigkeit versagten und so eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Berechnungsverfahrens nicht vollumfänglich gegeben ist. Zudem muss angemerkt werden, dass das genutzte Berechnungsverfahren [1] bisher auf die Anwendbarkeit für 625 mm breite Gefache ausgelegt war, da es auf dieser Basis entwickelt wurde. Die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens auf 833 mm breite Gefache ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht nachgewiesen. Dies ist Gegenstand

weiterer Untersuchungen der Autoren. Für diejenigen Versuche, die mit Holzfasereinblasdämmung ausgeführt wurden, wurden im Berechnungsverfahren teils deutlich höhere Isolationszeiten erzielt als im Versuch nachgewiesen werden konnte. Um hier eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen an flexiblen Holzfasermatten herzustellen, wird zusätzlich die Anwendung mechanischer Sicherungsmaßnahmen notwendig, um ein vorzeitiges Herausfallen zu verhindern.

Für Deckenkonstruktionen mit flexiblen Holzfaserdämmstoffen sind der Datenbank nur wenige Großbrandversuche zu entnehmen.

Innerhalb dieser Versuche fiel die Holzfaserdämmung, wie bereits in den Kleinbrandversuchen festgestellt, bereits wenige Minuten nach Versagen der davorliegenden Schicht ab. Daher wird auf Basis der vorliegenden Datenlage für Deckenkonstruktionen mit flexiblen Holzfaserdämmungen pauschal ein  $k_{fall}$ -Faktor von 0,1 empfohlen.

Nachfolgende Gleichung soll für die Berechnung der Schutzzeit einer flexiblen Holzfaserdämmung in Verbindung mit den Ergebnissen aus Abschnitt 7.4.2 herangezogen werden:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \cdot k_{fall} \quad \text{Gl. 7-38}$$

mit	$k_{fall} = 0,1$	für Deckenkonstruktionen	Gl. 7-39
	$k_{fall} = 1$	für Wandkonstruktionen	Gl. 7-40

$t_{prot,i}$	[min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i	
$t_{prot,0,i}$	[min]	Grundschutzzeit der Schicht i	
$k_{pos,exp,i}$	[-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten	
$k_{pos,unexp,i}$	[-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten	
$\Delta t_i$	[min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min	
$k_{j,i}$	[-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i}=1,0$	
$k_{fall}$	[mm]	Faktor zur Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens der Schicht i infolge Schrumpfens	

### 7.5.2 Druckfeste Holzfaserdämmplatten

Für Wandkonstruktionen, die unverputzte druckfeste Holzfaserdämmplatten enthielten, wurden alle Daten der Datenbank ausgewertet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für Schutzzeiten aus dem Rechenverfahren mit den Ergebnissen aus den Großbrandversuchen ist Abbildung 7-12 versuchsspezifisch für die jeweiligen Holzfaserdämmplatten zu entnehmen.

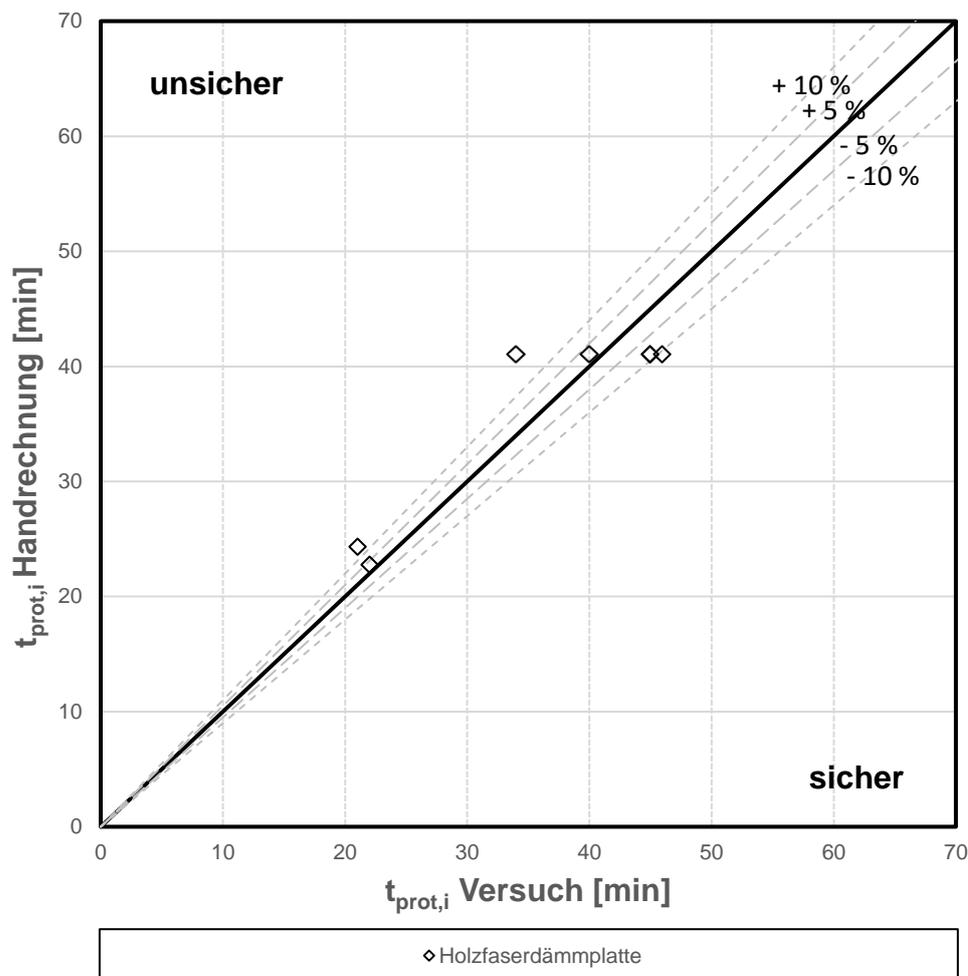


Abbildung 7-12: Vergleich der Schutzzeiten von druckfester Holzfaserdämmung (unverputzt) in Wandkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten von Wandkonstruktionen im Handrechenverfahren

Die allgemeingültige Gleichung zur Bestimmung der Schutzzeit für druckfeste Holzfaserplatten, unabhängig vom Herstellungsverfahren und der Rohdichte, führt zu obiger Streuung entlang der Winkelhalbierenden. Da die Ergebnisse an der Winkelhalbierenden liegen, wird das Handrechenverfahren als hinreichend genau betrachtet.

Beim Vergleich der Gesamtisulationszeiten  $t_{\text{ins}}$  aus Großbrandversuchen von Wandkonstruktionen, die unverputzte druckfeste Holzfaserdämmungen enthielten mit den Ergebnissen des Handrechenverfahrens konnten acht Versuche aus der Datenbank herangezogen werden. Die restlichen Versuche wurden aufgrund eines Versagens auf Tragfähigkeit vor Erreichen

der zulässigen Grenztemperaturen für den Raumabschluss auf der brandabgewandten Seite abgebrochen, bzw. waren mit Putzschicht ausgeführt.

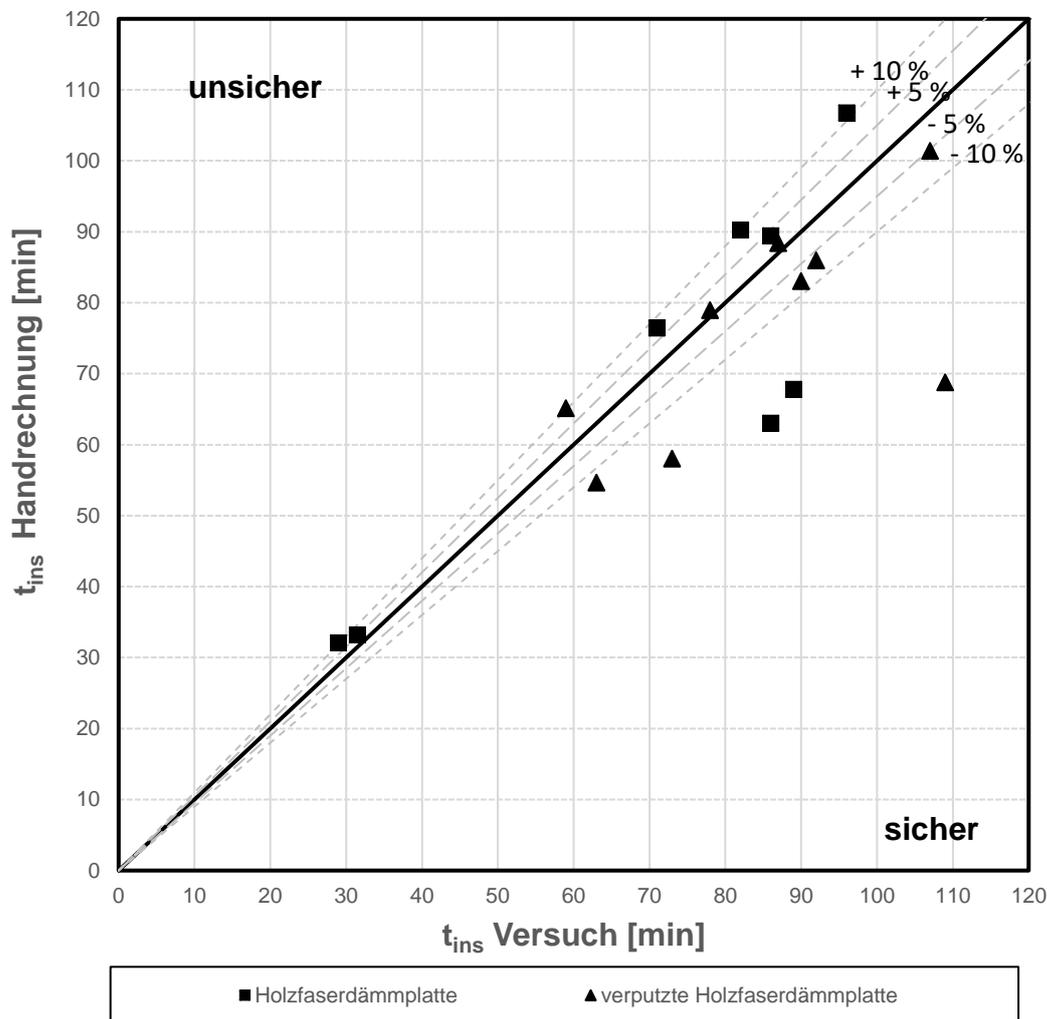


Abbildung 7-13: Vergleich der Gesamtisoliationszeit  $t_{ins}$  von Wandkonstruktionen mit druckfesten Holzfaserdämmungen im Versuch mit der Gesamtisoliationszeit im Handrechenverfahren

Die Gegenüberstellung der Isolationszeiten aus den Versuchen zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Rechenverfahren (vgl. Abbildung 7-13). Für diejenigen Versuche, die vorzeitig auf Tragfähigkeit versagten, wurden im Rechenverfahren höhere Isolationszeiten erzielt als im Versuch nachgewiesen werden konnte.

Die Einführung eines Faktor  $k_{render}$  von 1,25, der die Schutzzeit der Holzfaserdämmplatte bei vorhandener Putzschicht um 25 % erhöht führt zu einer guten Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit den Versuchsergebnissen (vgl. Abbildung 7-13). Die in den Versuchen üblicherweise vorhandene Putzschicht, mit einer Dicke von ca. sechs bis zehn Millimetern, weist analog wie eine Bekleidungs Lage einen zusätzlichen Beitrag zur Schutzzeit der Holzfaserdämmplatte auf, der vereinfacht pauschal berücksichtigt werden kann. Der zusätzliche Beitrag einer in der Praxis üblicherweise darüber hinaus vorliegenden Putzschichtdicke kann

zum aktuellen Zeitpunkt infolge der geringen Datenlage nicht quantifiziert werden, ist jedoch Gegenstand weiterführender Untersuchungen der Autoren.

Als weitere Randbedingung für die Gültigkeit dieser Aussage ist der Unterstützungsabstand der Holzfaserdämmplatten auf maximal 625 mm begrenzt. Für größere Unterstützungsabstände wurden Ergebnisse auf der unsicheren Seite festgestellt, was darauf zurückgeführt werden kann, dass vor allem der sich im Fugenbereich auswirkende Schrumpfungsprozess zum Erwärmungsprozess auf der Rückseite beiträgt.

### 7.5.3 Zellulosedämmung

Zur Überprüfung der ermittelten Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Schutzzeiten von Zellulosedämmstoffen wurden Großbrandversuche aus der Datenbank (siehe Kapitel 5) ausgewertet. 22 Großbrandversuche an Wandkonstruktionen und sieben Deckenkonstruktionen enthielten auswertbare Daten. Diese umfassten entweder die Schutzzeit  $t_{\text{prot},i}$  der einzelnen Dämmstoffschicht oder/und die Zeit für das Versagen im Hinblick auf den Raumabschluss oder die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion.

18 Versuche an Wand- und Deckenkonstruktionen dienten zum Vergleich der Schutzzeiten der Zellulosedämmung aus den Großbrandversuchen mit den errechneten Schutzzeiten aus dem Handrechenverfahren (vgl. Abbildung 7-14). Hierbei wurde zwischen der Gefachbreite und der Art der Zellulosedämmung (Einblasdämmung und Zellulosematte) differenziert.

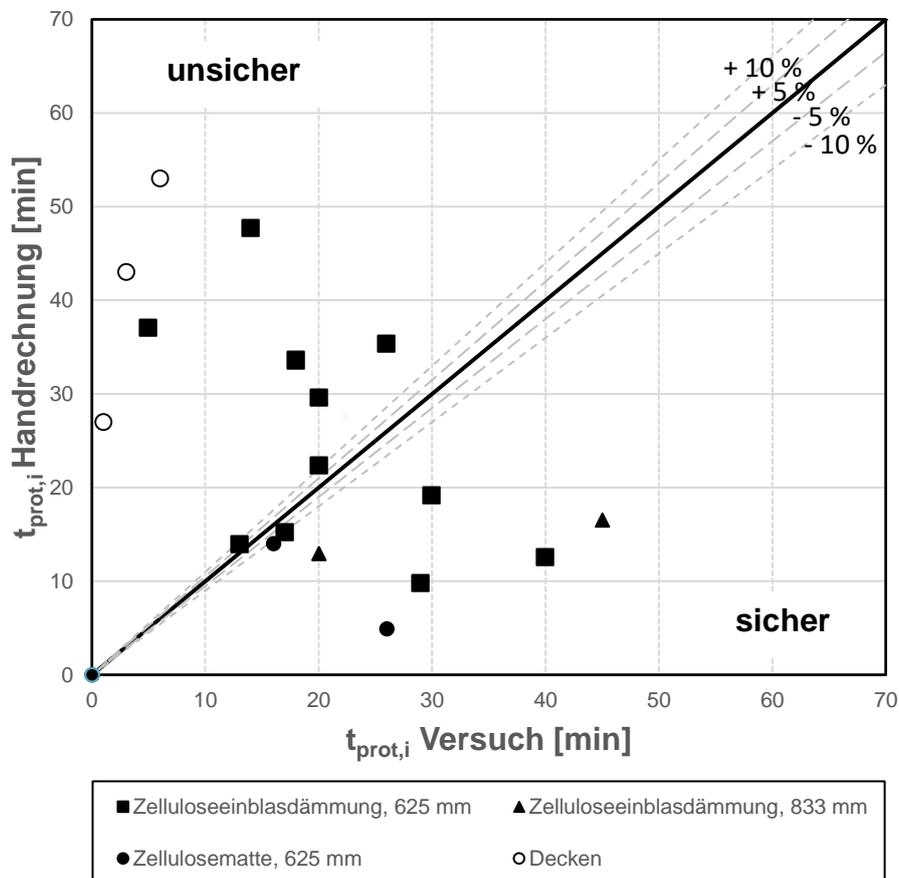


Abbildung 7-14: Vergleich der Schutzzeiten von Zelluloseeinblasdämmung in Wand- und Deckenkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten im Handrechenverfahren

In Abbildung 7-14 erkennt man zwischen den Versuchsergebnissen der der Schutzzeiten der Dämmung aus Wandkonstruktionen eine weite Streuung. Dies macht einerseits den Einfluss der Einbringart und Gefachbreite deutlich, andererseits zeigt es, dass selbst bei der vorrangig ausgeführten Zelluloseeinblasdämmung mit Gefachbreiten von 625 mm weiterführende Faktoren vorliegen können, die Einfluss auf die Schutzzeit der Dämmung besitzen. In den durchgeführten Versuchen hat sich hier die Qualität des Einbringens als ein wesentlicher Faktor

bestätigt, der maßgeblich zu großen Streuungen trotz gleicher Versuchskonfiguration beitragen kann. Für die Versuchsergebnisse auf der unsicheren Seite, bei denen die Schutzzeit des Dämmstoffes durch das Berechnungsverfahren deutlich überschätzt wird, wird die zulässige Grenztemperatur nicht durch einen direkten Wärmedurchgang durch die Dämmung, sondern durch das partielle oder vollständige Abfallens des Dämmstoffes erreicht (vgl. Abbildung 7-9). Um dem vorzeitigen Erreichen der zulässigen Temperaturen infolge des Schrumpfens beziehungsweise Abfallens des Dämmstoffes Rechnung zu tragen, soll für Wandkonstruktionen, deren errechnete Schutzzeit größer als 20 Minuten beträgt, eine Reduzierung der Schutzzeit mittels des  $k_{\text{fall}}$ -Faktor eingeführt werden. Dieser Faktor drückt aus, dass die volle Schutzwirkung des Dämmstoffes infolge langer Vorerwärmung nicht ausgenutzt werden kann, bzw. damit das Risiko eines vorzeitigen Versagens durch Herausfallen anwächst.

Das deutlich bessere Abschneiden von Versuchsergebnissen der sicheren Seite im Vergleich zum Handrechenverfahren kann zum aktuellen Zeitpunkt auf eine besonders gute Einblasqualität des Dämmstoffes zurückgeführt werden.

Nach Einführung eines  $k_{\text{fall}}$ -Faktors für errechnete Schutzzeiten größer als 20 Minuten, liegen alle Versuche nahezu auf der Winkelhalbierenden oder auf der sicheren Seite.

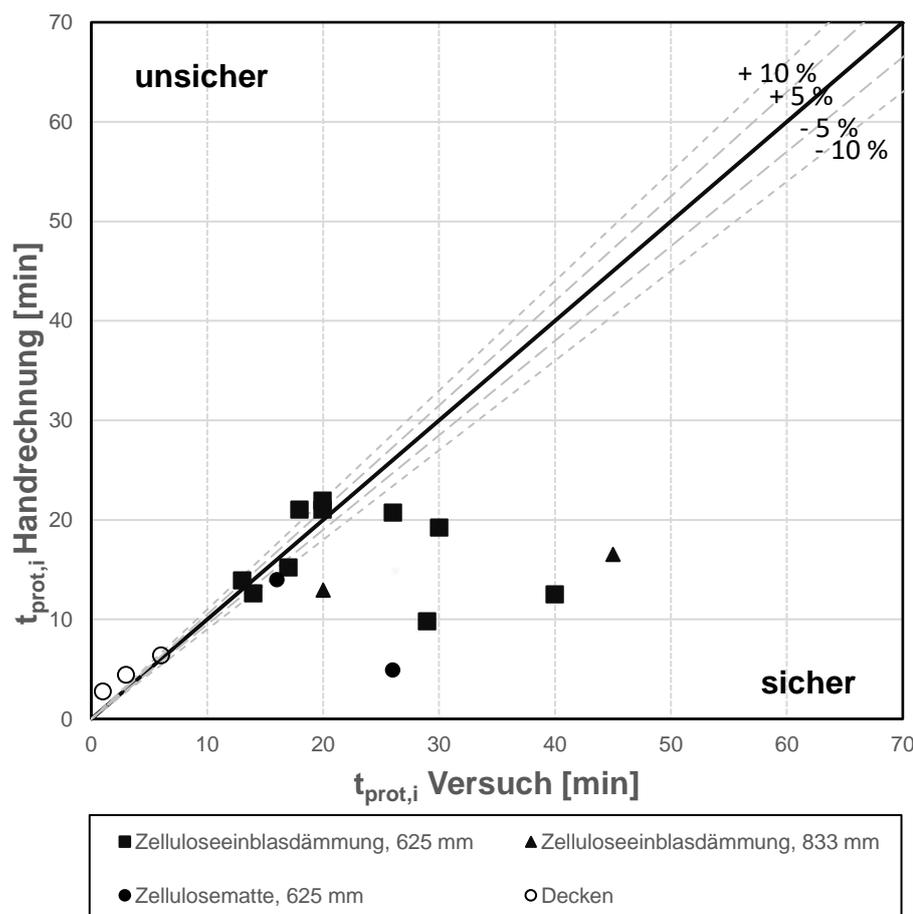


Abbildung 7-15: Vergleich der Schutzzeiten von Zelluloseeinblasdämmung in Wand- und Deckenkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten im Handrechenverfahren nach Einführung eines  $k_{\text{fall}}$  Faktors

Für die Gegenüberstellung der Isolationszeiten  $t_{ins}$  der Gesamtkonstruktion entnommen aus Großbrandversuchen von Wand- und Deckenbauteilen, die Zellulosedämmung als Hohlraumdämmung enthielten, mit den Ergebnissen des Handrechenverfahrens, wurden insgesamt 29 Versuche aus der Datenbank analysiert.

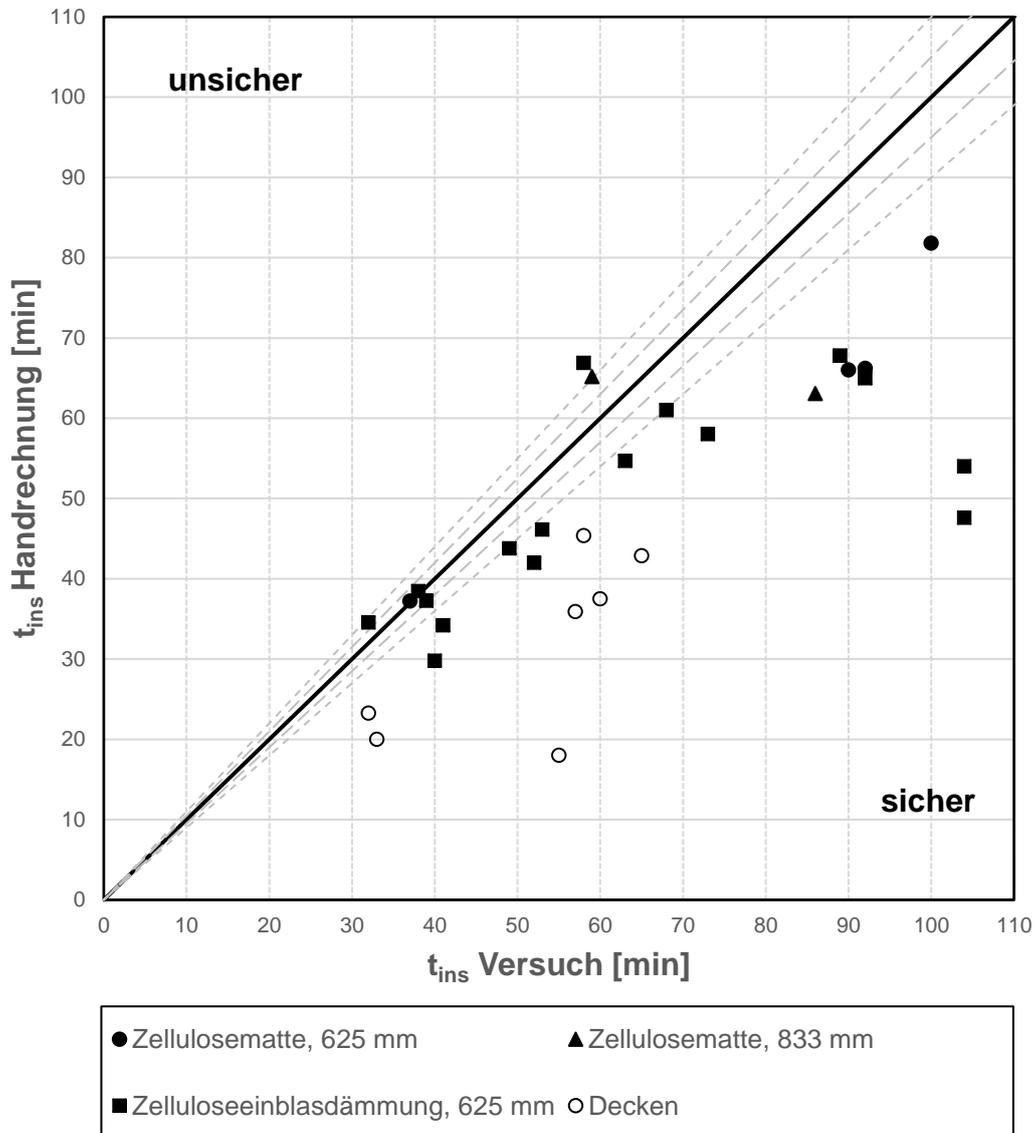


Abbildung 7-16: Vergleich der Gesamtisolationszeit  $t_{ins}$  von Wand- und Deckenkonstruktionen mit Zelluloseeinblasdämmung im Versuch mit der Gesamtisolationszeit im Handrechenverfahren

Abbildung 7-16 zeigt eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse für die Isolationszeit  $t_{ins}$  der Wandkonstruktionen mit den Ergebnissen aus den Rechenverfahren, sofern der  $k_{fall}$  Faktor für den Gefachdämmstoff berücksichtigt wird. Neben der Einblasdämmung sind über den vorgestellten Berechnungsansatz so auch Zellulosematten mit abgedeckt. Lediglich in einem Versuch überschätzt das Berechnungsverfahren das Versuchsergebnis um mehr als 10 %. Hier ist jedoch anzumerken, dass dieser Versuch auf Tragfähigkeit versagte und so nur eine sehr bedingte Aussagefähigkeit für das Gesamtergebnis besitzt.

Für Deckenkonstruktionen mit Zellulosedämmstoff sind der Datenbank nur sieben verwertbare Großbrandversuche zu entnehmen.

Innerhalb dieser Versuche fiel die Zellulosefaserdämmung bereits wenige Minuten nach Versagen der davorliegenden Schicht ab. Daher wird für Deckenkonstruktionen mit Zellulosedämmstoff ein  $k_{fall}$ -Faktor von 0,1 empfohlen (vgl. Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16).

Nachfolgende Gleichung wird für die Berechnung der Schutzzeit eines Zelluloseeinblasdämmstoffes bzw. für Zellulosematten in Verbindung mit den Ergebnissen aus Abschnitt 7.4.4 empfohlen:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i} \cdot k_{fall} \quad \text{Gl. 7-41}$$

mit  $k_{fall} = 0,1$  für Deckenkonstruktionen Gl. 7-42

$$k_{fall} = 1 - 0,027 \cdot (t_{prot,i} - 20) \quad \text{für Wandkonstruktionen mit } 20 \text{ min} < t_{prot,i} \leq 57 \text{ min} \quad \text{Gl. 7-43}$$

$t_{prot,i}$	[min]	Schutzzeit der schützenden Schicht i
$t_{prot,0,i}$	[min]	Grundschutzzeit der Schicht i
$k_{pos,exp,i}$	[-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss davorliegender Schichten
$k_{pos,unexp,i}$	[-]	Positionsbeiwert der Schicht i aus dem Einfluss dahinterliegender Schichten
$\Delta t_i$	[min]	Zeitdifferenz für die Schicht i, falls direkt durch eine Gipsplatte Typ F bzw. Gipsfaserplatte geschützt; sonst $\Delta t_i = 0$ min
$k_{j,i}$	[-]	Fugenbeiwert für die Schicht i; falls keine Fuge: $k_{j,i} = 1,0$
$k_{fall}$	[mm]	Faktor zur Berücksichtigung eines vorzeitigen Abfallens der Schicht i infolge Schrumpfens

## 8 Rechenverfahren für die Tragfähigkeit

### 8.1 Einführung

Grundsätzlich werden für die Ermittlung der Resttragfähigkeit nach Brandbeanspruchung zwei verschiedene Phasen bei einer bekleideten Holzkonstruktion unterschieden:

Die erste Phase bildet die sogenannte „Protection Phase“ (PP). Diese beschreibt die Phase, in welcher die Ständer/Balken einer Holzrahmenkonstruktion durch eine Bekleidungsschicht vor direkter Brandeinwirkung geschützt werden. In dieser Phase findet zunächst nur eine Erwärmung des Holzes statt. Erst bei Erreichen einer Temperatur von 300 °C zwischen Bekleidungslage und Holzwerkstoff setzt die Verkohlung ein. Die Dauer der Protection Phase kann je nach Wahl des Bekleidungswerkstoffes verlängert beziehungsweise verkürzt werden. Die zweite Phase bildet die „Post Protection Phase“ (PPP). Diese beginnt mit dem Versagenszeitpunkt der (letzten) Bekleidungslage. Ab diesem Zeitpunkt erfährt das Holzbauteil eine direkte Brandbeanspruchung. Durch die Erwärmung während der Protection Phase findet im Vergleich zu von Beginn an direkt brandbeanspruchten Holzbauteilen ein erhöhter Abbrand statt. Nach Bildung einer entsprechenden Dicke der Holzkohleschicht reduziert sich dieser Abbrand wieder auf den standardmäßigen Abbrand des Baustoffes. Eine genaue Erläuterung und Berücksichtigung dieses Vorganges findet sich in nachfolgenden Kapiteln.

### 8.2 Normative Grundlagen nach DIN EN 1995-1-2

#### 8.2.1 Bemessungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2

Die DIN EN 1995-1-2 enthält ein Bemessungsverfahren im Brandfall, das einen Nachweis der baurechtlich geforderten Widerstandsdauern ermöglicht.

Die Abbrandtiefe im Holz wird dabei in Lage der 300 °C-Isotherme festgelegt, die näherungsweise den Beginn der Verkohlung des Holzes widerspiegelt.

Die Abbrandrate  $\beta_0$  definiert dabei die eindimensionale Abbrandgeschwindigkeit des Holzes. Diese wird nach DIN EN 1995-1-2 die Abbrandrate  $\beta_0$  abhängig von der Holzart (u.a. Laubholz und Nadelholz) und der charakteristischen Rohdichte bestimmt. Für Brettschichtholz und Vollholz aus Nadelholz mit einer charakteristischen Rohdichte von  $\geq 290 \text{ kg/m}^3$  liegt der Wert  $\beta_0$  bei 0,65 mm/min.

Alle erforderlichen Beiwerte zur Bestimmung der Abbrandtiefe eines Bauteils beziehen sich auf diese Abbrandrate.

Bei eindimensionalen Abbrand berechnet sich die Abbrandtiefe  $d_{\text{char},0}$  nach Gl. 8-1:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad \text{Gl. 8-1}$$

mit	$d_{char,0}$ [mm]	Bemessungswert der Abbrandtiefe bei eindimensionalem Abbrand
	$\beta_0$ [mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t$ [min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung

Bekleidungen und Dämmungen haben einen schützenden Effekt auf Ständer, Balken oder Träger in Holzrahmenkonstruktionen und verlangsamen somit die Abbrandgeschwindigkeit. Der Anhang C der DIN EN 1995-1-2 gibt Beiwerte zur Berücksichtigung der Schutzfunktion von Bekleidungen und Dämmungen von Holzständerkonstruktionen. Jedoch sind diese nur anwendbar, sofern die Hohlräume der Konstruktion mit Steinwolle oder Glaswolle vollgedämmt sind und die Schmalseiten der Ständer brandseitig durch eine Brandschutzbekleidung geschützt werden. Das Verfahren wird auf eine Normbrandbeanspruchung von 60 Minuten begrenzt.

Durch die Formbeständigkeit und somit langanhaltende Klemmwirkung der Steinwolle werden die Längsseiten des Ständers vor direkter Brandbeanspruchung auch nach Abfallen der Brandschutzbekleidung geschützt. Das sich nachteilig auswirkende Schrumpfen und Schmelzen der Glaswolle im Vergleich zum Verhalten der Steinwolle durch den ungünstigeren Schmelzpunkt werden durch entsprechende Einschränkungen nach Anhang C berücksichtigt.

Somit wird innerhalb des Verfahrens für mit Steinwolle gedämmte Konstruktionen auch nach Abfallen der Bekleidung zum Zeitpunkt  $t_f$  nur von einem eindimensionalen Abbrand ausgegangen.

Für Glaswolle wird auf der sicheren Seite ein dreiseitiger Abbrand mit Versagen der Bekleidung zum Zeitpunkt  $t_f$  angenommen.

Der Beginn des Abbrandes des geschützten tragenden Holzbauteils auf der Schmalseite setzt mit Erreichen von 300 °C zwischen Bekleidung und Holz ein. Solange das Holzbauteil noch von der Bekleidung geschützt wird, liegt eine verringerte Abbrandrate gegenüber  $\beta_0$  vor. Nach Abfallen der Brandschutzbekleidung ( $t > t_f^8$ ), ist die Abbrandrate zunächst in Bezug auf  $\beta_0$  erhöht. Nach Bildung einer 25 mm dicken Holzkohleschicht ( $t > t_a^9$ ), gleicht sich die Abbrandrate der Abbrandrate  $\beta_0$  an (vgl. Abbildung 8-1).

<sup>8</sup>  $t_f$  Zeitpunkt des Versagens der Bekleidung

<sup>9</sup>  $t_a$  Zeitpunkt des Erreichens einer Abbrandtiefe von 25 mm und darauf einsetzender unbeeinflusster Normabbrand  $\beta_0$

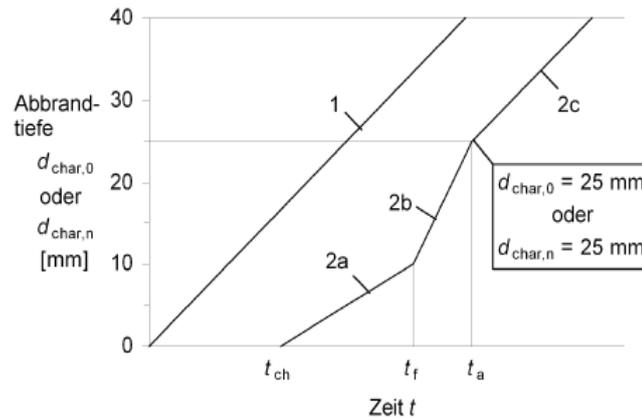


Abbildung 8-1: Darstellung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  für  $t_{ch} < t_f$  [37]

Für den Fall, dass der Abbrand des Holzbauteils erst mit Versagen der Bekleidung einsetzt, ist die vorherrschende Abbrandrate, wie auch im ersten Fall (vgl. Abbildung 8-1, Geradenabschnitt 2b), bedingt durch die lange Vorwärmzeit, zunächst größer als  $\beta_0$  (vgl. Abbildung 8-2).

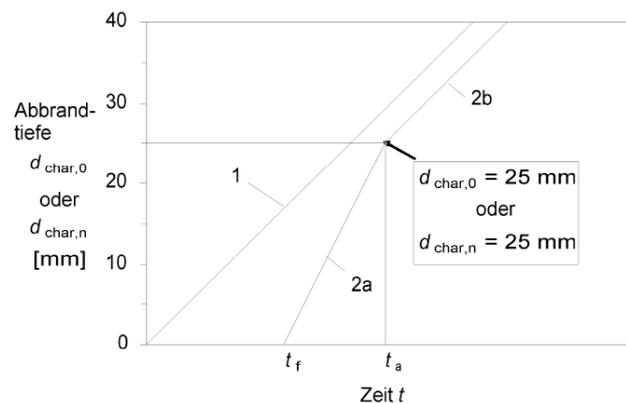


Abbildung 8-2: Darstellung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Zeit für  $t_{ch} = t_f$  und einer Abbrandtiefe von 25 mm zum Zeitpunkt  $t_a$  [37]

Für eine mit Steinwolle voll ausgedämmte Holzrahmenkonstruktion bestimmt sich die ideale Abbrandtiefe bei einem eindimensionalen Abbrand folgendermaßen:

$$d_{char,n} = k_s * k_n * \beta_0 * (k_2 * (t_f - t_{ch}) + k_3 * (t - t_f)) \quad \text{Gl. 8-2}$$

mit	$d_{char,n}$	[mm]	Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$k_s$	[-]	Querschnittsfaktor
	$k_2$	[-]	Dämmungsfaktor
	$k_3$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung eines verbleibenden Schutzes
	$k_n$	[-]	Faktor, um den unregelmäßigen Restquerschnitt in einen ideellen, rechteckigen Querschnitt umzuwandeln
	$t$	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung
	$t_{ch}$	[min]	Beginn des Abbrands des Holzbauteils
	$t_f$	[min]	Versagenszeit der Bekleidung

Abhängig vom Schutz der Bekleidung wird der Abbrand des Holzbauteils mit unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten für Protection Phase sowie Post Protection Phase berücksichtigt. In diesem Verfahren wird ein Abfallen der Dämmung nicht berücksichtigt und kann somit nur für Dämmstoffe angewendet werden, welche durch ihre thermische Formstabilität nach Abfallen der Bekleidung durch ihre Klemmwirkung in der Konstruktion verbleiben.

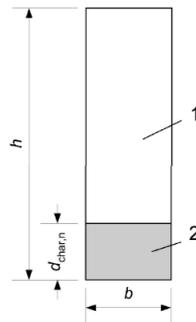


Abbildung 8-3: Ideeller verbleibender Restquerschnitt eines durch Hohlraumdämmung geschützten Holzbauteils einer Holztafel [37]

Abbildung 8-3 zeigt den ideell verbleibenden Restquerschnitt und die ideale Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  eines brandbeanspruchten Holzquerschnittes nach Gl. 8-2. Auf Grundlage des ideellen Restquerschnitts kann eine statische Heißbemessung erfolgen und der Feuerwiderstand bestimmt werden.

## 8.2.2 Grundlagen und Hintergrund zu dem Bemessungsmodell nach DIN EN 1995-1-2

### 8.2.2.1 Einteilung des Brandes in Phasen

Das Modell in DIN EN 1995-1-2 [37] zur Berechnung von tragenden Balken und Ständern in vollgedämmten Konstruktionen gründet auf experimentellen Untersuchungen und Simulationen von König und Walleij [41]. Hier wird das Brandgeschehen in zwei Phasen eingeteilt (vgl. Abbildung 8-4). Die Protection Phase wird definiert als die Zeit, während die Bekleidung das Konstruktionsholz schützt und endet mit dem Versagen  $t_{bf}$  (board failure) der Bekleidung. Sie kann abermals in eine Pre-Charring Phase und eine Charring Phase 2 unterteilt werden. In der Pre-Charring Phase erfolgt zwar eine äußere Brandeinwirkung, eine Verkohlung des Balkens/Ständers hat aber noch nicht eingesetzt. In der Charring Phase 2 hat der Abbrand des Holzquerschnitts begonnen. Nach dem anschließenden Versagen der Bekleidung ist der Bal-

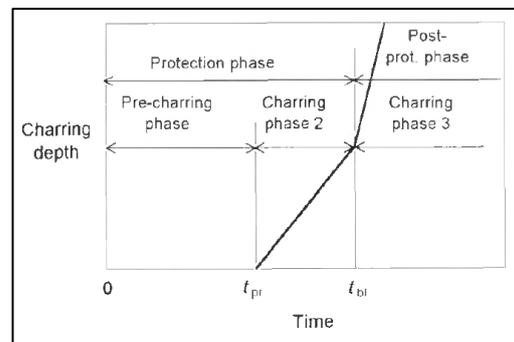


Abbildung 8-4: Abbrandphasen von geschütztem Holz [41]

ke nach dem anschließenden Versagen der Bekleidung ist der Bal-

ken/Ständer in Charring Phase 3 dem direkten Brandgeschehen ausgesetzt und erfährt aufgrund der vorangehenden Vorwärmung einen erhöhten Abbrand. Dieselbe Einteilung wurde in DIN EN 1995-1-2 [37] übernommen.

Vereinfacht wird hier eine lineare Beziehung zwischen der Verkohlungstiefe und der Zeit angenommen. In den vorliegenden Versuchen wurde überwiegend das Verhalten von Steinwolle mit einem Schmelzpunkt größer als 1000 °C und deren Schutzwirkung im Brandfall auf das Konstruktionsholz untersucht.

### 8.2.2.2 Bestimmung des Querschnittsfaktors $k_s$

Das vorliegende Berechnungsmodell nach König [41] nimmt einen eindimensionalen Abbrand an. In Abhängigkeit von der Breite des Konstruktionsholzes ändert sich die Abbrandrate in der Achse des Konstruktionsholzes. Bei schmalen Querschnitten kommt es aufgrund einer stärkeren Durchwärmung beeinflusst durch die Seiten zu einer höheren Abbrandrate als bei breiten Querschnitten. Dieser Effekt wird durch den  $k_s$ -Faktor beschrieben. Aus Messwerten der zugrundeliegenden Versuche wird dieser nach Gleichung Gl. 8-3 ermittelt:

$$k_s = \frac{\beta_1}{\beta_0} \quad \text{Gl. 8-3}$$

mit	$k_s$	[-]	Querschnittsfaktor
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$\beta_1$	[mm/min]	Abbrandrate in der Mitte des Balkens/Ständers für vollgedämmte Holztafelkonstruktionen

Die ermittelten  $k_s$ -Werte werden in Abhängigkeit der Breite angenähert durch eine Polynomfunktion in Abbildung 8-5 dargestellt. Hieraus ergibt sich eine allgemeingültige Formel zur Berechnung des  $k_s$ -Faktors, die als Tabelle in DIN EN 1995-1-2 aufgenommen wurde.

Wie in Abbildung 8-5 zu sehen ist, nimmt der Querschnittsfaktor  $k_s$  mit zunehmender

Breite des Konstruktionsholzes ab, weil der Einfluss der Durchwärmung von den Seiten geringer wird.

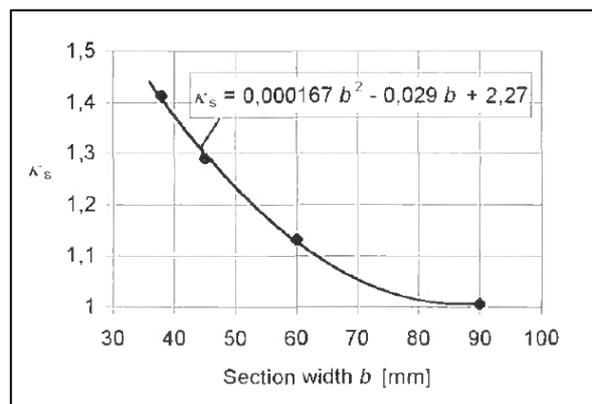


Abbildung 8-5: Querschnittsfaktor in Abhängigkeit von der Breite [41]

### 8.2.2.3 Bestimmung des Dämmfaktors $k_2$

Im Vergleich zur Abbrandrate  $\beta_0$  für ungeschütztes Holz ist die Abbrandrate während der Charring Phase 2 geringer, weil das Holz durch die Bekleidung vor direkter Beflammung geschützt ist. Dieser Effekt wird mit dem Dämmfaktor  $k_2$  berücksichtigt, der sich aus Versuchen nach König [41] wie folgt bestimmen lässt:

$$k_2 = \frac{\beta_{2,linear}}{k_s * \beta_0} \quad \text{Gl. 8-4}$$

mit	$k_2$ [-]	Dämmkoeffizient
	$k_s$ [-]	Querschnittsfaktor
	$\beta_0$ [mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$\beta_{2,linear}$ [mm/min]	Abbrandrate in der Mitte des tragenden Holzelements für vollgedämmte Holztafelkonstruktionen, während die Bekleidung intakt ist

Für die Berechnung des Dämmfaktors ist die Stoßfugenanordnung der Brandschutzbekleidung von Bedeutung. Bei einem Stoß der Bekleidung direkt über dem Konstruktionsholz wird der  $k_2$ -Faktor kleiner und resultiert somit in einer kleineren Abbrandrate, da die Verkohlung des Holzes früher einsetzt, während die Temperatur der ETK noch geringer ist. Die allgemeinen Bemessungsformeln für gestoßene und ungestoßene Bekleidung, wie sie auch in DIN EN 1995-1-2 [1] übernommen wurden, sind in Abbildung 8-6 dargestellt.

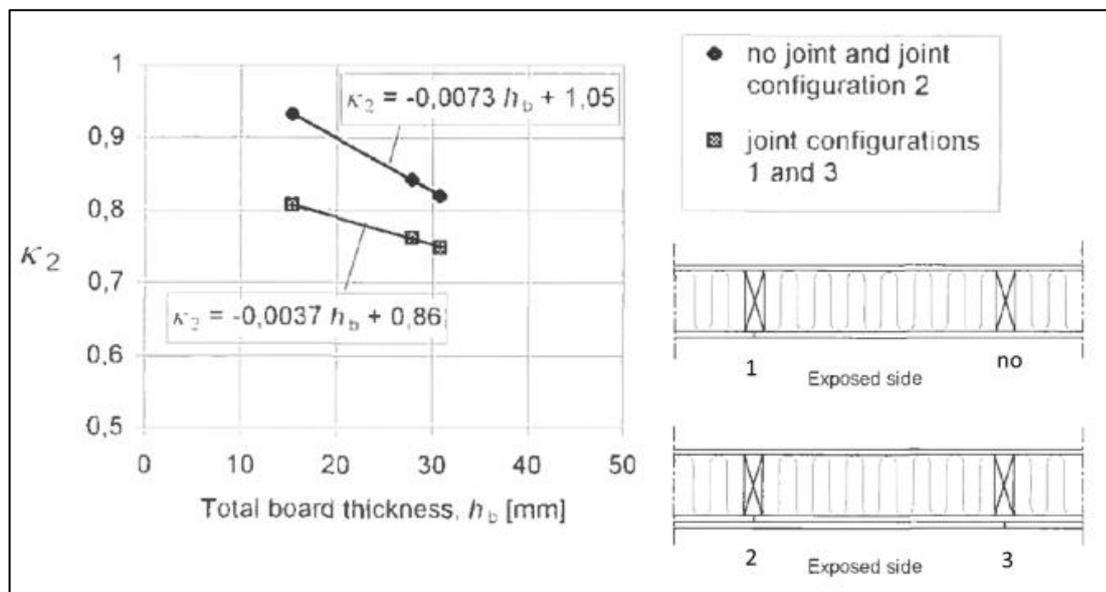


Abbildung 8-6: Dämmfaktor  $k_2$  in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke  $h_b$  [41]

Zudem ist der  $k_2$ -Faktor abhängig von der Gesamtdicke der Bekleidung. Je dicker die Bekleidung ist, desto größer ist die Schutzwirkung auf das Konstruktionsholz und umso kleiner wird die Abbrandrate.

### 8.2.2.4 Bestimmung des $k_3$ -Faktors des erhöhten Abbrandes

Die Charring Phase 3 beginnt mit dem Versagen der Brandschutzbekleidung. Solange das Konstruktionsholz durch die Bekleidung vor direkter Beflammung geschützt ist, bildet sich eine geringere Kohleschicht, als bei einem ungeschützten, direkt beflamnten Bauteil. Das Konstruktionsholz wird jedoch über die gesamte Zeitdauer der Protection Phase erwärmt (vgl. Abbildung 8-4). Die erfolgte Vorwärmung führt nach Abfall der Bekleidung zu

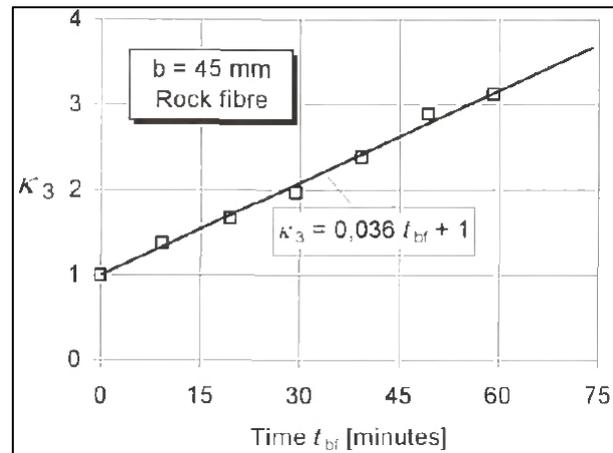


Abbildung 8-7: Post Protection Factor  $k_3$  in Abhängigkeit von der Versagenszeit der Bekleidung [41]

einem erhöhten Abbrand im Vergleich zu  $\beta_0$ . Der  $k_3$ -Faktor berücksichtigt diesen erhöhten Abbrand in der Post Protection Phase, der mit zunehmender Versagenszeit  $t_{bf}$  der Bekleidung steigt (vgl. Abbildung 8-7).

Aus Messergebnissen wird der  $k_3$ -Faktor wie folgt bestimmt:

$$k_3 = \frac{\beta_{3,linear}}{k_s * \beta_0} \quad \text{Gl. 8-5}$$

mit	$k_3$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung eines verbleibenden Schutzes
	$k_s$	[-]	Querschnittsfaktor
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$\beta_{3,linear}$	[mm/min]	Abbrandrate in der Mitte tragenden Holzelements für vollgedämmte Holztafelkonstruktionen nach Versagen der Brandschutzbekleidung

### 8.2.2.5 Bestimmung des $k_n$ -Faktors zur Umrechnung in einen ideellen Rechteckquerschnitt

Für ein anwenderorientiertes Bemessungsverfahren wird nach König [41] ein Faktor zur Umrechnung des tatsächlichen Restquerschnitts in einen vereinfachten, ideellen Rechteckquerschnitt eingeführt. Für die Ermittlung des Faktors wird die Fläche des tatsächlichen Restquerschnitts aus zugrundeliegenden Versuchen im Verhältnis zu der Fläche eines Rechteckquerschnitts mit der unbeanspruchten Breite und der gemittelten Abbrandtiefe über die gesamte Breite angenommen (siehe Abbildung 8-8).

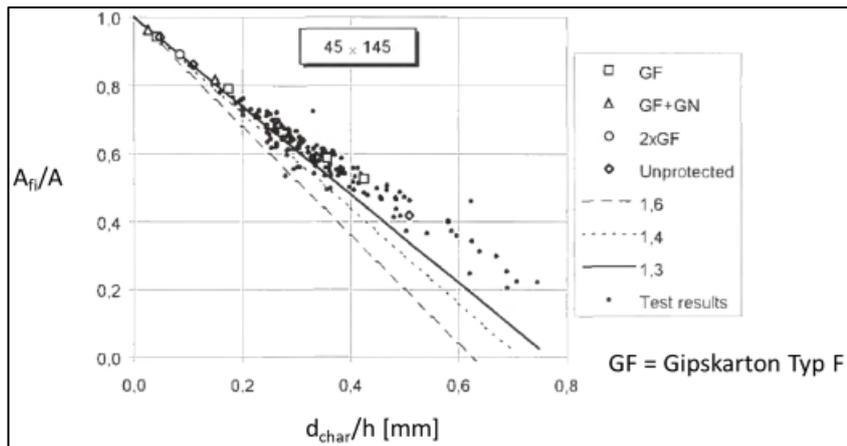


Abbildung 8-8: Verhältnis der Querschnittsfläche zum Abbrandverhältnis [41]

In weiteren Schritten wurden sowohl das Widerstandsmoment sowie das Flächenträgheitsmoment ins Verhältnis aus den Versuchsergebnissen gesetzt. (Abbildung 8-9 und Abbildung 8-10).

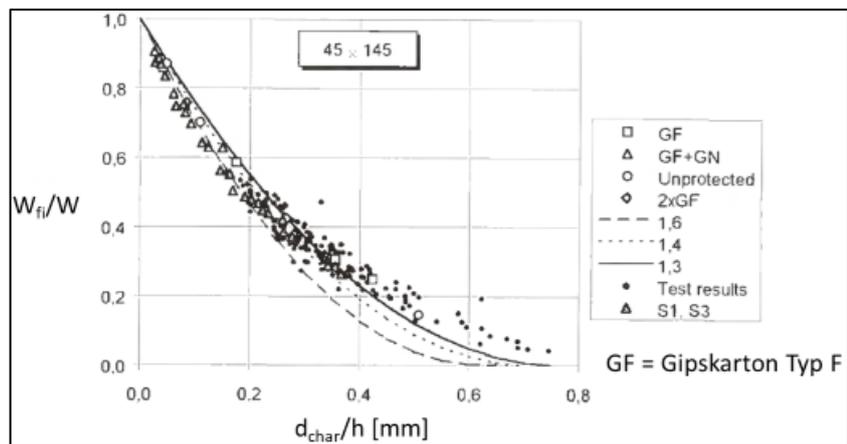


Abbildung 8-9: Verhältnis der Widerstandsmomente zum Abbrandverhältnis [41]

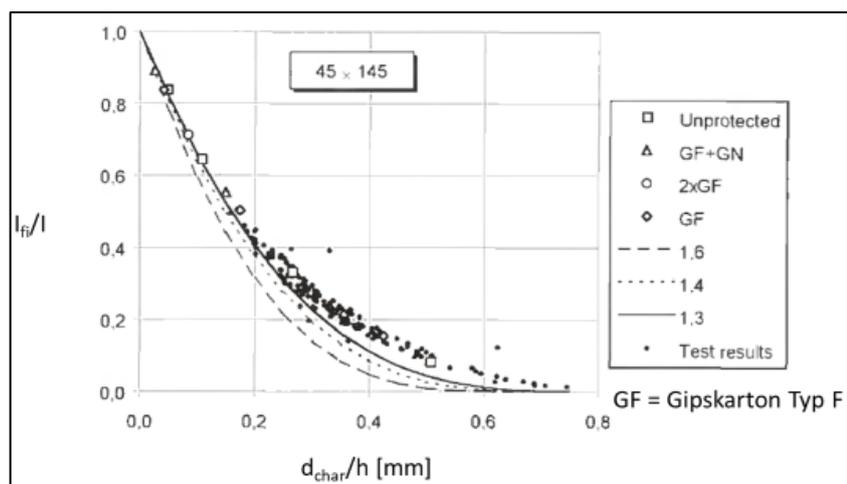


Abbildung 8-10: Verhältnis des Flächenträgheitsmomentes zum Abbrandverhältnis [41]

Es wurden mögliche  $k_n$ -Faktoren mit Werten von 1,6, 1,4 und 1,3 dargestellt. Der Wert  $k_n = 1,5$  wurde in DIN EN 1995-1-2 übernommen.

### 8.3 Rechenmodell für den Seitenabbrand von Holzrahmen gedämmt mit Glaswolle nach Technical Guideline for Europe – Fire Safety in Timber Buildings

Nach der Technical guideline for Europe - Fire safety in timber buildings [42] kann mit Hilfe eines Rechenverfahrens der Seitenabbrand von Holzbauteilen von Holzrahmenkonstruktionen, welche mit Glaswolle gedämmt sind, bestimmt werden. Dieses Rechenmodell basiert auf dem Verfahren nach DIN EN 1995-1-2 und bildet eine Erweiterung für die Post-Protection-Phase von Konstruktionen, welche mit Glas- anstatt Steinwolle voll ausgedämmt sind. Basierend auf Untersuchungen von Just [43], in welchen die Rückzugsgeschwindigkeit des Dämmstoffes nach Abfallend der Bekleidung im Vordergrund stand, wurden Bestimmungsgleichungen ermittelt, welche einen aufgehenden Spalt zwischen Dämmung und Holzbauteil berücksichtigen.

Angenommen wird in benanntem Modell, dass während der Protection-Phase ausschließlich ein Abbrand der Schmalseite stattfinden kann und die Glaswolle aufgrund der Schutzwirkung der Bekleidung formstabil in der Konstruktion verbleibt (Vgl. Abbildung 8-11, Bild a). Nach Abfallen der Bekleidung (Post-Protection-Phase) beginnt der Rückzug der Dämmung vom Ständer. Somit werden auch die Längsseiten des Ständers brandbeansprucht (Vgl. Abbildung 8-11, Bild b). Der Abbrand des Ständers erfolgt trapezförmig bis zum kompletten Rückzug und damit zum Herausfallen der Glaswolle.

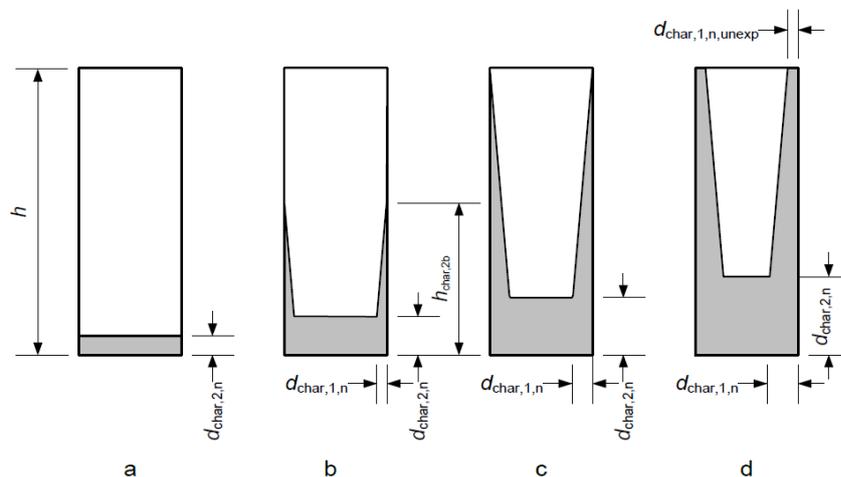


Abbildung 8-11: Abbrandmodell für Holzrahmenkonstruktionen gedämmt mit Glaswolle [42]

## 8.4 Verfahren nach Tiso/Just

### 8.4.1 Zu Grunde liegende Versuche

Zur Ermittlung des nachfolgend beschriebenen Rechenverfahrens nach Tiso/Just im Rahmen des Forschungsvorhabens „Contribution of insulation material to the fire performance of timber building components“ [44] wurden Versuche mit ähnlichem Aufbau zu den Versuchen der TUM als Grundlage durchgeführt. Ziel der Versuche war es, verschiedene Dämmstoffe in sogenannte „Protection Level“ einzuteilen sowie im Folgenden für die verschiedenen Protection Level Gleichungen zur Bestimmung des Restquerschnittes einer gedämmten Holzrahmenkonstruktion zur Verfügung zu stellen. Die bereits in den Kapiteln 3.3.3 und 3.4 beschriebenen, an der TU München innerhalb dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche orientieren sich zur besseren Vergleichbarkeit an den folgend beschriebenen Versuchen.

Die äußeren Abmessungen der Holzrahmen für die Versuche wurden mit  $b \times h$  800 x 1.000 mm gewählt. In der Mitte wurde ein Holzbalken mit einem Querschnitt von  $b \times h$  45 x 145 mm eingebracht. Die so entstehenden Gefache wurden mit verschiedenen Dämmstoffen befüllt. An dieser Stelle werden nur die für das hier behandelte Forschungsvorhaben ausschlaggebenden Dämmstoffe beschrieben.

Die Holzrahmenkonstruktionen wurden mit Gipskartonplatten Typ F bzw. Typ A bekleidet. Analog zu den Versuchen der TUM wurden die Bekleidungen der Rahmenkonstruktionen so befestigt, dass ein Fallenlassen der Bekleidungs-lagen während dem Brandversuch zu einem bestimmten Zeitpunkt möglich war. Die Abfallzeit der Bekleidung wurde einer Schutzzeit entsprechend einer GKF 15 mm mit 45 Minuten gewählt. Um das Herausfallen der losen Dämmstoffe nach Abfallender Bekleidungs-lage zu verhindern, wurde ein Drahtgitter zwischen Dämmung und Bekleidung eingebracht, das die Dämmung in den Gefachen hielt. Bei Mattendämmstoffen wurde die Dämmung an die rückwärtige Spanplatte mit einem auf Natrium-Silikat-Basis bestehenden Kleber geklebt.

Auf der feuerabgewandten Seite wurde eine Spanplatte von 19 mm angebracht. Zu thermischen Messungen wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Diese wurden an dem Balken entsprechend der nebenstehenden Abbildung 8-12 angebracht. Als Beginn der Verkohlung des Holzes wurde ebenso wie in den Versuchen der TUM die 300 °C-Isotherme gewählt. Zwischen den Thermoelementen wurde ein linearer Verlauf der Temperatur angenommen. Als Beanspruchung der Versuchskörper, die ausschließlich als Deckenelemente geprüft wurden, wurde die ETK nach DIN EN 13361-1 gewählt.

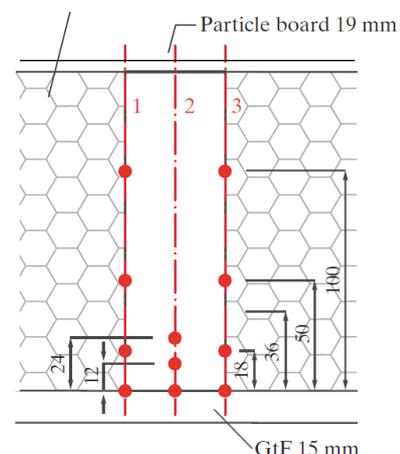


Abbildung 8-12: Positionen der Thermoelemente Just/Tiso [2]

Innerhalb der ersten Versuchsreihe wurde der Zeitpunkt des Abfallens der Bekleidung bei 45 Minuten festgesetzt. Die Versuche wurden weitere 15 Minuten (Gesamtprüfzeit 60 Minuten) unbedeckt geprüft. Als Abbruchkriterium wurde der Beginn des Verkohlens der Spanplatte auf der Rückseite des Versuchskörpers gewählt.

Innerhalb der zweiten Versuchsreihe musste Prüfung 21 vorzeitig abgebrochen werden, da das Versagenskriterium bereits nach 23 min erreicht wurde. In nachstehender Tabelle 8-1 werden die, für das vorliegende Forschungsvorhaben aussagekräftigen Versuche, zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Übersicht der Versuche nach Tiso mit Zellulose gedämmt [2]

Versuch	Dämmung	Bekleidung	Balkenabmessungen	Abfallzeit Bekleidung	Versuchsdauer
1. Versuchsreihe					
8	Zellulosefaser <sup>1</sup>	GKF, 15 mm	45/145 mm	45 min	60 min
11	Zellulosefaser <sup>2</sup>	GKF, 15 mm	45/145 mm	45 min	60 min
2. Versuchsreihe					
19	Zellulosefaser <sup>1</sup>	GKA, 12.5 mm	45/145 mm	-	60 min
20	Zellulosefaser <sup>1</sup>	GKF, 15 mm	45/145 mm	-	60 min
21	Zellulosefaser <sup>1</sup>	keine	45/145 mm	-	23 min
1) Zellulose als lose Schüttung					
2) Zellulose als Mattendämmstoff					

#### 8.4.2 Einführung von Protection-Leveln

Das Ergebnis des hier vorgestellten Beurteilungsverfahrens ist die Einordnung von Dämmstoffen in sogenannte Protection-Level (PL). Je nach Einordnung des Dämmstoffes kann dann das zugehörige Beurteilungsverfahren für die vorliegende Holzrahmenkonstruktion gewählt werden. Es werden nach Tiso/Just drei verschiedene PL mit den zugehörigen Kriterien aufgestellt:

Tabelle 8-2: Definition der Protection-Level nach Tiso/Just zur Einordnung von Dämmstoffen

<b>Protection Level (PL)</b>	<b>Kriterium</b>
<b>PL 1</b>	Rückzug der Dämmung kleiner als 100 mm während der gesamten Brandbeanspruchungsdauer (60 Minuten); ( $t > t_f \rightarrow d_{300,s} < 100 \text{ mm}$ ) z.B. Mineralwolle mit einem Schmelzpunkt $> 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ , Steinwolle
<b>PL 2</b>	Rückzug der Dämmung größer als 100 mm nach der Post Protection Phase (Branddauer $< 60$ Minuten); ( $t > t_f \rightarrow d_{300,s} \geq 100 \text{ mm}$ ) z.B. Glaswolle, Zellulosefaser, Polyurethan-Platte
<b>PL 3</b>	Rückzug der Dämmung größer als 100 mm nach der Protection Phase ( $t < t_f \rightarrow d_{300,s} \geq 100 \text{ mm}$ ) z.B. Expandiertes Polystyrol

Für Dämmstoffe, welche sich in aufgeführten PL 1 nach Tiso/Just einordnen lassen, kann ein eindimensionaler Abbrand angesetzt werden und somit das bestehende Rechenverfahren nach DIN EN 1995-1-2 Anhang C angewendet werden.

Für Dämmstoffe, die in PL 2 eingeordnet werden, muss ein dreiseitiger Abbrand angenommen werden. Der Abbrand der Längsseite beginnt dabei später als der Abbrand der Schmalseite. Die Rückzugsgeschwindigkeit des Dämmstoffes bestimmt dabei den Beginn  $t_{ch,2}$  des ideellen Abbrandes von der Längsseite des Querschnittes. Dieses Beurteilungsmodell wird im nachfolgenden Absatz beschrieben.

Bei PL 3 wird angenommen, dass der Dämmstoff bereits während der Protection-Phase der Bekleidung sich so weit zurückzieht sodass er zum einen die Längsseite des Ständers nicht mehr schützt, zum anderen seine Klemmwirkung verliert und somit mit Versagen der Bekleidung ( $t = t_f$ ) aus der Konstruktion fällt. Dementsprechend ist für diesen Fall von einer ungeämmten Konstruktion auszugehen.

### 8.4.3 Beurteilungsverfahren

Innerhalb der Arbeit von Tiso/Just wird der Schwerpunkt auf Holzrahmenkonstruktionen gelegt, welche mit unter Brandbeanspruchung nicht-formstabilen Dämmstoffen gedämmt sind. Dabei muss der Abbrand von der Längsseite anders als der Abbrand an der Schmalseite berücksichtigt werden. An dieser Stelle wird als zusätzlicher Parameter die Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung eingeführt, welche die Verzögerung des Einsetzens des Seitenabbrandes  $t_{ch,2}$  im Vergleich zum Abbrandbeginn  $t_{ch}$  an der Schmalseite berücksichtigt. Diese Rückzugsgeschwindigkeit variiert je nach Dämmstoffart.

Im STSM Report COST FP1404 [45] nach Tiso werden Beiwerte zur Bemessung des Restquerschnittes nach Brandbeanspruchung gegeben, welche für Glaswolle, Zellulosefaser und Mineralwolle mit einem Schmelzpunkt  $> 1.000\text{ °C}$  Dämmung gültig sind. Analog zur DIN EN 1995-1-2 kann ein Abbrand der Schmalseite je nach Art der Bekleidung auch schon in der Protection Phase auftreten. Ein Seitenabbrand des Ständers tritt jedoch erst nach Abfallen der Bekleidung (Post-Protection-Phase) auf.

#### IMPROVED DESIGN MODEL

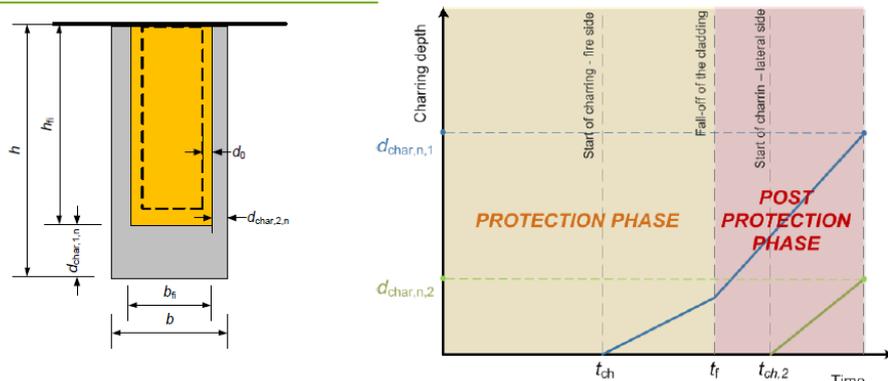


Abbildung 8-13: Ideeller Restquerschnitt und Abbrandphasen des Berechnungsmodells

Die Abbrandrate für die Schmalseite für die Protection-Phase wird nach Gl. 8-6, die Abbrandrate für die Post-Protection-Phase nach Gl. 8-7 bestimmt. Standardmäßig liegen für die Abbrandraten in der Post-Protection-Phase höhere Abbrandraten vor ( $k_{3,1} > k_2$ ).

$$\beta_{1,n} = \beta_0 * k_{s,n} * k_2 \quad \text{für} \quad t \leq t_f \quad \text{Gl. 8-6}$$

$$\beta_{1,n} = \beta_0 * k_{s,n} * k_{3,1} \quad \text{für} \quad t > t_f \quad \text{Gl. 8-7}$$

mit	$\beta_{1,n}$	[mm/min]	Bemessungswert der ideellen Abbrandrate
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung <sup>10</sup>
	$k_{s,n}$	[-]	Querschnittsfaktor
	$k_2$	[-]	Dämmungsfaktor <sup>11</sup>
	$k_{3,1}$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung eines verbleibenden Schutzes
	$t$	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung
	$t_f$	[min]	Versagenszeit der Bekleidung

Mit Hilfe des  $k_{s,n}$ - Faktors wird die tatsächlich abgebrannte Tiefe in eine ideale Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  umgewandelt, welche über die gesamte Breite als konstant angesetzt werden kann. Zusätzlich berücksichtigt er eine größere Abbrandtiefe bei schmalen Querschnitten in Abhängigkeit von der Breite. Dabei ist der  $k_{s,n}$ -Faktor eine Kombination aus der Gleichung des  $k_s$ - Faktors multipliziert mit dem  $k_n$ -Faktor nach DIN EN 1995-1-2.

Nach Versagen der Bekleidung ( $t > t_f$ ) findet ein dreiseitiger Abbrand durch den Rückzug der Dämmung statt. Der erhöhte Abbrand durch die Vorwärmung während der Protection-Phase auf der Schmalseite wird durch den  $k_{3,1}$ -Faktor berücksichtigt. Dieser ist abhängig von der Versagenszeit  $t_f$  der Bekleidung.

Der ideale Abbrand der Längsseiten berechnet sich für die Post-Protection Phase analog zu der Protection-Phase. Dabei wird der Abbrand konstant über die gesamte Bauteilhöhe angenommen.

$$\beta_{2,n} = \beta_0 * k_{s,n} * k_{3,2} \quad \text{für} \quad t > t_{ch,2} \quad \text{Gl. 8-8}$$

mit	$\beta_{2,n}$	[mm/min]	Bemessungswert der ideellen Abbrandrate des Seitenabbrandes
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung <sup>12</sup>
	$k_{s,n}$	[-]	Querschnittsfaktor
	$k_{3,2}$	[-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrandes
	$t_{ch,2}$	[min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite

<sup>10</sup> Abbrandrate für eindimensionalen Abbrand nach DIN EN 1995-1-2, Tabelle 3.1 [37].

<sup>11</sup> Berücksichtigung des Einflusses der Bekleidung auf die Abbrandrate nach DIN EN 1995-1-2 in der Protection-Phase

<sup>12</sup> Abbrandrate für eindimensionalen Abbrand nach DIN EN 1995-1-2, Tabelle 3.1 [37].

Ab einer Balken-/Ständerhöhe  $\geq 90$  mm ist der  $k_{s,n}$ -Faktor gleich 1.

Der Zeitpunkt  $t_{ch,2}$  wird als Beginn des Seitenabbrandes definiert. Für komplett gedämmte Hohlräume, deren Dämmstoffe in PL 2 einzuordnen sind, wird nach STSM Report COST FP 1404 für  $t_{ch,2}$  der Zeitpunkt festgelegt, zu welchem zwei Drittel der Höhe des Ständers/Balkens verkohlt sind. Dieser wird wie folgt ermittelt:

$$t_{ch,2} = t_f + \frac{2}{3} * \frac{h}{v_{rec}} \quad \text{Gl. 8-9}$$

mit	$t_{ch,2}$ [min]	Beginn des Abbrands des Konstruktionsholzes von der Seite
	$t_f$ [min]	Versagenszeit der Bekleidung
	$h$ [mm]	Höhe des Querschnitts
	$v_{rec}$ [mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung unter Brandbeanspruchung

Zur Ermittlung der Grenze zwischen verkohltem und nicht verkohltem Holz wird nach DIN EN 1995-1-2 die 300 °C-Isotherme angenommen.

$v_{rec}$  wird als Geschwindigkeit festgelegt, mit welcher die 300 °C-Isotherme an der gedämmten Längsseite des Balkens/Ständers sich ausbildet. In vorliegendem Modell wird der Beginn des Rückzuges der Dämmung vom Ständer erst mit Abfallen der Bekleidung angenommen.

Durch den Faktor  $k_{3,2}$  wird die Abbrandrate von der Seite des Balkens/Ständers berücksichtigt. Die Herleitung der Gleichung zur Bestimmung des  $k_{3,2}$ -Faktors aus Versuchen basiert auf folgendem Ansatz:

$$\frac{W_{fi}}{W_n} = \frac{b_{fi}}{b} \quad \text{Gl. 8-10}$$

mit	$W_{fi}$ [m <sup>3</sup> ]	Widerstandsmoment des tatsächlichen Restquerschnitts
	$W_n$ [m <sup>3</sup> ]	Widerstandsmoment des ideellen Restquerschnitts (berücksichtigt nur Abbrand von unten)
	$b_{fi}$ [mm]	Breite des ideellen Restquerschnitts (berücksichtigt Abbrand von der Seite)
	$b$ [mm]	Breite des Originalquerschnitts

Das Verhältnis wird gebildet aus dem Widerstandsmoment des tatsächlichen Restquerschnittes  $W_{fi}$  und dem Widerstandsmoment aus dem Restquerschnitt der ausschließlich einen Abbrand von unten  $d_{ch,1,n}$  über dieselbe Branddauer berücksichtigt. Dabei wird  $W_n$  wie folgt ermittelt:

$$W_n = \frac{b * (h - d_{char,1,n}(t))^2}{6} \quad \text{Gl. 8-11}$$

mit	b [mm]	Breite des Originalquerschnitts
	h [mm]	Höhe des Originalquerschnitts
	$d_{char,1,n}$ [mm]	Ideelle Abbrandtiefe der brandbeanspruchten Seite

Die ideelle Abbrandtiefe auf der brandbeanspruchten Seite des Holzbauteils  $d_{char,1,n}$  ermittelt sich aus den Gleichungen Gl. 8-6 und Gl. 8-7 in Abhängigkeit der Brandbeanspruchungsdauer.

Das Verhältnis der Widerstandsmomente wird gleichgesetzt zu dem Verhältnis aus der ideellen Restbreite  $b_{fi}$  des Rechteckquerschnitts zu der Breite  $b$  des Ausgangsquerschnittes (vgl. Abbildung 8-14).

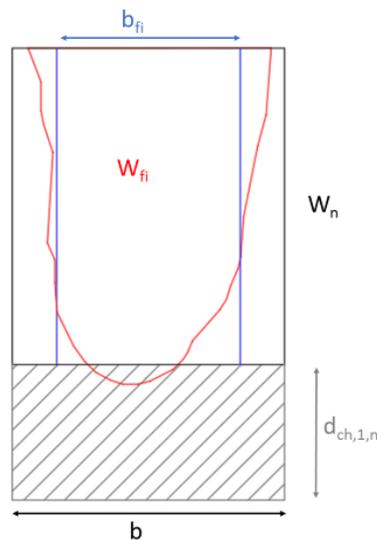


Abbildung 8-14: Darstellung der Flächen zur Berechnung der Widerstandsmomente  $W_n$  und  $W_{fi}$

Der Abbrand  $d_{ch,2}$  der Seite des Holzquerschnittes wird nach Tiso mittels Gl. 8-12 berechnet, wobei der Faktor  $k_{s,n}$  zu eins wird, wenn die Höhe des Balkens/Ständers größer 90 mm ist, was bei den meisten Konstruktionen der Fall ist. Somit kann der  $k_{s,n}$ -Faktor für die Auswertung der hier vorliegenden Versuche vernachlässigt werden, da die Höhe der Balken/Ständer 160 mm bzw. 240 mm beträgt. Die Gleichung für die Abbrandtiefe von der Seite ergibt sich zu:

$$d_{ch,2} = k_{3,2} * k_{s,n} * \beta_0 * (t - t_{ch,2}) \quad \text{Gl. 8-12}$$

mit	$d_{ch,2}$ [mm]	Seitliche Abbrandtiefe
	$k_{3,2}$ [-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrands
	$k_{s,n}$ [-]	Querschnittsfaktor
	$\beta_0$ [mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t$ [min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung
	$t_{ch,2}$ [min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite

Analog lässt sich der Abbrand  $d_{ch,2}$  folgendermaßen darstellen:

$$d_{ch,2} = \frac{1}{2} * (b - b_{fi}) \quad \text{Gl. 8-13}$$

mit	$b_{fi}$ [mm]	Breite des ideellen Restquerschnitts (berücksichtigt Abbrand von der Seite)
	$b$ [mm]	Breite des Originalquerschnitts

Wird Gl. 8-12 in Gl. 8-13 eingesetzt und nach  $k_{3,2}$  aufgelöst, ergibt sich folgende Gleichung für  $k_{3,2}$ :

$$k_{3,2} = \frac{1}{2} * (b - b_{fi}) * \frac{1}{\beta_0 * (t - t_{ch,2})} \quad \text{Gl. 8-14}$$

mit	$k_{3,2}$ [-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrands
	$b_{fi}$ [mm]	Breite des ideellen Restquerschnitts (berücksichtigt Abbrand von der Seite)
	$b$ [mm]	Breite des Originalquerschnitts
	$\beta_0$ [mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t$ [min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung
	$t_{ch,2}$ [min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite

Für Gl. 8-14 wurde der  $k_{s,n}$ -Faktor bereits zu eins gewählt und deshalb nicht mitaufgeführt. Die Breite  $b_{fi}$  als unbekannte Größe lässt sich über den Ansatz Gl. 8-10 ermitteln. Diese wird nach  $b_{fi}$  aufgelöst und in Gl. 8-14 eingesetzt:

$$k_{3,2} = \frac{1}{2} * \left( b - \frac{W_{fi}}{W_n} * b \right) * \frac{1}{\beta_0 * (t - t_{ch,2})} \quad \text{Gl. 8-15}$$

mit	$k_{3,2}$ [-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrands
	$b$ [mm]	Breite des Originalquerschnitts
	$W_{fi}$ [min]	Widerstandsmoment des rechteckigen ideellen Querschnitt
	$W_n$ [mm]	Widerstandsmoment des originalen Querschnittes
	$\beta_0$ [mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t$ [min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung
	$t_{ch,2}$ [min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite

Das Widerstandsmoment  $W_n$  eines vereinfachten Rechteckquerschnitts, das sich für den Fall ergibt, wenn nur der eindimensionale Abbrand berücksichtigt wird, lässt sich nach Gl. 8-11 bestimmen. Wird Gl. 8-11 in Gl. 8-22 eingesetzt, erhält man die von Tiso aufgestellte Gleichung zur Bestimmung des  $k_{3,2}$ -Faktors :

$$k_{3,2} = \frac{1}{2} * \left( b - \frac{6 * W_{fi}}{(h - d_{char,1,n}(t))^2} \right) * \frac{1}{\beta_0 * (t - t_{ch,2})} \quad \text{Gl. 8-16}$$

mit	$k_{3,2}$	[-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrands
	$b$	[mm]	Breite des Originalquerschnitts
	$h$	[mm]	Höhe des Originalquerschnitts
	$d_{char,1,n}$	[mm]	Ideelle Abbrandtiefe der brandbeanspruchten Seite
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t_{ch,2}$	[min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite
	$t$	[min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung
	$W_{fi}$	[mm <sup>3</sup> ]	Widerstandsmoment des tatsächlichen Restquerschnitts

Um eine Gleichung zur Berechnung des  $k_{3,2}$ -Faktors aufzustellen, wurden von Tiso [45] Widerstandsmomente ins Verhältnis gesetzt. Es ist ebenso möglich, zu den Widerstandsmomenten äquivalente Flächen oder Flächenträgheitsmomente ins Verhältnis zu setzen und damit eine Gleichung für  $k_{3,2}$  aufzustellen. Die Gleichungen zur Bestimmung des  $k_{3,2}$ -Faktors in Abhängigkeit der Fläche (A) oder des Flächenträgheitsmoments (I) lauten wie folgt:

$$k_{3,2}(A) = \frac{1}{2} * \left( b - \frac{A_{fi}}{h - d_{char,1,n}(t)} \right) * \frac{1}{\beta_0 * (t - t_{ch,2})} \quad \text{Gl. 8-17}$$

$$k_{3,2}(I) = \frac{1}{2} * \left( b - \frac{12 * I_{fi}}{(h - d_{char,1,n}(t))^3} \right) * \frac{1}{\beta_0 * (t - t_{ch,2})} \quad \text{Gl. 8-18}$$

mit	$k_{3,2}$	[-]	Post Protection Faktor zur Bestimmung des Seitenabbrands
	$b$	[mm]	Breite des Originalquerschnitts
	$h$	[mm]	Höhe des Originalquerschnitts
	$d_{char,1,n}$	[mm]	Ideelle Abbrandtiefe der brandbeanspruchten Seite
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
	$t_{ch,2}$	[min]	ideeller Abbrandbeginn von der Seite
	$t$	[min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung
	$A_{fi}$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche des tatsächlichen Restquerschnitts
	$I_{fi}$	[m <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment des tatsächlichen Restquerschnitts

## 8.5 Überprüfung des Verfahrens nach Tiso und Ergänzung mit vorliegenden Ergebnissen

### 8.5.1 Ermittlung der Rückzugsgeschwindigkeit am Holzständer/-balken

#### 8.5.1.1 Allgemeines

Nachdem biogene Dämmstoffe nicht formstabil sind, ist die temperaturabhängige Formveränderung der Dämmung (Schrumpfen, Versprödung, Zerfallen) ausschlaggebend für die Schutzwirkung, welche sie auf den Holzständer/-balken bei einem Brandereignis hat. Dementsprechend werden an dieser Stelle zunächst die Rückzugsgeschwindigkeiten, welche die biogenen Dämmmaterialien unter Hochtemperaturbeanspruchung haben, ermittelt, um in den nachfolgenden Schritten die Dämmstoffe in die entsprechenden Protection-Level nach Tiso (vgl. Kapitel 8.4.2) einordnen zu können.

Die Bestimmung der Abbrandtiefe erfolgt nach Gl. 8-19.

$$v_{rec} = \frac{\Delta d_{300,s}(t)}{\Delta t} \quad \text{Gl. 8-19}$$

mit	$v_{rec}$ [mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung unter Brandbeanspruchung
	$d_{300,s}$ [mm]	Position der 300 °C Isotherme an der Seite des Holzbalkens/-ständers
	$\Delta t$ [mm]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung

Aus den Versuchen ist die Rückzugsgeschwindigkeit nicht direkt bestimmbar. Der Rückzug der Dämmung wird hierzu mit dem Verlust der Schutzwirkung des Dämmstoffes auf den Holzquerschnitt gleichgesetzt. Somit wird der Seitenabbrand in der Tiefe am Holzständer anhand der Lage der 300 °C-Isotherme ( $d_{300,s}$ ) mithilfe der Thermoelemente (vgl. Abbildung 3-22, Abbildung 3-26) ermittelt, da bei 300 °C das Holz zu verkohlen beginnt.

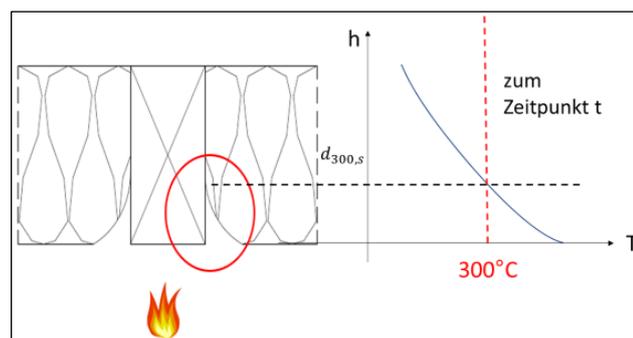


Abbildung 8-15: Darstellung des Rückzugs der Dämmung vom Holzquerschnitt bezogen auf das Temperaturprofil [46]

Aus dem Verlauf der 300 °C-Isotherme (vgl. Abbildung 8-15) kann im Verhältnis zur Zeit nach Gl. 8-19 die Rückzugsgeschwindigkeit ermittelt werden.

In den folgenden Kapiteln wird jeweils die Rückzugsgeschwindigkeit für die 1. und die 2. Versuchsreihe der Kleinbrandversuche zur Ermittlung des Restquerschnittes von Zellulose und Holzfaser ermittelt und dargestellt.

### 8.5.1.2 Rückzugsgeschwindigkeit der Holzfaserdämmstoffe

In den nachfolgenden Diagrammen ist der Rückzug der Holzfaserdämmung über die Zeit dargestellt.

Nachdem bei Versuch 10 die Holzfaserdämmung bei Fallenlassen der Bekleidung direkt aus den Gefachen aus der Decke herausgefallen ist und somit keine Rückzugsgeschwindigkeit innerhalb der Post-Protection-Phase ermittelt werden konnte, sind in Abbildung 8-16 nur die Versuche 11 und 12 aus der ersten Versuchsreihe, bei welchen ein Drahtgitter zur Lagesicherung der Dämmstoffe verbaut wurde, dargestellt.

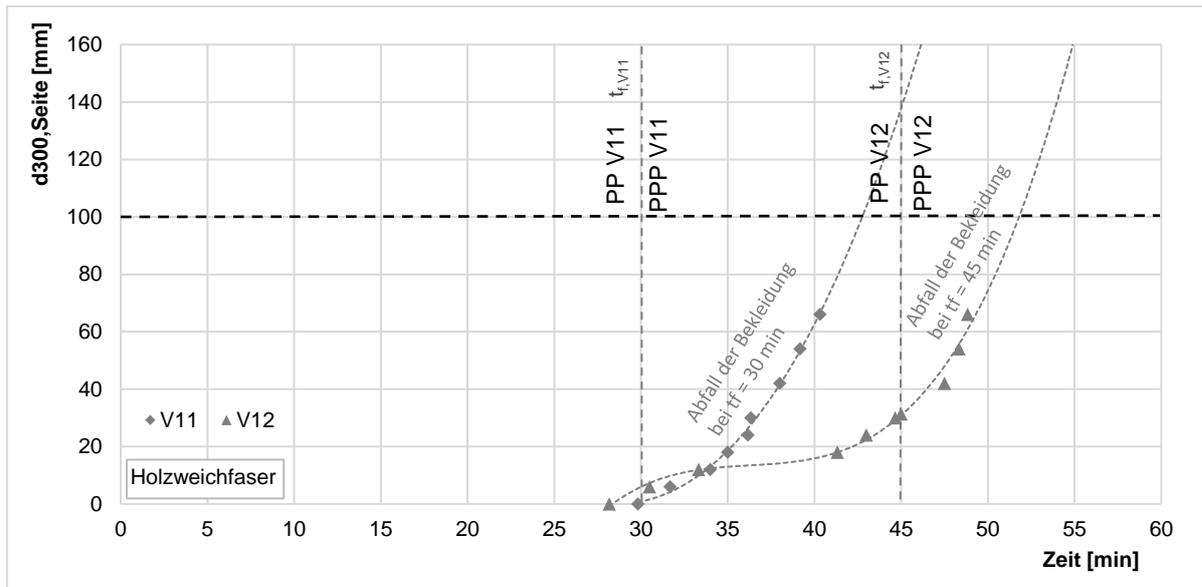


Abbildung 8-16: Rückzug der Holzfaserdämmung über die Zeit  $d_{300,s}(t)$  bei den Versuchen 11 und 12 der ersten Versuchsreihe

Bei Versuch 11 findet vor Abfallen der Bekleidung kein deutlicher Rückzug des Holzfaserdämmstoffes statt. Bei Versuchskörper 12 ist während der längeren Protection Phase eine deutlich reduzierte Rückzugsgeschwindigkeit im Vergleich zur Rückzugsgeschwindigkeit der Post Protection Phase zu erkennen. Nach Abfallen der Bekleidung findet bei beiden Versuchen eine sehr ähnliche, im Vergleich zur Protection Phase von Versuch 12 deutlich erhöhte, Rückzugsgeschwindigkeit statt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Rückzugsgeschwindigkeit der ungeschützten Dämmung nach Abfallen der Bekleidung nach kurzer Zeit unabhängig von der Dauer der Schutzwirkung der Bekleidung ist.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden die Prüfkörper liegend im Ofen geprüft. An dieser Stelle ist der Einfluss der Ausrichtung des Prüfkörpers auf den Verlauf der 300 °C-Isotherme zu erkennen.

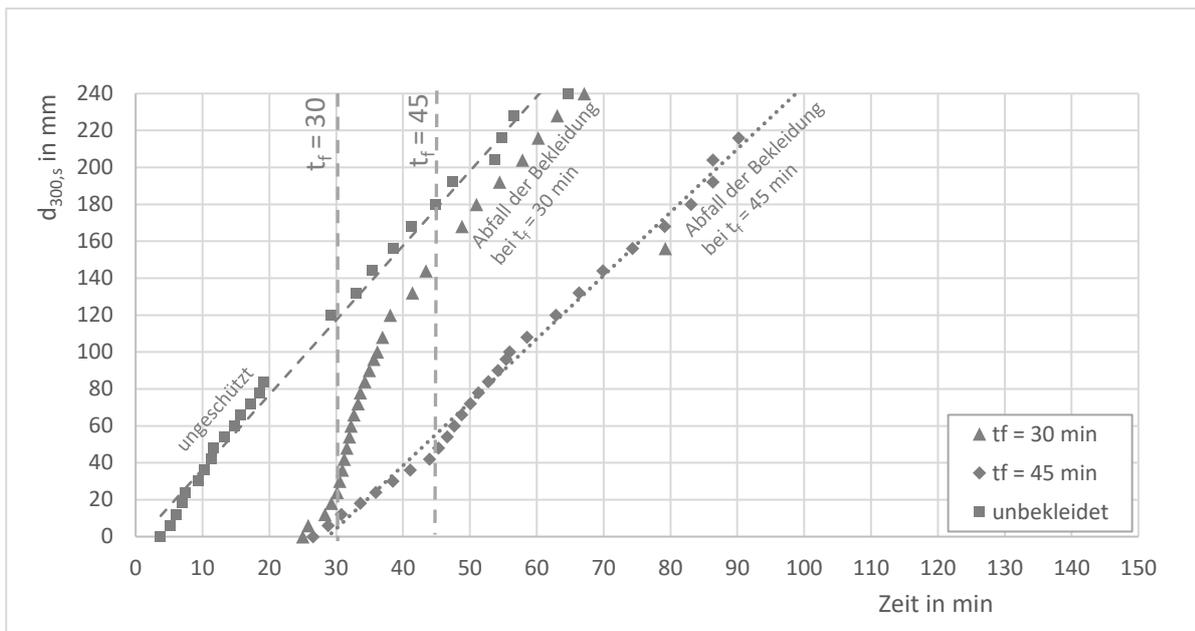


Abbildung 8-17: Rückzug der Holzfaserdämmung über die Zeit  $d_{300,s(t)}$  bei der zweiten Versuchsreihe

Bei dem Rückzug der Holzfaserdämmung bei Versuch 1 in dem unbekleideten Gefach kann von einer linearen Rückzugsgeschwindigkeit über den gesamten Versuch gesprochen werden. Zum Prüfzeitpunkt  $t = 60$  min hat sich der Dämmstoff über die gesamte Tiefe des Holzbauteils zurückgezogen. Ab diesem Zeitpunkt wird der Holzquerschnitt vollständig brandbeansprucht.

Bei Versuch 2 und 3 ( $t_f = 30$  min/  $t_f = 45$  min) findet bereits vor Abfallen der Bekleidung ein Rückzug des Dämmstoffes statt. Im Vergleich zum Rückzug des unbekleideten Dämmstoffes ist dieser etwas geringer durch die Schutzwirkung der Bekleidung. Deutlich zu erkennen ist eine erhöhte Rückzugsgeschwindigkeit des Holzfaserdämmstoffes nach Abfallen der Bekleidung nach 30 Minuten beziehungsweise nach 45 Minuten. Nach ca. 10 Minuten erhöhter Rückzugsgeschwindigkeit reduziert diese sich auf den Verlauf der Rückzugsgeschwindigkeit des unbekleideten Prüfkörpers. Ein kompletter Rückzug bei Versuch 2 ist nach 65 Minuten und bei Versuch 3 prognostiziert nach ca. 100 Minuten erreicht. In vorliegendem Fall wirkt sich somit eine längere Bekleidungszeit (15 Minuten) deutlich positiv auf die Schutzwirkung des Holzfaserdämmstoffes auf den Holzquerschnitt aus.

### 8.5.1.3 Rückzugsgeschwindigkeit der Zellulosedämmstoffe

Die Zellulose blieb bei allen Versuchen bei der ersten Versuchsreihe in der Wand stehen, weshalb in Abbildung 8-18 alle drei Versuche dargestellt werden können.

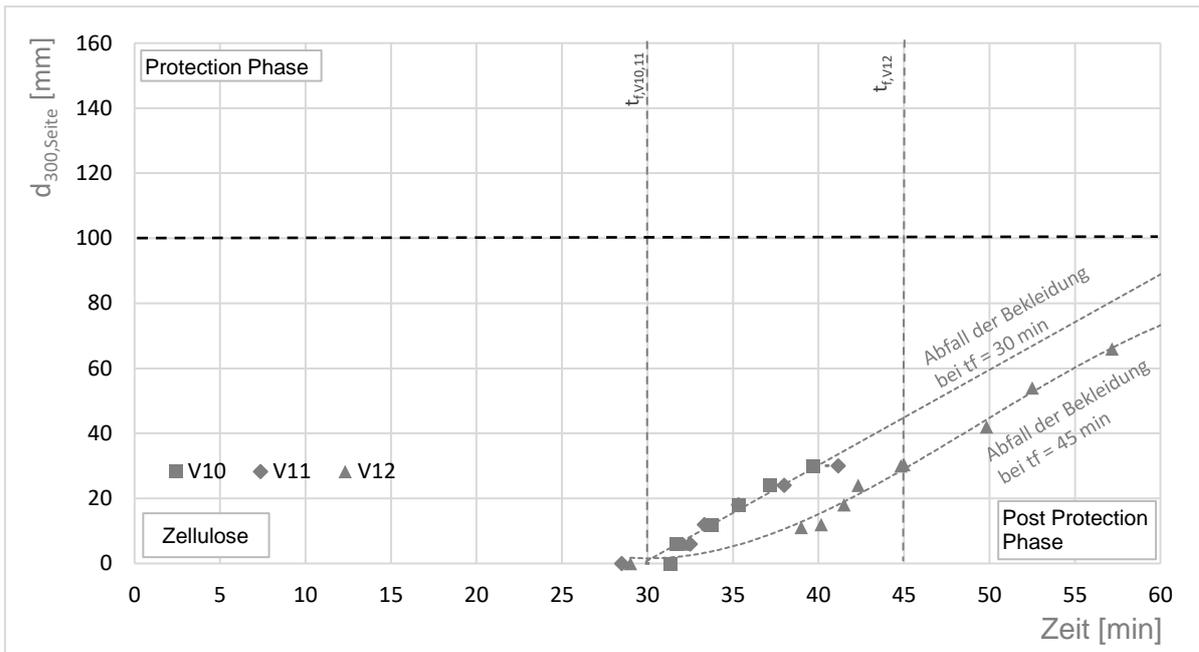


Abbildung 8-18: Rückzug der Zellulosedämmung über die Zeit  $d_{300,s}(t)$  bei den Versuchen 10, 11, 12 der ersten Versuchsreihe

Innerhalb der ersten Versuchsreihe (vgl. Abbildung 8-18) ist ein nahezu linearer Verlauf nach Abfallen der Bekleidung zu erkennen. Ähnlich wie bei den Holzfaserdämmstoffen beginnt der Rückzug des Zellulosedämmstoffes bereits vor Abfallen der Bekleidung. Sowohl der lineare Rückzug als auch der Rückzug des Dämmstoffes vor Abfallen der Bekleidung (Beginn bei ca. 25 Minuten) wird in der zweiten Versuchsreihe bestätigt (vgl. Abbildung 8-19).

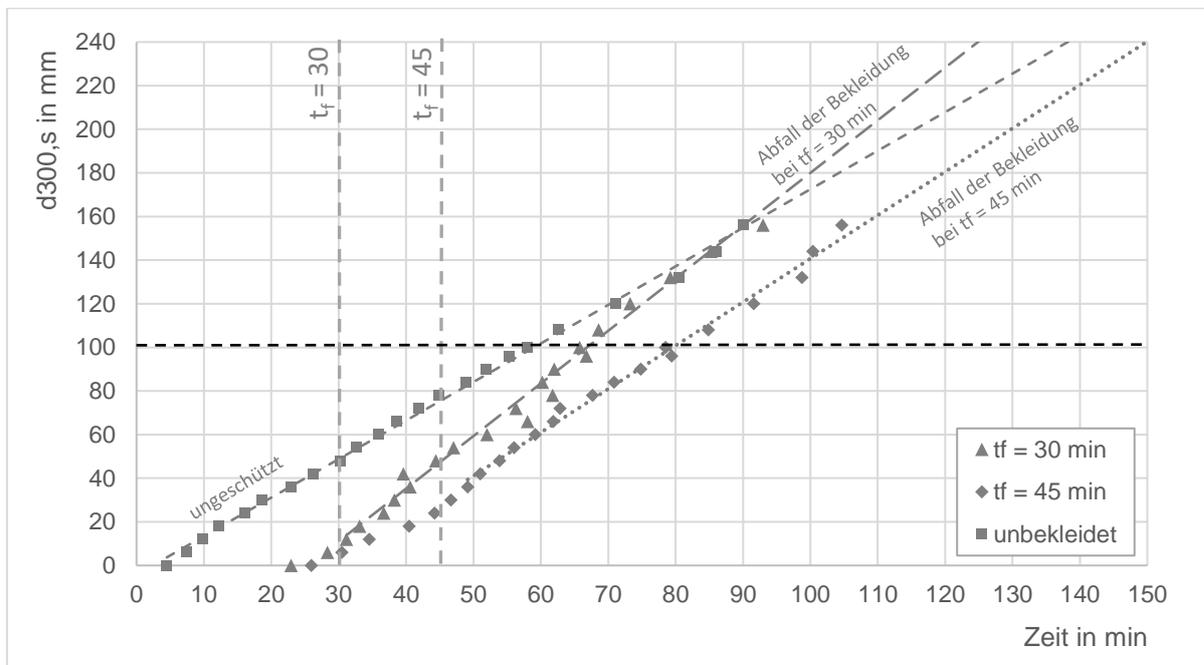


Abbildung 8-19: Rückzug der Zellulosedämmung über die Zeit  $d_{300,s}(t)$  der zweiten Versuchsreihe

Ein kompletter Rückzug über die gesamte Gefachtiefe (240 mm) wird bei allen drei Versuchsaufbauten bis 100 Minuten Versuchsdauer nicht erreicht. Nach linearer Extrapolation der vorhandenen Werte ist dieser zwischen 120 und 150 Minuten zu erwarten.

#### 8.5.1.4 Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten von Holzfaser- und Zelloosedämmstoffen

Im Folgenden werden die Rückzugsgeschwindigkeiten jeweils vor und nach Abfallen der Bekleidung sowie der verschiedenen Dämmstoffe gegenübergestellt. Zu erkennen ist bei beiden Versuchsreihe die vergleichsweise höhere Rückzugsgeschwindigkeit der Holzfaserplatten nach Abfallen der Bekleidung. In der zweiten Versuchsreihe ist auch die Rückzugsgeschwindigkeit vor Abfallen der Bekleidung bei den Holzfaserdämmstoffen größer.

Tabelle 8-3: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der ersten Versuchsreihe

Versuch		Zelluloseeinblasdämmstoff		Holzfaserplatte	
		$v_{rec, PP}$ für $t < t_f$	$v_{rec, PPP}$ für $t > t_f$	$v_{rec, PP}$ für $t < t_f$	$v_{rec, PPP}$ für $t > t_f$
		Wand	Wand	Decke	Decke
		in [mm/min]			
<b>V 10</b>	$t_f = 30$ min	- *)	3,60	- *)	- *)
<b>V 11</b>	$t_f = 30$ min	- *)	2,37	- *)	6,29
<b>V 12</b>	$t_f = 45$ min	1,90	2,93	1,87	15,73
<b>Mittelwert</b>		<b>1,90</b>	<b>2,97</b>	<b>1,87</b>	<b>11,01</b>
*) keine Messwerte bis zum entsprechenden Zeitpunkt ( $t_f$ ) vorhanden					

Zudem ist zu erkennen, dass bei den liegenden Versuchen die Rückzugsgeschwindigkeit bei beiden eingesetzten Dämmstoffen in der Post-Protection-Phase nach Abfallen der Bekleidung deutlich geringer als innerhalb der 1. Versuchsreihe ist.

Tabelle 8-4: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der zweiten Versuchsreihe

Versuch		Zellulosefasereinblasdämmstoff		Holzfaserplatte	
		$v_{rec, PP}$ für $t < t_f$	$v_{rec, PPP}$ für $t > t_f$	$v_{rec, PP}$ für $t < t_f$	$v_{rec, PPP}$ für $t > t_f$
		Liegender Prüfkörper			
		in [mm/min]			
<b>1</b>	$t_f = 0$ min	- *)	1,8	- *)	4,0
<b>2/3</b>	$t_f = 30$ min	1,4	2,4	4,1	5,9
	$t_f = 45$ min	1,3	2,0	2,5	3,5
*) der Probekörper wurde ohne Bekleidung geprüft					

Somit ist zu erkennen, dass die Ausrichtung des Bauteils einen deutlichen Einfluss auf die Rückzugsgeschwindigkeit und damit auf die Schutzwirkung des Dämmstoffes auf das zu schützende Holzbauteil hat.

### 8.5.2 Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten mit den ermittelten Werten nach Tiso/Just

Um eine direkte Vergleichbarkeit mit den Versuchen nach Tiso/Just zu ermöglichen, werden die innerhalb des Forschungsprojektes vorliegenden Ergebnisse nun nach diesem Prinzip ausgewertet.

Bei diesem Verfahren wird für die Berechnung die vereinfachte Annahme getroffen, dass ein Rückzug der Dämmung erst nach Abfallen der Bekleidung stattfindet. Dementsprechend wird der Rückzug der Dämmung der in Realität bereits vor Abfallen der Bekleidung beginnt, auf den Zeitraum nach Abfallen der Bekleidung umverteilt. Je nachdem, ob sich die Dämmung bei den Versuchen über die gesamte Tiefe des

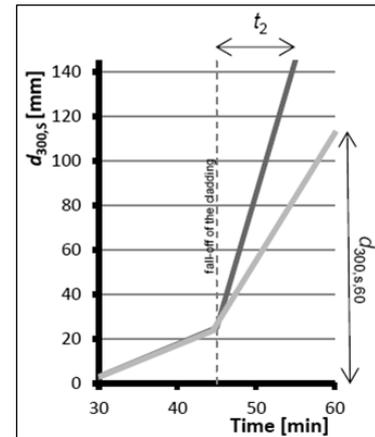


Abbildung 8-20: Gleichungen zur Berechnung der Rückzugsgeschwindigkeit nach Tiso [45]

Gefachs (bei den nach Tiso [45] zu Grunde liegenden Versuchen 145 mm) während der Versuchsdauer zurückzieht oder nicht, werden unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Rückzugsgeschwindigkeit  $v_{rec}$  angesetzt:

$$v_{rec} = \frac{d_{300,s,60}}{15}$$

für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 60 Minuten nicht über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen

Gl. 8-20

$$v_{rec} = \frac{145}{t_2}$$

für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 60 Minuten über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen

Gl. 8-21

mit	$v_{rec}$	[mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung unter Brandbeanspruchung
	$d_{300,s,60}$	[mm]	Tiefe der 300 °C Isotherme nach 60 Minuten Versuchsdauer (vgl. Abbildung 8-20)
	$t_2$	[min]	Zeitintervall zwischen Abfallen der Bekleidung bei 45 Minuten und Erreichen der 300 °C über die gesamte Tiefe des Gefachs (145 mm) (vgl. Abbildung 8-20)

Den Gleichungen entsprechend ist die so ermittelte Rückzugsgeschwindigkeit größer als die tatsächlich stattgefunden, da der Rückzug aus der Protection-Phase innerhalb der Post-Protection-Phase mitberücksichtigt wird.

Die Versuche nach Tiso [45] wurden alle mit einer Protection-Phase (PP) von 45 Minuten und einer Post-Protection-Phase (PPP) von 15 Minuten als Deckenelemente geprüft. Aus diesem Grund kann nur der Versuch 12 (Prüfung als Deckenelement mit einer PP von 45 Minuten und einer PPP von 15 Minuten) der hier vorliegenden ersten Versuchsreihe direkt mit den Versuchen nach Tiso verglichen werden.

Für die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Versuche mit Abfallzeiten der Bekleidung von 30 bzw. 45 Minuten wird der Zeitpunkt  $t_2$  folgendermaßen ermittelt:

$$t_{2,PP} = t_{300,145} - \Delta t_{PP} \quad \text{Gl. 8-22}$$

mit	$t_{2,PP}$ [min]	Zeitintervall zwischen Abfallen der Bekleidung $t_f$ und Erreichen der 300 °C über die gesamte Tiefe des Gefachs (145 mm)
	$\Delta t_{PP}$ [min]	Dauer der Protection-Phase (PP), bei unbedeckten Prüfkörpern $\Delta t_{PP} = 0$
	$t_{300,145}$ [min]	Zeitpunkt der Tiefe von 145 mm der 300 °C Isotherme
$t_{PP} = 45$	gilt für:	1. Versuchsreihe: Versuch 12 2. Versuchsreihe: 2. Versuch, Gefach 2; 3. Versuch, Gefach 2
$t_{PP} = 30$	gilt für:	1. Versuchsreihe: Versuch 10; Versuch 11 2. Versuchsreihe: 2. Versuch, Gefach 1; 3. Versuch, Gefach 1
$t_{PP} = 0$	gilt für	2. Versuchsreihe: 1. Versuch, Gefach 1 und 2

Für die Versuche mit einer Protection-Phase von 30 Minuten werden zusätzlich die Gleichungen zur Ermittlung der Rückzugsgeschwindigkeit angepasst:

$$v_{rec} = \frac{d_{300,s,60}}{15} \quad \text{für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 60 Minuten (PP = 45 min; PPP = 15 min) nicht über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen} \quad \text{Gl. 8-23}$$

$$v_{rec} = \frac{d_{300,s,45}}{15} \quad \text{für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 45 Minuten (PP = 30 min; PPP = 15 min) nicht über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen} \quad \text{Gl. 8-24}$$

$$v_{rec} = \frac{d_{300,s,15}}{15} \quad \text{für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 15 Minuten (PPP = 15 min, unbedeckt) nicht über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen} \quad \text{Gl. 8-25}$$

$$v_{rec} = \frac{145}{t_{2,PP}} \quad \text{für Dämmungen, welche sich über eine Versuchsdauer von 60 Minuten über die gesamte Gefachtiefe von 145 mm zurückziehen} \quad \text{Gl. 8-26}$$

mit	$v_{rec}$ [mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung unter Brandbeanspruchung
	$d_{300,s,60}$ [mm]	Tiefe der 300 °C Isotherme nach 60 Minuten Versuchsdauer (vgl. Abbildung 8-20)
	$d_{300,s,45}$ [mm]	Tiefe der 300 °C Isotherme nach 45 Minuten Versuchsdauer
	$d_{300,s,15}$ [mm]	Tiefe der 300 °C Isotherme nach 15 Minuten Versuchsdauer
	$t_{2,PP}$ [min]	Zeitintervall zwischen Abfallen der Bekleidung $t_f$ und Erreichen der 300 °C über die gesamte Tiefe des Gefachs (145 mm) (vgl. Gl. 8-22)

Die Anpassungen werden an dieser Stelle getroffen, um die innerhalb diesen Forschungsprojektes vorliegende Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen nach Tiso vergleichen zu können. Um unterschiedliche Dauern der Protection-Phase auswerten zu können, wird die Gl. 8-22 eingeführt. So können sowohl PP-Dauern von 30 und 45 Minuten ausgewertet werden. Die anschließende PPP wird für alle Versuche analog zu den Versuchen nach Tiso mit 15 Minuten gewählt. Für die Gleichungen Gl. 8-23 und Gl. 8-24 wird deshalb die Tiefe der

300 °C-Isotherme für eine Gesamtversuchslaufzeit von 60 Minuten (PP = 45 Minuten, PPP = 15 Minuten) und für eine Gesamtversuchslaufzeit von 45 Minuten (PP = 30 Minuten, PPP = 15 Minuten) ausgewertet.

Die Versuche werden unabhängig von ihrer Ausrichtung (Wand, Decke, liegend) aufgenommen. Bei Vergleich der verschiedenen Rückzugsgeschwindigkeiten müssen diese Unterschiede mit beachtet werden.

Um die entsprechenden Rückzugsgeschwindigkeiten nach obenstehenden Gleichungen zu ermitteln, werden für alle Versuche die Zeiten ermittelt, bei welchen die 300 °C-Isotherme eine Tiefe von 145 mm erreicht. Die nachfolgenden Diagramme (Abbildung 8-21 bis Abbildung 8-24) stellen die Tiefe des Rückzuges der Dämmung über die Zeit dar. Für die Dämmstoffe, deren Rückzug innerhalb von 60 Minuten Prüfzeit größer 145 mm war, wird die Rückzugsgeschwindigkeit nach Gl. 8-26 ermittelt, für Dämmstoffe, welche sich innerhalb von 60 Minuten der Prüfzeit nicht über 145 mm zurückziehen wird die Rückzugsgeschwindigkeit je nach Dauer der Protection-Phase nach Gl. 8-23 bzw. Gl. 8-24 ermittelt.

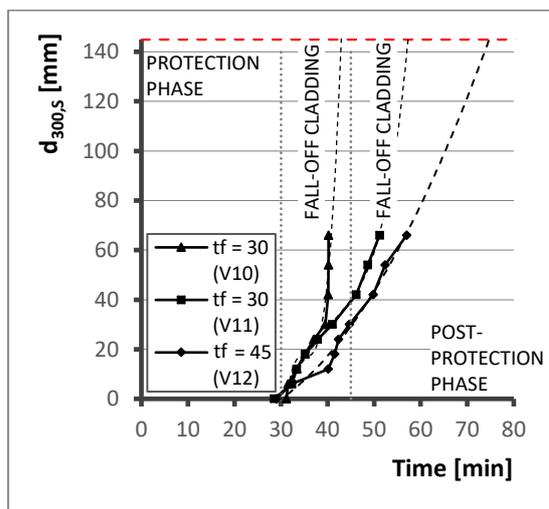


Abbildung 8-21: Rückzug nach Tiso für die 1. Versuchsreihe Zellulose [45]

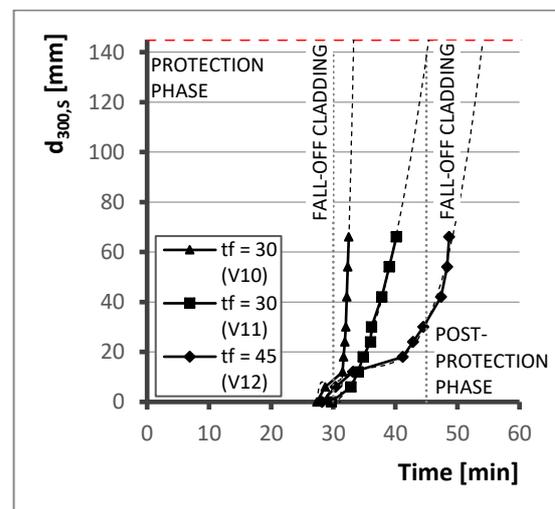


Abbildung 8-22: Rückzug nach Tiso für die 1. Versuchsreihe Holzfaser [45]

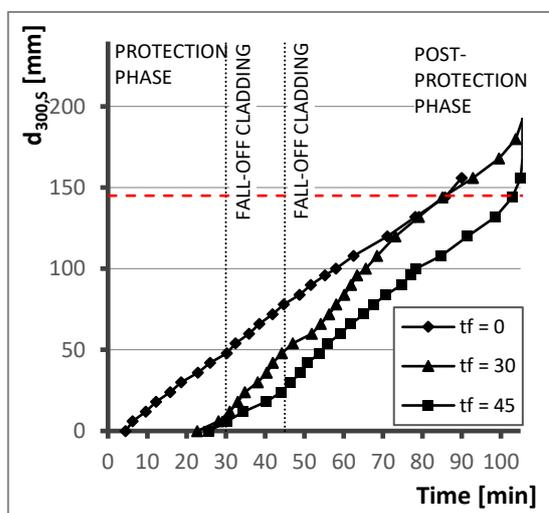


Abbildung 8-23: Rückzug nach Tiso für die 2. Versuchsreihe Zellulose [45]

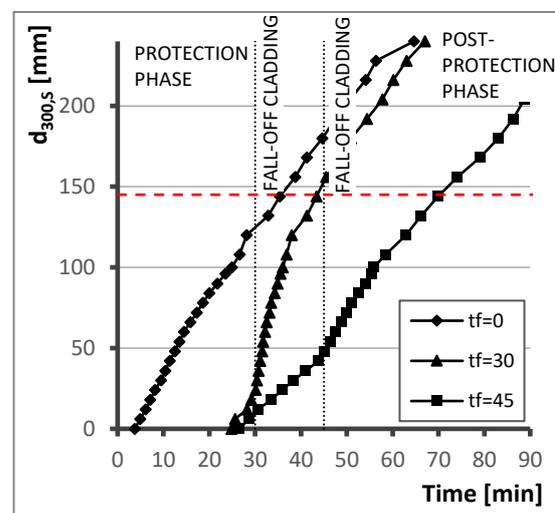


Abbildung 8-24: Rückzug nach Tiso für die 2. Versuchsreihe Holzfaser [45]

Tabelle 8-5: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der ersten und zweiten Versuchsreihe nach Tiso

Versuch	t <sub>f</sub> [min]	Zellulose					Holzfaser				
		Aus- rich- tung	t <sub>140 mm</sub> [min]	d <sub>300,s,60</sub> [mm]	v <sub>rec</sub>		Aus- richtung	t <sub>140 mm</sub> [min]	d <sub>300,s,60</sub> [mm]	v <sub>rec</sub>	
V10	30	Wand	43,02	-	Gl. 8-26	<b>11,14</b>	Decke	33,31	-	Gl. 8-26	<b>43,80</b>
V11	30	Wand	-	129,57	Gl. 8-24	<b>2,61</b>	Decke	45,39	-	Gl. 8-26	<b>9,42</b>
V12	45	Wand	-	78,06	Gl. 8-23	<b>5,20</b>	Decke	53,75	-	Gl. 8-26	<b>16,56</b>
V1	0*)	liegend	-	22,55	Gl. 8-25	<b>1,50</b>	liegend	-	62,18	Gl. 8-25	<b>4,15</b>
V2/G1	30	-**) )					liegend	43,55	-	Gl. 8-26	<b>10,70</b>
V2/G2	45	-**) )					liegend	-	112,11	Gl. 8-23	<b>7,47</b>
V3/G1	30	liegend	-	49,64	Gl. 8-24	<b>3,31</b>	-***)				
V3/G2	45	liegend	-	62,18	Gl. 8-23	<b>4,13</b>	-***)				

\*) Der Prüfkörper wurde ohne Bekleidung geprüft.  
 \*\*) Bei dem Prüfkörper waren beide Gefache mit Holzfaser gedämmt.  
 \*\*\*) Bei dem Prüfkörper waren beide Gefache mit Zellulose gedämmt.

Die großen Unterschiede hinsichtlich der Werte der Rückzugsgeschwindigkeiten sind wie folgt zu erklären:

Bei Versuch V10 waren die Dämmstoffe im Deckenelement nicht durch ein Drahtgitter gesichert. Dies bedeutet, dass die Holzfaserdämmung bei Abfallen der Bekleidung nach 30 Minuten mit der Bekleidung direkt aus dem Gefach gefallen ist. Dementsprechend findet der Rückzug über die gesamte Gefachtiefe direkt bei Abfallen der Bekleidung statt und ist rechnerisch dementsprechend hoch.

Tiso ermittelt für Zellulose innerhalb seiner Versuche eine Rückzugsgeschwindigkeit von 13,4 mm/min. Der Unterschied zwischen den hier vorliegenden Versuchen und denen nach Tiso kann mit der Ausrichtung der Elemente erklärt werden. Tiso prüfte ausschließlich Deckenelemente. Bei den vorliegenden Versuchen wurde die Zellulose hingegen in einem Wandelement geprüft. Zudem wurden bei Tiso Zellulosematten in die Gefache eingebracht, bei vorliegenden Versuchen wurde die Zellulose als lose Einblasdämmung eingebracht.

Allgemein festzustellen ist wie bei den ermittelten Rückzugsgeschwindigkeiten nach Kapiteln 8.5.1.2 und 8.5.1.3, dass die Holzfaser deutlich höhere Rückzugsgeschwindigkeiten erreicht, als die Zellulose. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die Ausrichtung der Elemente einen wesentlichen Einfluss, vor allem auf das Herausfallen der Dämmstoffe hat.

Nach DIN EN 1995-1-2 [37] und König [41] gibt es keine unterschiedlichen Berechnungsansätze für verschiedene Ausrichtungen des Elements (Wand, Decke). Aufgrund der nachfolgend gezeigten deutlichen Unterschiede der Ergebnisse der Rückzugsgeschwindigkeit von Zellulosefaser und Holzfaser in Wand-, Decken- sowie liegenden Elementen, lässt eine wirtschaftliche Betrachtung eine Einführung von Beiwerten zur Berücksichtigung der Ausrichtung eines Elements zu.

### 8.5.3 Einordnung der Dämmstoffe in die Protection Level

Für das Rechenverfahren nach Tiso werden die Dämmstoffe Protection Leveln zugeordnet. Je nach Protection-Level folgt dann das entsprechende Rechenverfahren (vgl. Kapitel 8.4.2). Entsprechend des Verfahrens nach Tiso werden für den Rückzug der Dämmung die hier vorliegenden Versuche analog ausgewertet. Nachdem bei Tiso grundsätzlich eine Bekleidungszeit (Protection Phase, PP) von 45 Minuten angesetzt wurde, werden nachfolgend nur die Versuche aus hier vorliegendem Prüfprogramm mit 45 Minuten Versagenszeit der Bekleidung ausgewertet.

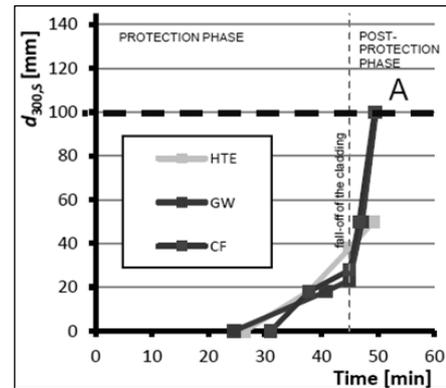


Abbildung 8-25: Bestimmung der Protection Level für HTE, GW und CF nach Tiso [45]

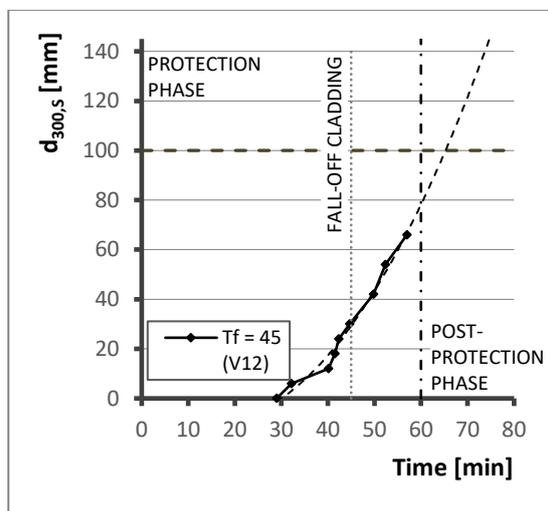


Abbildung 8-26: Bestimmung der Protection Level für Zellulose nach Versuchsreihe 1

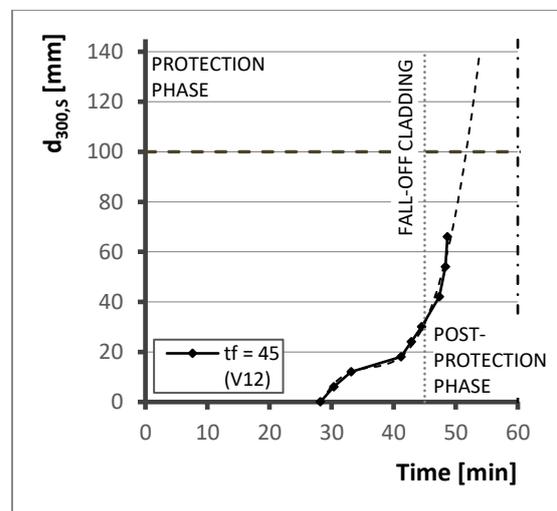


Abbildung 8-27: Bestimmung der Protection Level für Holzfaser nach Versuchsreihe 1

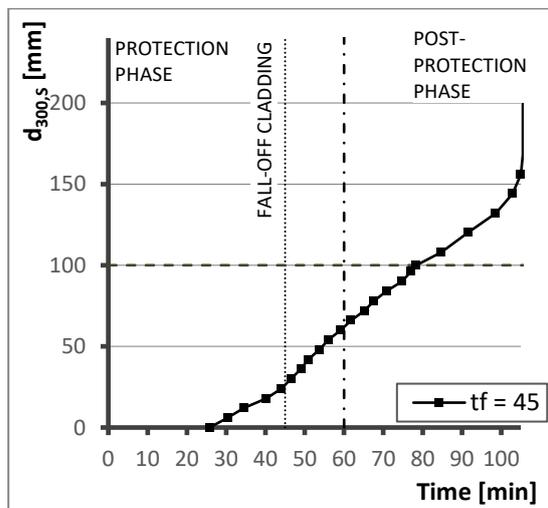


Abbildung 8-28: Bestimmung der Protection Level für Zellulose nach Versuchsreihe 2

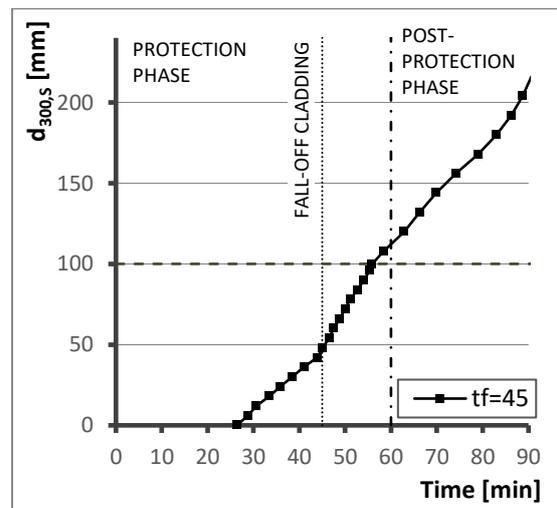


Abbildung 8-29: Bestimmung der Protection Level für Holzfaser nach Versuchsreihe 2

Für die Einordnung in Protection-Level wird überprüft, zu welchem Zeitpunkt sich der Dämmstoff über 100 mm Tiefe zurückgezogen hat. Für Zellulosefaser erreicht der Rückzug der Dämmung die 100 mm Tiefe erst nach 60 Minuten Prüfzeit. Für Holzfaser werden diese bereits vor 60 Minuten jedoch nach Abfallen der Bekleidung erreicht.

Für die durchgeführten Kleinbrandversuche ergeben sich entsprechend Abbildung 8-26 bis Abbildung 8-29 ergeben sich folgende Protection Level:

Tabelle 8-6: Einordnung der Dämmstoffe in Protection Level

Dämmstoff	Ausrichtung	Quelle	Protection Level
Zellulose	Wand	Abbildung 8-26	1
	liegend	Abbildung 8-28	1
	Decke	Tiso	2
Holzfaser	Decke	Abbildung 8-27	2
	liegend	Abbildung 8-29	2

## 8.6 Ermittlung des Abbrands von der Brandbeanspruchten Seite

### 8.6.1 Bestimmung des Beginns der pyrolytischen Zersetzung/Abbrandes

Der Beginn der Verkohlung des Holzbauteils wird nachfolgend mit  $t_{ch}$  entsprechend DIN EN 1995-1-2 bezeichnet [37]. Zusätzlich wird der Zeitpunkt der Entzündung zur Auswertung auf die 300 °C-Isotherme festgelegt. Entsprechend DIN EN 1995-1-2 wird der Beginn des Abbrands  $t_{ch}$  von der Art und Dicke der Bekleidung wie folgt ermittelt:

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 14 \quad \text{Gl. 8-27}$$

mit  $t_{ch}$  [min] Zeitdauer bis zum Beginn des Abbrands des Konstruktionsholzes  
 $h_p$  [mm] Dicke der Brandschutzbekleidung

In den vorliegenden Versuchen wurde eine Gipskartonbekleidung des Typs F in der ersten Versuchsreihe mit 15 mm und in der zweiten Versuchsreihe mit 18 mm Dicke verwendet. Dementsprechend ergibt sich der rechnerische Beginn des Abbrandes zu 28 Minuten beziehungsweise zu 36,4 Minuten.

Aus den Messwerten der Thermoelemente ergeben sich folgende Zeiten für den Beginn des Abbrandes:

Tabelle 8-7: Beginn des Abbrandes  $t_{ch}$

Versuch	Bekleidungsdicke	Ausrichtung	$t_{ch}$	Ausrichtung	$t_{ch}$
	[mm]		[min]		[min]
V10	15	Wand	31	Decke	27
V11	15	Wand	28	Decke	30
V12	15	Wand	29	Decke	28
V2	18	liegend	27	liegend	28
V3	18	liegend	25	liegend	28

Für die die Versuchsergebnisse mit 15 mm dicker Bekleidung kann der Wert des DIN EN 1995-1-2 bestätigt werden. Für die zweite Versuchsreihe liegen Abweichungen vor.

### 8.6.2 Auswertung der Versuche zur Bestimmung des Abbrands von der brandbeanspruchten Seite

Der Abbrand eines bekleideten Balkens/Ständers von der brandbeanspruchten Seite wird nach DIN EN 1995-1-2 [38] gemäß Gleichung Gl. 8-2 berechnet. Für die Bestimmung der Abbrandrate eines Balkens/Ständers wird die eindimensionale Abbrandrate  $\beta_0$  für ungeschütztes Holz mit Beiwerten multipliziert. Dabei werden Effekte, wie der Schutz der Bekleidung ( $k_{2,1}$ -Faktor), der erhöhte Abbrand nach Abfall der Bekleidung aufgrund der Vorwärmung ( $k_{3,1}$ -Faktor) oder die Beeinflussung der Durchwärmung in Abhängigkeit der Breite des Balkens/Ständers ( $k_s$ -Faktor), berücksichtigt.

Die Gleichungen nach DIN EN 1995-1-2 [38] für die Berechnung der oben genannten Faktoren gelten jedoch nur für Holzrahmenkonstruktionen mit vollausgedämmten Gefachen mit Steinwolle. Hier wird von einer dauerhaften Temperaturbeständigkeit der Steinwolle und damit von einem eindimensionalen Abbrand am Holzquerschnitt ausgegangen.

Für Holzrahmenkonstruktionen, deren Hohlräume mit Dämmstoffen ausgefüllt sind, die unter Temperaturbeanspruchung ihre Formbeständigkeit verlieren und somit einen Abbrand von drei Seiten zulassen, sind diese Gleichungen deshalb nicht übertragbar, weshalb die Faktoren auf Basis der innerhalb diesen Berichtes vorliegenden Versuche neu bestimmt beziehungsweise angepasst werden müssen.

Die ermittelten Faktoren gelten zunächst für die hier geprüften Konstruktionsaufbauten. Eine Extrapolation kann nicht direkt zugelassen werden.

Der Querschnittsfaktor  $k_s$  ist Grundlage für die Bestimmung der  $k_{2,1}$ - und  $k_{3,1}$ -Faktoren. Nachdem innerhalb der Versuche die Balken-/Ständerbreite nicht variiert wurde, ist es nicht möglich, den  $k_s$ -Faktor aus den Versuchen zu bestimmen. Deshalb wird der  $k_s$ -Faktor, wie auch in dem STSM report COST FP 1404 [45], nach DIN EN 1995-1-2 [37] aus der Tabelle C.1 entnommen. Die  $k_{2,1}$ - und  $k_{3,1}$ -Faktoren werden entsprechend den Gleichungen Gl. 8-4 und Gl. 8-5 bestimmt.

Der  $k_s$ -Faktor und die Abbrandrate  $\beta_0$  sind für alle im Rahmen des Forschungsprojektes vorliegenden Versuche gleich. Dementsprechend sind die  $k_{2,1}$ - und  $k_{3,1}$ -Faktoren ausschließlich von der Abbrandrate in der Achse des Holzquerschnittes abhängig (vgl. Gl. 8-28 und Gl. 8-29).

$$k_{2,1} = \frac{\beta_{2,linear}}{k_s \cdot \beta_0} = \frac{\beta_{2,1}}{0,715} \quad \text{Gl. 8-28}$$

$$k_{3,1} = \frac{\beta_{3,linear}}{k_s * \beta_0} = \frac{\beta_{3,1}}{0,715} \quad \text{Gl. 8-29}$$

mit	$k_2$	[-]	Dämmfaktor
	$k_3$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung eines verbleibenden Schutzes
	$k_s$	[-]	Querschnittsfaktor, $k_s = 1,1$ entsprechend DIN EN 1995-1-2 Tabelle C.1 [37] für Konstruktionsholz $b = 60$ mm
	$\beta_0$	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung, $\beta_0 = 0,65$ nach DIN EN 1995-1-2 Tabelle 3.1 [37] für Nadelholz
	$\beta_{2,linear}$	[mm/min]	Abbrandrate in der Mitte des tragenden Holzelements für vollgedämmte Holztafelkonstruktionen, während die Bekleidung intakt ist
	$\beta_{3,linear}$	[mm/min]	Abbrandrate in der Mitte tragenden Holzelements für vollgedämmte Holztafelkonstruktionen nach Versagen der Brandschutzbekleidung

Die Abbrandrate  $\beta$  von der brandbeanspruchten Seite wird unterschieden in  $\beta_{2,1}$  für den Abbrand während der Protection Phase und  $\beta_{3,1}$  für den Abbrand während der Post-Protection-Phase. Für die Ermittlung der Abbrandraten werden nachfolgende Gleichungen angesetzt:

$$\beta_{2,1} = \frac{\Delta d_{300,m,PP}}{t_f - t_{ch}} \quad \text{Gl. 8-30}$$

$$\beta_{3,1} = \frac{\Delta d_{300,m,PPP}}{t - t_f} \quad \text{Gl. 8-31}$$

mit	$\beta_{2,1}$	[mm/min]	Abbrandrate während der Protection Phase (PP)
	$\beta_{3,1}$	[mm/min]	Abbrandrate während der Post Protection Phase (PPP)
	$\Delta d_{300,m,PP}$	[mm]	Höhe des verkohlten Bereichs in der Mitte des Konstruktionsholzes in der Protection Phase (PP)
	$\Delta d_{300,m,PPP}$	[mm]	Höhe des verkohlten Bereichs in der Mitte des Konstruktionsholzes in der Post Protection Phase (PPP)
	t	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung
	$t_{ch}$	[min]	Brandbeanspruchungsdauer bis zum Beginn des Abbrands des Holzbauteils
	$t_f$	[min]	Versagenszeit der Bekleidung

Als Grenztemperatur wird zur Ermittlung der Abbrandrate der Verlauf der 300 °-Isotherme in der Achse des Holzquerschnitts angenommen. Die entsprechenden Abbrandtiefen werden aus den Messungen der Versuche entnommen (Vgl. Tabelle 8-8). Werte zwischen den Messpunkten wurden linear interpoliert. Wenn vorhanden, wurden der  $\beta_{3,1}$ -Wert zusätzlich über die Abbrandtiefe  $\Delta d_{300,m,PPP}$ , gemessen aus dem Restquerschnitt, bestimmt. Dies war nicht möglich, wenn der Abbrand bereits in der bekleideten Phase stattfand, da dann aus dem Restquerschnitt nach Versuchsende nicht mehr auf den Abbrand innerhalb der Protection Phase geschlossen werden konnte.

Tabelle 8-8: Abbrandtiefen in der Achse des Holzquerschnitts

Versuch	d <sub>300,m,PP</sub>	d <sub>300,m,PPP</sub>	d <sub>300,m,gesamt</sub>	d <sub>300,m,PPP</sub>	d <sub>300,m,gesamt</sub>
	[mm]			[mm]	
	Thermoelement			Restquerschnitt	
Zellulose					
V10	-	18	18	25,9	25,9
V11	-	24	24	30,7	30,7
V12	6,6 <sup>1)</sup> /15,9 <sup>2)</sup>	23,4 <sup>1)</sup> /14,1 <sup>2)</sup>	30	-	36,8
V1	- <sup>3)</sup>	10,2	- <sup>3)</sup>	-	-
V3/1	4,2	19,37	23,6	-	-
V3/2	10,8	24,7	35,5	-	-
Holzfaser					
V10	-	66	66	26,8	26,8
V11	-	66	66	35,6	35,6
V12	5,4 <sup>1)</sup> /14,1 <sup>2)</sup>	60,6 <sup>1)</sup> /51,9 <sup>2)</sup>	66	-	40
V1	- <sup>3)</sup>	24,5	- <sup>3)</sup>	-	-
V2/1	3,2	65	68,2	-	-
V2/2	11,8	80,9	92,7	-	-
1) Teilweise Versagen der Bekleidung bei Minute 39 für Zellulose und Minute 38 für Holzfaser					
2) Vollständiges Versagen bei Minute 45					
3) Der Versuch wurde ohne Bekleidung geprüft, weshalb eine PPP von 15 Minuten angenommen wird. Die Werte berücksichtigen somit 0 Minuten Vorerwärmung.					

Zu erkennen ist, dass die Abbrandtiefen, welche mit den Thermoelementen ermittelt wurden, geringer sind, als die gemessenen Querschnittswerte. Nachdem vom Zeitpunkt des Abschaltens des Brenners bis zum Ablöschen des Prüfkörpers weitere Minuten vergehen, ist dieser Unterschied realistisch. Es ergeben sich Zeitspannen zwischen 3,4 und 5,4 Minuten, welche mit diesem Vorgang vollständig zu erklären sind. Für weitere Betrachtungen werden die Ergebnisse aus den Messungen mit den Thermoelementen herangezogen.

In nachstehender Tabelle werden die  $t$ ,  $t_r$ ,  $t_{ch}$ -Werte für die Ermittlung der Abbrandrate zusammengefasst.

Tabelle 8-9:  $t$ ,  $t_r$ ,  $t_{ch}$ -Werte für die Ermittlung der Abbrandrate

Versuch	t	t <sub>r</sub>	t <sub>ch</sub>
	[min]		
Zellulose			
V10	45	30	31,3
V11	45	30	28,5
V12	60	39/45	29,0
V1	15	0	3,8
V3/1	45	30	27,0
V3/2	60	45	27,9
Holzfaser			
V10	45	30	27,7
V11	45	30	29,8
V12	60	38/45	28,2
V1	15	0	4,5
V2/1	45	30	25,1
V2/2	60	45	27,9

Entsprechend den eingeführten Gleichungen Gl. 8-30 und Gl. 8-31 werden nachstehend die Abbrandraten und im nächsten Schritt die entsprechenden Koeffizienten nach Gleichungen Gl. 8-28 und Gl. 8-29 ermittelt.

Tabelle 8-10:  $\beta_{2,1}$ - und  $\beta_{3,1}$ -Werte mit resultierenden  $k_{2,1}$ - und  $k_{3,1}$ -Faktoren

Versuch	$\beta_{2,1}^{1)}$	$k_{2,1}^{3)}$	$\beta_{3,1}^{2)}$	$k_{3,1}^{4)}$	$\beta_{3,1}^{2)}$	$k_{3,1}^{4)}$
	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]
Thermoelement				Restquerschnitt		
Zellulose						
V10	- <sup>5)</sup>	-	2,35	3,28	3,38	4,72
V11	- <sup>5)</sup>	-	1,46	2,04	1,86	2,61
V12	0,66 <sup>6)</sup> /0,97 <sup>7)</sup>	0,93/1,36	1,26 <sup>6)</sup> /1,15 <sup>7)</sup>	1,77/1,61	-	-
V1	-	-	0,68	0,95	-	-
V3/1	1,4	2,00	1,29	1,80	-	-
V3/2	0,63	0,88	1,65	2,30	-	-
Holzfaser						
V10	- <sup>5)</sup>	-	10,71	14,99	4,35	6,08
V11	- <sup>5)</sup>	-	4,89	6,84	2,64	3,69
V12	0,55 <sup>6)</sup> /1,38 <sup>7)</sup>	0,77/1,93	3,54 <sup>6)</sup> /5,12 <sup>7)</sup>	4,95/7,17	-	-
V1	-	-	1,63	2,28	-	-
V2/1	0,65	0,91	4,33	6,06	-	-
V2/2	0,69	0,97	5,39	7,54	-	-

1) nach Gl. 8-30  
 2) Nach Gl. 8-31  
 3) Nach Gl. 8-28  
 4) Nach Gl. 8-29  
 5) Vor Versagen der Bekleidung kein Abbrand  
 6) Teilweise Versagen der Bekleidung bei Minute 39 für Zellulose und Minute 38 für Holzfaser, die resultierenden Werte werden auf der sicheren Seite angenommen  
 7) Vollständiges Versagen bei Minute 45

Nachfolgend werden die ermittelten Dämmkoeffizienten  $k_{2,1}$  in Abhängigkeit zu der zugehörigen Gesamtdicke aller Bekleidungslagen dargestellt. Als Grenze zwischen sicherer und unsicherer Seite wird die Ermittlung nach DIN EN 1995 1-2 herangezogen.

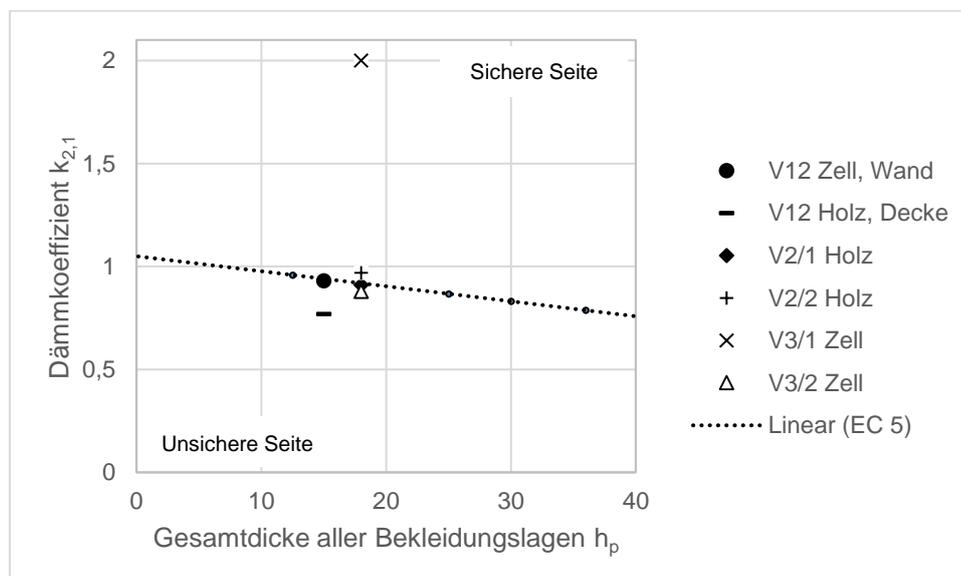


Abbildung 8-30: Darstellung der ermittelten  $k_{2,1}$ -Faktoren im Verhältnis zur Gesamtdicke aller Bekleidungslagen

Der Dämmkoeffizient  $k_{2,1}$  berücksichtigt den verlangsamten Abbrand des Konstruktionsholzes aufgrund des Schutzes der Bekleidung. Somit reduziert sich der Wert mit Anstieg der Gesamtdicke der Bekleidungslagen. Im Allgemeinen decken sich die erhaltenen Ergebnisse mit den Vorgaben der DIN EN 1995-1-2.

Der  $k_{3,1}$ -Faktor berücksichtigt das Verhalten nach Versagen der Brandschutzbekleidung. Nach DIN EN 1995-1-2 steigt dieser mit zunehmendem  $t_f$  an, da durch die längere Vorerwärmung der Abbrand nach Abfallen der Bekleidung höher ist. Dies trifft für vorliegende Ergebnisse nicht immer zu.

Grund für die widererwartenden Abbrandraten vor allem bei den Holzfaserdämmstoffen können nachstehende Effekte sein:

- Die höheren Werte ermittelt aus den Restquerschnitten im Verhältnis zu den Werten ermittelt aus den Thermoelementen hatten in Realität eine längere Branddauer durch das verzögerte Ablöschen
- Durch den Rückzug der Dämmung vom Holzquerschnitt (vgl. Abschnitt 8.5.1) bereits während der bekleideten Phase findet auch hier ein Abbrand und somit ein Einfluss von der Seite auf den Holzquerschnitt statt, der sich zum Abbrand von der Schmalseite addiert. Dieser Einfluss findet bei Dämmen der Gefache mit Steinwolle nicht in diesem Ausmaß statt. Diese Annahme wird durch die Abbrandtiefe der Restquerschnitte im Vergleich zu den gemessenen Werten gestützt (vgl. Tabelle 8-8). Die realen Abbrandtiefen sind niedriger, als die gemessenen.

Aus vorstehenden Gründen wird die Ermittlung der  $k_{3,1}$ -Faktoren für die Holzfaserdämmung angepasst. Es wird der Abbrand  $d_{300,m,PPP}$ , ermittelt aus dem Restquerschnitt in Verbindung mit der Zeit der Post Protection Phase zuzüglich der aufgewendeten Zeit zum Löschen, zur Berechnung herangezogen. Löschzeiten ergeben sich aus der vorherrschenden Abbrandrate, ermittelt aus den Thermoelementen und dem  $\Delta d_{300,m,PPP}$  zwischen Restquerschnitt und Messung aus den Thermoelementen.

Für V12 muss eine Abbrandtiefe für die Protection Phase ermittelt werden, da in dieser Phase bereits ein Abbrand laut Thermoelementen stattfand, diese jedoch nicht aus dem Restquerschnitt abzuleiten ist. Für diesen Wert wird aus demselben Versuch der Wert der mit Zellulose gedämmter Wand von  $\beta_{2,1} = 0,62$  mm/min eingesetzt, da für den bekleideten Abbrand für den Abbrand von brandbeanspruchter Seite ähnliche Werte angenommen werden können. Der aus der Abbrandrate  $\beta_{2,1}$  ermittelte  $k_{2,1}$ -Faktor für Zellulosefaser ist annähernd gleich groß wie der  $k_{2,1}$ -Faktor nach DIN EN 1995-1-2 für dieselbe Bekleidungsstärke, was die Plausibilität des ermittelten Faktors bestätigt. Aus der Differenz der gesamten Abbrandtiefe von 40 mm und der Abbrandtiefe von 6,09 mm der Protection Phase lässt sich die Abbrandtiefe der Post Protection Phase zu 33,3 mm bestimmen.

Tabelle 8-11: Angepasste  $k_{2,1}$  und  $k_{3,1}$  Werte für Holzfaserdämmstoffe

Versuch	$d_{300,m,PP}$	$d_{300,m,PPPt}$	$t$	$t_f$	$t_{ch}$	$\beta_{2,1}$	$k_{2,1}$	$\beta_{3,1}$	$k_{3,1}$
	[mm]	[mm]	[min]	[min]	[min]	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]
Holzfaser									
V10	-	26,8	45 + 3,4 = <b>48,4</b>	30	27,7	-	-	1,46	2,04
V11	-	35,6	45 + 4,6 = <b>49,6</b>	30	29,8	-	-	1,82	2,54
V12	6,09	33,3	60 + 5,4 = <b>65,4</b>	38	28,2	0,62	0,87	1,22	1,70

### 8.6.3 Zusammenstellung der ermittelten Werte

Für weitergehende Auswertungen werden nachfolgend zusammengestellte Werte, welche in den vorherigen Kapiteln ermittelt wurden, verwendet:

Tabelle 8-12: Zusammenstellung der ermittelten Abbrandraten, Dämmkoeffizienten und Koeffizienten für das Verhalten nach Versagen der Brandschutzbekleidung

Versuch	$\beta_{2,1}$	$k_{2,1}$	$\beta_{3,1}$	$k_{3,1}$	$\beta_{2,1}$	$k_{2,1}$	$\beta_{3,1}$	$k_{3,1}$	
	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]	[mm/min]	[-]	
Zellulose					Holzfaser				
V10	-	-	2,35	3,28	-	-	1,46	2,04	
V11	-	-	1,46	2,04	-	-	1,82	2,54	
V12	0,66	0,93	1,26	1,77	0,62	0,87	1,22	1,70	
V1	-	-	0,68	0,95	-	-	1,63	2,28	
V2/V3(1)	1,4	2,00	1,29	1,80	0,65	0,91	4,33	6,06	
V2/V3(2)	0,63	0,88	1,65	2,30	0,69	0,97	5,39	7,54	

In nachstehendem Diagramm werden die eben aufgeführten Werte in Abhängigkeit der Versagenszeit der Bekleidung mit den Gleichungen nach DIN EN 1991-1-2 für Steinwolle sowie den Gleichungen nach Tiso für Zellulose verglichen. Beide Quellen machen zwischen der Ausrichtung Wand oder Decke keinen Unterschied, weshalb die hier ermittelten Ergebnisse nur hinsichtlich des Dämmstoffs unterschieden werden. Die Gleichung zur Ermittlung von  $k_{3,1}$  nach Tiso liegt für die meisten Versuche deutlich auf der unsicheren Seite. Die Gleichung der DIN EN 1995-1-2 trifft näherungsweise für die meisten Versuche zu. Die beiden Versuche mit Holzfaserdämmung, welche extrem auf die sichere Seite abweichen, sind Versuche der zweiten Versuchsreihe, für welche kein Restquerschnitt vorlag und deshalb keine Anpassung nach Tabelle 8-11 erfolgen konnte.

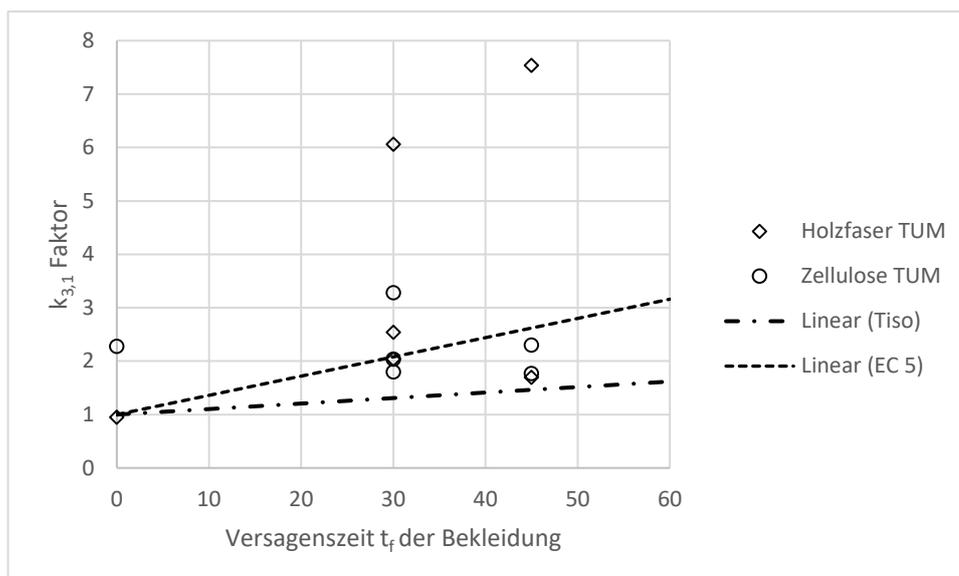


Abbildung 8-31: Vergleich der ermittelten Dämmkoeffizienten und Koeffizienten für das Verhalten nach Versagen der Brandschutzbekleidung mit den Koeffizienten nach DIN EN 1995-1-2 und Tiso

## 8.7 Ermittlung des Seitenabbrands

### 8.7.1 Ermittlung des Beginns des Seitenabbrands $t_{ch,2}$ nach den Gleichungen nach Tiso

Der Abbrand der Seiten des Konstruktionsholzes beginnt nicht gleichmäßig über die gesamte Höhe, sondern verhält sich annähernd linear in Abhängigkeit der Rückzugsgeschwindigkeit des Dämmstoffes. Wie in Kapitel 8.3 bereits beschrieben, kann der Restquerschnitt in Abhängigkeit des Rückzugs der Dämmung als Trapezfläche angenähert werden. Da ein trapezförmiger Querschnitt zur Bemessung der Feuerwiderstandsfähigkeit nicht anwendungsorientiert ist, wird nach Tiso [45] der Restquerschnitt in einen Rechteckquerschnitt umgewandelt. Hierfür wird die Annahme zugrunde gelegt, dass der Rückzug der Dämmung erst nach Versagen der Bekleidung berücksichtigt wird. Rechnerisch beginnt der Seitenabbrand  $t_{ch,2}$  von Holzbauteilen, deren Gefache mit Dämmstoffen voll ausgedämmt sind, welche sich unter thermischer Beanspruchung zurückziehen, später als der Abbrand  $t_{ch}$  von der brandbeanspruchten Seite. Unter rechnerischem Beginn des Seitenabbrands ist zu verstehen, dass der Abbrand über die komplette Höhe des Balkens/Ständers als konstant angesetzt wird.

$$t_{ch,2} = t_f + \frac{2}{3} \cdot \frac{h}{v_{rec}} \quad \text{Gl. 8-32}$$

mit	$t_{ch,2}$ [min]	Zeitdauer bis zum Beginn des Abbrands der Seiten des Konstruktionsholzes
	$t_f$ [min]	Zeitpunkt des Versagens der Brandschutzbekleidung
	$h$ [mm]	Höhe des Holzquerschnittes
	$v_{rec}$ [mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung

Für die Ermittlung des Abbrandbeginns  $t_{ch,2}$  wird die Rückzugsgeschwindigkeit für die hier vorliegenden Versuche nach den von Tiso [45] aufgestellten Gleichungen, wie in Kapitel 8.5.2 beschrieben, berechnet:

Tabelle 8-13: Ermittlung von  $t_{ch,2}$  für die vorliegenden Versuche nach der Gleichung von Tiso [45]

Ver- such	Zellulosefaser			Holzfaser			$t_f$ [min]	$h$ [mm]
	$v_{rec}^{1)}$	$t_{ch,2}^{2)}$	$t_{ende}^{1)}$	$v_{rec}^{3)}$	$t_{ch,2}^{2)}$	$t_{ende}^{1)}$		
	[mm/min]	[min]	[min]	[mm/min]	[min]	[min]		
V10	11,14	39,58	45	43,80	32,44	32	30	160
V11	2,61	70,86	45	9,42	41,32	45	30	160
V12	5,20	59,51/65,51	60	16,56	44,44/51,44	55	38/39/45	160
V1	1,50	106,67	139	4,15	38,55	65	0	240
V2(1)	-	-	-	10,70	44,95	67	30	240
V2(2)	-	-	-	7,47	66,42	98	45	240
V3(1)	3,31	78,34	124	-	-	-	30	240
V3(2)	4,13	83,74	150	-	-	-	45	240

1)  $t_{ende}$  entspricht dem Zeitpunkt, des gemessenen bzw. extrapolierten  $d_{300,s}$  bei 160 mm bzw. 240 mm Tiefe

Bei Vergleich der Ergebnisse von  $t_{ch,2}$  mit dem Versuchsende (Zeitpunkt des Erreichens von 300° C über die gesamte Holzquerschnittshöhe) fällt auf, dass bei den Holzfaserdämmstoffen das bestimmte  $t_{ch,2}$  grundsätzlich kleiner bzw. annähernd gleich zum Versuch ist.

Bei Zellulose ist  $t_{ch,2}$  hingegen bei V11 und V12 größer. Dies resultiert aus dem früheren Versuchsabbruch. Der Rückzug des Dämmstoffs fand nicht über die vollständige Querschnittshöhe statt. Bei den Versuchen, bei welchen die Verkohlung über den gesamten Querschnitt fortgeschritten war, ist der berechnete Abbrandbeginn grundsätzlich kleiner. Deshalb wird im Folgenden für diese Versuche nur der Querschnitt angesetzt, über welchen sich der Dämmstoff entsprechend den Messergebnissen zurückgezogen hat.

$$t_{ch,2} = t_f + \frac{2}{3} \cdot \frac{d_{300,s}}{v_{rec}} \quad \text{für } d_{300,s} < h \quad \text{Gl. 8-33}$$

$$d_{300,s} = v_{rec} \cdot (t - t_f) \quad \text{bzw. Ermittlung } t_f \text{ aus Thermoelementen} \quad \text{Gl. 8-34}$$

mit	$t_{ch,2}$ [min]	Zeitdauer bis zum Beginn des Abbrands der Seiten des Konstruktionsholzes
	$t_f$ [mm]	Zeitpunkt des Versagens der Brandschutzbekleidung
	$h$ [mm]	Höhe des Holzquerschnittes
	$v_{rec}$ [mm/min]	Rückzugsgeschwindigkeit der Dämmung
	$d_{300,s}$ [mm]	Höhe des Rückzugs der Dämmung zum Versuchsende

Tabelle 8-14: Ermittlung von  $t_{ch,2}$  mit angepassten Werten für Zellulose

Ver- such	Zellulosefaser aus Gl. 8-34				Zellulosefaser (Thermoelement)				$t_f$ [min]
	$v_{rec}^{1)}$	$t_{ch,2}^{2)}$	$t_{ende}^{1)}$	$d_{300,s}$	$v_{rec}$	$t_{ch,2}$	$t_{ende}$	$d_{300,s}$	
	[mm/min]	[min]	[min]	[mm]	[mm/min]	[min]	[min]	[mm]	
V11	2,61	40	45	39,15	2,61	37,66	41	30	30
V12	5,20	49/55	60	78,00	5,20	47,46/53,46	57	66	39/45

Die neu ermittelten Werte liegen nach Anpassung alle auf der sicheren Seite und bestätigen somit die Gleichungen. Die rein rechnerisch ermittelten Werte, liegen etwas weniger aber ebenso auf der sicheren Seite, liefern jedoch im Vergleich zu den Werten aus der Messung keine extremen Abweichungen. Für die folgenden Berechnungen werden die berechneten Werte verwendet.

### 8.7.2 Bestimmung des $k_{3,2}$ -Faktors

Der Post Protection Faktor  $k_{3,2}$  lässt sich für die vorliegenden Versuchsergebnisse über das Verhältnis des Widerstandsmoments, des Flächenträgheitsmoments und der Fläche mittels der Gleichungen Gl. 8-22, Gl. 8-23 sowie Gl. 8-24 berechnen. Der  $k_{3,2}$ -Faktor wird im Folgenden aus den genannten Gleichungen ermittelt. Nach Tiso war der  $k_{3,2}$ -Faktor ermittelt aus dem Widerstandsmoment am größten und liegt somit auf der sicheren Seite. Dies soll mit

den vorliegenden Versuchsergebnissen überprüft werden. Die Fläche  $A_{fi}$ , das Flächenträgheitsmoment  $I_{fi}$  und das Widerstandsmoment  $W_{fi}$  des tatsächlichen Restquerschnitts wurden mithilfe von AutoCAD® bestimmt. Zu Ermittlung des Widerstandsmomentes wurde der Schwerpunktabstand zur brandzugewandten Seite als Annahme auf der sicheren Seite gewählt. Zur Berechnung der nominellen Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  wird analog zu Tiso Gl. 8-2 nach DIN EN 1995-1-2 [37] angewandt. Für die  $k_{2,1}$ - und  $k_{3,1}$ -Faktoren werden die bereits aus dem jeweiligen Versuch ermittelten Werte eingesetzt (Tabelle 8-12).

Für die nachfolgende Auswertung kommen nur die Versuche der Versuchsreihe 1 in Frage, da hier ein entsprechender Restquerschnitt gewonnen werden konnte.

Tabelle 8-15: Restquerschnittswerte zur Bestimmung von  $k_{3,2}$ 

Ver- such	Zellulosefaser				Holzfaser			
	$A_{fi}$	$I_{fi}$	$W_{fi}$	$d_{ch,1,n}$	$A_{fi}$	$I_{fi}$	$W_{fi}$	$d_{ch,1,n}$
	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm]
V10	7.690	10.863.300	157.439	38,84	3.229	4.640.600	67.647	40,2
V11	7.358	9.638.700	145.161	46,12	4.435	5.238.200	80.340	53,40
V12	6.845	7.854.718	121.028	55,33	2.971	3.166.700	50.106	55,60

Nach den Gleichungen Gl. 8-22, Gl. 8-23 sowie Gl. 8-24 werden  $k_{3,2}$ -Faktoren bestimmt.

Tabelle 8-16:  $k_{3,2}$ -Faktoren

Versuch	Zellulosefaser			Holzfaser		
	$k_{3,2}(A)$	$k_{3,2}(I)$	$k_{3,2}(W)$	$k_{3,2}(A)$	$k_{3,2}(I)$	$k_{3,2}(W)$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
V10	-0,72	-2,78	-0,91	2,02	1,72	1,97
V11	-0,50	-2,01	-0,78	0,73	0,32	0,70
V12	-0,37	-1,51	-0,43	0,98	0,72	0,97

Die aus den Wandversuchen für Zellulosefaser ermittelten  $k_{3,2}$ -Faktoren sind negativ. Dies bedeutet, dass  $A_n$ ,  $I_n$  sowie  $W_n$ , welche nur einen eindimensionalen Abbrand von der brandzugewandten Seite berücksichtigen, bereits rechnerisch kleiner sind als  $A_{fi}$ ,  $I_{fi}$  und  $W_{fi}$ , welche aus den Restquerschnitten bestimmt wurden (vgl. Abbildung 8-14). Zur Verdeutlichung wurde das Flächenträgheitsmoment  $I_n$  für die eindimensionalen Abbrandtiefen  $d_{ch,1,n}$  von der brandbeanspruchten Seite ermittelt.

Für einen zusätzlichen Vergleich wurde die Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  nach DIN EN 1995-1-2 [37] für Steinwolle bestimmt und daraus das Flächenträgheitsmoment  $I_n$  berechnet, wobei die weiteren Eingabeparameter äquivalent zu den der Versuche V10 – V12 gewählt wurden.

Tabelle 8-17: Vergleich  $d_{ch,1,n}$ ,  $I_n$  aus Versuch mit Zellulosefaser mit  $d_{ch,1,n}$ ,  $I_n$  nach EC5 für Steinwolle

Versuch	Versuch		EC5	
	$d_{ch,1,n}$	$I_n$	$d_{ch,1,n}$	$I_n$
	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm]	[mm <sup>4</sup> ]
V10	38,84	8.892.990	25,2	12.247.280
V11	46,12	7.384.352	45,0	7.604375
V12	55,33	5.733.723	77,2	2.838.318

Zu erkennen ist, dass die rechnerische eindimensionale Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  nach DIN EN 1995-1-2 für Steinwolle höher ist, als die eindimensionale Abbrandtiefe  $d_{ch,1,n}$  des Versuchs V12 für Zellulose. Die Ergebnisse von V 11 sind mit denen der Steinwolle vergleichbar.

So zeigt das Ergebnis der negativen  $k_{3,2}$ -Faktoren für die mit Zellulosefasern gedämmten Wandversuche in Verbindung mit den Ergebnissen aus der Berechnung des eindimensionalen Abbrands, dass für die untersuchte Dauer der Brandbeanspruchung bei V11 und V12 nur ein rechnerisch eindimensionaler Abbrand von der brandbeanspruchten Seite stattfindet.

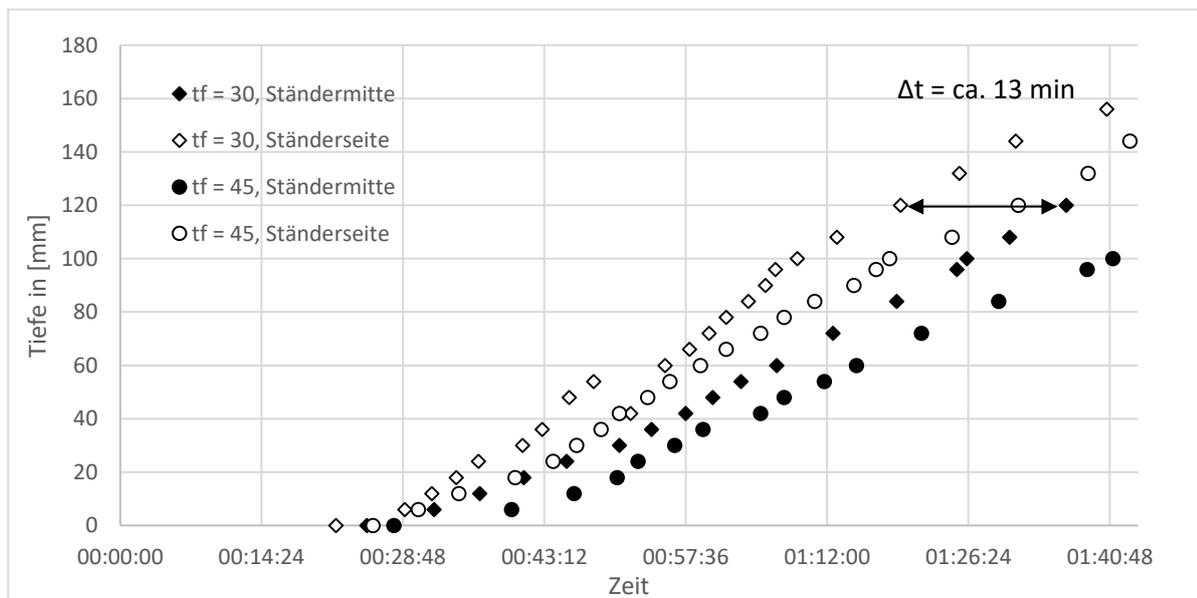


Abbildung 8-32: Abbrand der Holzständer der zweiten Versuchsreihe mit Zellulose (V3)

Vorstehende Abbildung zeigt den Abbrand in Ständermitte sowie an den Seiten bei dem Versuch V3 der zweiten Versuchsreihe. Zu erkennen ist, dass zwischen dem Thermoelement in gleicher Tiefe am und in der Mitte des Ständers nur ein Zeitunterschied von ca. 13 min beim Erreichen der 300 °C liegt. Dies bestätigt vorangehende Vermutung, dass nahezu kein Seitenabbrand stattfindet.

Es bedarf weiterer Versuche mit längeren Branddauern um zu untersuchen, wie sich der Effekt des Rückzugs der Dämmung auswirkt und ob der Abbrand bei längeren Branddauern zweidimensional zu berechnen ist.

Die hier ermittelten Ergebnisse verifizieren das Modell der Einteilung von Dämmungen in Protection Level nach Tiso (vgl. Abschnitt 8.4.2). Wie für die diesem Forschungsvorhaben zu Grunde liegenden Versuche mit Zellulosedämmstoffen ermittelt, kann Zellulose in Protection-Level 1 eingeordnet werden. Für diesen PL ist ausschließlich ein eindimensionaler Abbrand auf der brandbeanspruchten Seite aufgrund der geringen Rückzugsgeschwindigkeit zu ermitteln. Dies bedeutet für Zellulose eine mit der Steinwolle vergleichbaren Schutzwirkung auf den Holzquerschnitt. Ein Herausfallen der Zellulose muss jedoch über den Zeitraum des Feuerwiderstandes durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden. Diese Bedingung wird normativ bereits auch für Steinwolle gefordert.

Die Werte der  $k_{3,2}$ -Faktoren für Holzfaserdämmstoffe sind alle positiv. Dies bedeutet, dass ein Abbrand über die gesamte Höhe stattfindet. Wie auch bei Tiso sind die Werte über das Widerstandsmoment bestimmt am höchsten und deshalb auf der sicheren Seite anzunehmen. Zu erkennen ist zudem, dass die  $k_{3,2}$ -Faktoren für Versuche 11 und 12 vergleichbar sind. Der Wert für Versuch 10 weicht trotz ähnlichem Abbrandbeginn  $t_{ch,2}$  deutlich ab. Dies ist mit dem direkten Versagen der Holzfaserdämmung bei Abfallen der Bekleidung zu begründen. Bei den Versuchen 11 und 12 wurde dies durch ein Metallgitter verhindert, weshalb die Dämmung eine Schutzwirkung auf den Holzquerschnitt erreichen konnte.

Das Ergebnis der  $k_{3,2}$ -Faktoren der Versuche V10 – V12 zeigt, dass das zur Lagesicherung angebrachte Drahtgitter den Abbrand merklich verlangsamte. Hinsichtlich einer baupraktische Sicherung von brennbaren Dämmstoffen zur Steigerung des Beitrags zum Feuerwiderstand besteht weiterer Forschungsbedarf.

Nach Tiso [45] darf der  $k_{3,2}$ -Faktor keine Werte  $< 1,0$  annehmen. Für weitere Berechnungen müsste somit der  $k_{3,2}$ -Faktor für Versuch V11 und V12 zu 1,0 gewählt werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Recherchen, experimentellen Untersuchungen, numerischen Analysen und analytischen Beurteilungen zielen darauf ab, die brandschutztechnische Beurteilung im Hinblick auf den Feuerwiderstand von Holzrahmenbauelementen mit biogenen Dämmstoffen zu standardisieren und durch die Entwicklung allgemeiner Beurteilungsansätzen die Anwendung dieser Bauteile flächendeckend zu erleichtern und zu ermöglichen. Die in diesem Vorhaben genutzten Ansätze stellen den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik dar. Die gewonnenen Ergebnisse fügen bestehendes Wissen, praktische Erfahrungen und neue Ansätze zusammen und erweitern die Möglichkeiten für einen geregelten Nachweis zum Feuerwiderstand für Holzbauteile signifikant.

Über dies hinaus weisen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens grundlegend neue Erkenntnisse und methodische Ansätze im Hinblick auf die Größe und Wege zur Bestimmung temperaturabhängiger Materialkennwerte auf. Hierzu wurden unter anderem die thermischen Materialkennwerte auf Basis verschiedener Verfahren (Hot-Disk, Hot-Plate, etc.) bestimmt und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Gleichzeitig konnten die Ergebnisse wesentliche Erkenntnisse im Hinblick auf das Materialverhalten von Zellulosedämmung und Holzfaserdämmstoffen unter Hochtemperaturbeanspruchung zur Verfügung stellen. So wurde für flexible Holzfaserdämmstoffe gezeigt, dass neben der Holzfaser selbst, auch die enthaltenen Stütz- und Bindefasern bereits im Temperaturbereich bis 240 °C zu einem Verlust der Gefügestabilität beitragen können, gleichzeitig aber keine thermisch induzierte Schrumpfung einsetzt. Im Vergleich zu mineralischen Gefachdämmstoffen mit Schmelzpunkt > 1000 °C spielt diese Eigenschaft jedoch eine wesentliche Rolle im Hinblick auf den Beitrag zum Feuerwiderstand der einzelnen Schichten. Einerseits kann dieser thermisch induzierte Schrumpfungprozesse und der Verlust der Gefügestabilität zu Öffnen von Plattenfugen und zum vorzeitigen Herausfallen des Gefachdämmstoffs im Hinblick auf die Beurteilung der raumabschließenden Funktion führen. Andererseits trägt diese Eigenschaft im Hinblick auf die Beurteilung der Tragfähigkeit vom Holzrahmenbauelementen zu einer mehrseitigen Beanspruchung der Tragkonstruktion bei.

Mit den durchgeführten Durchwärmungsversuchen und Untersuchungen zur temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Rohdichte wurde ein wesentlicher Beitrag zum Verständnis des Materials geleistet, auf deren Basis eine weiterführende Optimierung der Baustoffe erfolgen kann.

Zur expliziten Erfassung des spezifischen Materialverhaltens wurden neue experimentelle Techniken etabliert, die unter anderem das zeitabhängige Abfallen von Bekleidungslagen ermöglichen. Damit konnte das Verhalten der untersuchten Dämmstoffe und angrenzenden Tragkonstruktion gezielt für die Phase vor und nach Erreichen der Schutzzeit der davorliegen

Bekleidung beschrieben werden. Ebenso die Erfassung der Rückzugsgeschwindigkeit und Abbrandrate durch eingebrachte Thermoelemente stellt ein Fortschritt in den Möglichkeiten der experimentellen Untersuchungen dar. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass durch die Auswahl und Einbringmethode von Thermoelementen signifikante Unterschiede und Abweichungen auftreten können. Vor allem, wenn die sich im Prüfkörper einstellenden Isothermenverläufe nicht in der Planung der Führung von Thermoelementen berücksichtigt werden und beispielsweise Mantelthermoelemente im direkten Kontakt zur unbeanspruchten Raumseite des Prüfkörpers stehen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine bereits am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion bestehende Versuchsdatenbank mit herstellereigenen Versuchsergebnissen erweitert, um die Daten aus zahlreich vorangegangenen Groß- und Kleinbrandversuchen nutzen zu können. Basierend auf den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden in Kapitel 6 und 7 über numerische Ansätze analytische Gleichungen abgeleitet, über die ingenieurtechnisch die raumabschließende Funktion bis zu 90 Minuten für Holzbaulemente mit biogenen Gefachdämmstoffen beurteilt werden kann.

Festzuhalten bleibt dabei, dass das ursprüngliche Verfahren für das spezifische Verhalten biogener Dämmstoffe im Hinblick auf ein weiteres Grenzkriterium, das explizit die potentielle Neigung von Gefachdämmstoffen zum Herausfallen enthält, erweitert werden sollte. Weiterhin besteht Forschungsbedarf im Hinblick auf den Einfluss von Putzschichten für Holzfaserdämmplatten, die Auswirkung größerer Gefachbreiten als 625 mm, die Differenzierung zwischen mattenartigen - und Einblas-Dämmstoffen als auch im Hinblick auf potentielle konstruktive Schutzmaßnahmen, zum Ausschluss eines vorzeitigen Herausfallens von Gefachdämmstoffen. Vorgenannte Punkte sind Gegenstand weiterführender Untersuchungen der Autoren. Mit den in Kapitel 8 vorgestellten Ergebnissen wird die Beurteilung des positiven Einflusses biogener Gefachdämmstoffe auf die Tragfähigkeit von Holzrahmenelementen möglich. Dies war bis zum aktuellen Zeitpunkt über die Ansätze der DIN 4102-4 nicht möglich. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in der aktuellen Überarbeitung zur EN 1995-1-2 dem Normungsausschuss zur Verfügung gestellt, um damit eine weiterführende Standardisierung und Anwendung der Holzbauweise mit biogenen Dämmstoffen zu ermöglichen.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] SCHLEIFER, Vanessa: *Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*. Zürich : vdf, Hochsch.-Verl. AG an der ETH, 2009 (Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich Nr. 313)
- [2] TISO, Mattia ; JUST, Alar: *Fire Protection Provided by Insulation Materials—A New Design Approach for Timber Frame Assemblies*. In: *Structural Engineering International* 27 (2017), Nr. 2, S. 231–237 – Überprüfungsdatum 2017-06-27
- [3] ARGEBAU BAUMINISTERKONFERENZ, KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER: *Musterbauordnung* (idF v. 11.2002)
- [4] Norm DIN 4102-2:1977-09. 09.1977. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*
- [5] Norm DIN EN 13501-2:2010-02. 02.2010. *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*
- [6] IS-ARGEBAU: *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise* (idF v. Juli 2004) (2004) – Überprüfungsdatum 2016-05-09
- [7] *Landesbauordnung für Baden-Württemberg* (idF v. 5. 3. 2010) (11.2014) – Überprüfungsdatum 2017-02-02
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *Bauregelliste 2015* – Überprüfungsdatum 2016-09-16
- [9] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten* (idF v. 05.2014). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-04
- [10] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen* (idF v. 30. 5. 2008). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-04
- [11] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern* (idF v. 02.2012). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-10-18

- [12] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten* (idF v. 07.2014). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-03
- [13] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten* (idF v. 07.2014). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-04
- [14] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen* (idF v. 04.2009). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-04
- [15] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Musterrichtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Wohnformen für Menschen mit Pflegebedürftigkeit oder mit Behinderung* (idF v. 05.2012). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-04
- [16] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT DER BAUMINISTERKONFERENZ: *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau* (idF v. 07.2014). URL <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991> – Überprüfungsdatum 2015-11-03
- [17] ZEITBILD VERLAG UND AGENTUR FÜR KOMMUNIKATION GMBH (Hrsg.); DIEKMANN, Susanne (Mitarb.); GROCHTMANN, Thomas (Mitarb.); WIEDEMANN, Perter (Mitarb.) : *Nachwachsende Rohstoffe als Unterrichtsthema in Berufsschulen : Fachmodul Dämmen und Dämmstoffe*. Berlin : Zeitbild Verlag und Agentur für Kommunikation GmbH, 2016
- [18] STEICO SE: *Internetauftritt Steico*. URL <http://www.steico.com/> – Überprüfungsdatum 2018-03-28
- [19] ISOCELL GMBH: *Internetauftritt Isocell*. URL <http://www.isocell.com/de/> – Überprüfungsdatum 2018-03-28
- [20] ISOFLOC DÄMMSTATT GMBH: *Internetauftritt Isofloc*. URL <https://isofloc.de/> – Überprüfungsdatum 2018-03-28
- [21] SOPREMA GMBH: *Internetauftritt Pavatex*. URL <https://www.pavatex.de> – Überprüfungsdatum 2018-03-28
- [22] BEST WOOD SCHNEIDER® GMBH: *Internetauftritt best wood SCHNEIDER*. URL <https://www.schneider-holz.com/best-wood-schneider-de.html> – Überprüfungsdatum 2018-03-28

- [23] MAKARCHUK, Olha: *Brandschutzwirkung biogener Dämmstoffe bei Holzrahmenbaukonstruktionen - thermische Formstabilität*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Masterarbeit. 2016
- [24] Norm DIN EN 1363-1:2012-10. 10/2012. *Feuerwiderstandprüfungen*
- [25] HEMMINGER, Wolfgang F. ; CAMMENGA, Heiko Karl: *Methoden der thermischen Analyse*. Berlin : Springer, 1989 (Anleitungen für die chemische Laboratoriumspraxis 24)
- [26] MÜLLER, Andreas: *Analyse und Auswertung temperaturabhängiger Materialkennwerte von biogenen Dämmstoffen*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. 2017
- [27] HUNTIEROVÁ, Zuzana: *Analyse des Brandverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Feuerschutzmitteln*. München, Ludwig-Maximilians-Universität München. Dissertation. 1995
- [28] GUSTAFSSON, S. E.: *Transient hot strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity*. In: *The Rigaku Journal* 4 (1987), 1/2, S. 16–28. URL <https://www.rigaku.com/downloads/journal/Vol4.1987/gustafsson.pdf>
- [29] KRUPA, Peter ; MALINARIČ, Svetozár: *Using the Transient Plane Source Method for Measuring Thermal Parameters of Electroceramics*. In: *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 8 (2014), Nr. 5, S. 735–750. URL <https://www.waset.org/publications/9998149/using-the-transient-plane-source-method-for-measuring-thermal-parameters-of-electroceramics>
- [30] WULF, Rhena: *Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen : Untersuchungen zu Ursachen für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg. Dissertation. 2009
- [31] Norm DIN EN 12664:2001-05. 05.2001. *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001*
- [32] Norm DIN EN 12667:2001-05. 05.2001. *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001*

- [33] KOLLMANN, Franz ; MALMQUIST, Lars: *Über die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen*. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 14 (1956), Nr. 6, S. 201–204
- [34] FORSCHUNGSINSTITUT FÜR WÄRMESCHUTZ E.V. MÜNCHEN: *Prüfbericht L2-11/18: Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667:2001*. 16.04.2018
- [35] FRANGI, Andrea: *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken*. Zürich, 2001
- [36] KÖNIG, Jürgen: *Structural fire design according to Eurocode 5—design rules and their background*. In: *Fire and Materials* 29 (2005), Nr. 3, S. 147–163 – Überprüfungsdatum 2016-08-11
- [37] DIN EN 1995-1-2:2010-12. 12-2010. *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*
- [38] Norm DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09. 09.5015. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke - Nationaler Anhang - festgelegte Parameter*
- [39] MAEGER, Katrin Nele: *Implementation of new materials to the component additive method for fire design of timber structures*. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool Ehitusteaduskont. Masterarbeit. 2016
- [40] Norm DIN EN 13171:2015-04. 04-2015. *Wärmedämmstoffe für Gebäude*
- [41] KÖNIG, J. ; WALLEIJ, L.: *Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires Part 2: A design model for standard fire exposure*
- [42] ÖSTMAN, B. ; MIKKOLA E. ; STEIN R. ; FRANGI, A. ; KÖNIG, J. ; DHIMA, D. ; HAKKARAINEN T. ; BREGULLA J.: *Fire safety in Timber Buildings : Technical Guideline for Europe*. SP Report 2010:19
- [43] JUST, Alar: *Structural Fire Design of Timber Frame Assemblies Insulated by Glass Wool and Covered by Gypsum Plasterboards*. Tallinn, Tallinn University of Technology. Dissertation. 2010 – Überprüfungsdatum 2016-12-30
- [44] JUST, Alar: *Contribution of insulation material to the fire performance of timber buildings components*. URL <https://www.etis.ee/Portal/Projects/Display/b716f781-8319-4319-b5df-6dffa8f7839f?lang=ENG> – Überprüfungsdatum 2018-04-17
- [45] TISO, Mattia: *Effective Cross section method for timber frame assemblies - definition of coefficients and zero strength layers*. Schweiz, 2017 (STSM report COST FP 1404)
- [46] HECHTL, Katharina: *Ermittlung der Abbrandrate von Holzständern in biogen gedämmten Holztafelementen*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Master Thesis. 2017-10-18

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Gesamtmarkt Dämmstoffe in Deutschland 2011 [17].....	19
Abbildung 2-2: Biogene Dämmstoffe als Gefachdämmung .....	22
Abbildung 2-3: Biogene Dämmstoffe als Installationsebene .....	22
Abbildung 2-4: Biogene Dämmstoffe als WDV-System .....	22
Abbildung 3-1: Ablauf der 1. Versuchsreihe [23] .....	27
Abbildung 3-2: Masseverlust flexible Dämmung .....	28
Abbildung 3-3: Masseverlust druckfeste Dämmung.....	28
Abbildung 3-4: Volumen flexible Dämmung.....	28
Abbildung 3-5: Volumen druckfeste Dämmung .....	28
Abbildung 3-6: Länge flexible Dämmung.....	29
Abbildung 3-7: Länge druckfeste Dämmung .....	29
Abbildung 3-8: Breite flexible Dämmung .....	29
Abbildung 3-9: Breite druckfeste Dämmung .....	29
Abbildung 3-10: Dicke flexible Dämmung.....	29
Abbildung 3-11: Dicke druckfeste Dämmung.....	29
Abbildung 3-12: Volumenänderung .....	32
Abbildung 3-13: Änderung der Dicke.....	32
Abbildung 3-14: Längenänderung flexible Dämmung .....	32
Abbildung 3-15: Breitenänderung druckfeste Dämmung .....	32
Abbildung 3-16: Masseverlust .....	33
Abbildung 3-17: L-Prüfkörper .....	34
Abbildung 3-18: Wand- und Deckenelement der Prüfkörper.....	34
Abbildung 3-19: Schnitt durch Wand- und Deckenelement Im Prüfofen .....	35
Abbildung 3-20: Aufsicht Deckenelement im Prüfofen.....	35
Abbildung 3-21: Ansicht des Wandelements im Prüfofen .....	35
Abbildung 3-22: Anordnung der Thermoelemente am und im Ständer .....	37
Abbildung 3-23: Lagesicherung der Dämmung durch Drahtgitter nach Abfallen der Bekleidung.....	39
Abbildung 3-24: Schnitt durch den Prüfkörper der liegend geprüften Versuche.....	40
Abbildung 3-25: Aufsicht auf den unbekleideten Prüfkörper der liegend geprüften Versuche .....	41
Abbildung 3-26: Anordnung Thermoelemente am KVH-Querschnitt.....	42
Abbildung 3-27: Versuchskörper 2 .....	42
Abbildung 3-28: Im Ofen liegender Prüfkörper .....	42
Abbildung 3-29: Aufsicht Prüfkörper Teil 8 - Versuche .....	44

---

Abbildung 4-1: schematische Darstellung einer Thermowaage [26].....	48
Abbildung 4-2: Thermowaage "Linseis STA PT-1750" [26] .....	49
Abbildung 4-3: Temperatur-Zeit-Programm der TGA-Messung, Holzfaser, $\beta = 5$ K/min .....	49
Abbildung 4-4: Temperatur-Zeit-Programm der TGA-Messung; Zelluloseflocken, $\beta=5$ K/min .....	50
Abbildung 4-5: Holzfaser: TG- und DTG-Kurve der TGA-Messung; $\beta = 5$ K/min [26] .....	51
Abbildung 4-6: Zellulose: TG- und DTG-Kurve der TGA-Messung; $\beta=5$ K/min [26] .....	52
Abbildung 4-7: schematischer Aufbau des Hot-Disk-Verfahrens [29] .....	53
Abbildung 4-8: Temperatur-Zeit-Verlauf für die Hot-Disk Messung .....	55
Abbildung 4-9: Wärmeleitfähigkeit der Holzfaserdämmung aus dem Hot-Disk-Verfahren ..	55
Abbildung 4-10: spez. Wärmespeicherkapazität der Holzfaserdämmung aus dem Hot-Disk-Verfahren.....	56
Abbildung 4-11: Wärmeleitfähigkeit der Zellulosedämmung nach dem Hot-Disk-Verfahren	57
Abbildung 4-12: spez. Wärmespeicherkapazität der Zellulosedämmung nach dem Hot-Disk-Verfahren.....	58
Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Einplattengeräts [30].....	59
Abbildung 4-14: Schematische Darstellung des Zweiplattengerätes [30] .....	59
Abbildung 4-15: mögliche Anordnungen der Wärmebrücken zwischen Holzfasern innerhalb eines Dämmstoffes nach Kollmann & Malmquist [33] .....	60
Abbildung 4-16: Werte der Wärmeleitfähigkeit der Holzfaser und Zellulosedämmung über der Temperatur nach einer Konditionierung bei den jeweiligen Warmseitentemperaturen [34] .....	61
Abbildung 5-1: Art des Probekörpers .....	63
Abbildung 5-2: Ausführung der Belastung des Prüfkörpers.....	63
Abbildung 5-3: Art der Belastung für wandartige Prüfkörper.....	63
Abbildung 5-4: Verteilung der Feuerwiderstandsdauern der Versuche.....	64
Abbildung 5-5: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Bekleidungen auf der feuerzugewandten Seite .....	64
Abbildung 5-6: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Bekleidungen auf der feuerzugewandten Seite .....	64
Abbildung 5-7: Prozentualer Anteil der Probekörper mit einer Hinterlüftung an der feuerzugewandten Seite .....	65
Abbildung 5-8: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Zwischendämmungen .....	65
Abbildung 5-9: Prozentuale Verteilung der Querschnittsprofile .....	65
Abbildung 5-10: Prozentuale Verteilung der Dicke der Gefachdämmung .....	65
Abbildung 6-1: FE-Modell nach Schleifer [1] .....	67

---

Abbildung 6-2: Generierung zweier Vektoren im 45°- und 135°-Winkel durch einen Punkt der ANSYS-Kurve .....	69
Abbildung 6-3: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf feuerabgewandter Seite der 60 mm Holzfaserdämmung.....	73
Abbildung 6-4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf feuerabgewandter Seite der 160 mm Holzfaserdämmung.....	73
Abbildung 6-5: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) .....	75
Abbildung 6-6: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 100 mm Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) .....	75
Abbildung 6-7: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren) .	76
Abbildung 6-8: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 100 mm Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	76
Abbildung 6-9: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 60 mm Zellulosedämmung.....	78
Abbildung 6-10: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten (FE-) Temperaturverläufen auf der feuerabgewandten Seite der 120 mm Zellulosedämmung .....	78
Abbildung 6-11: Aufbau der FE-Modelle und zugehörige Temperaturkriterien zur Ermittlung der Grundzeiten [1] .....	79
Abbildung 6-12: Ermittlung des Einflusses der Vorerwärmung durch schützende Schichten i-1 [1].....	80
Abbildung 6-13: Einteilung des Bauteils in schützende und isolierende Schichten nach Schleifer [1].....	82
Abbildung 6-14: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Massivholzplatten geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei $T_{Grenz} = 270^{\circ}C$ abfallen .....	83
Abbildung 6-15: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose/Holzfaser geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei $T_{Grenz} = 600^{\circ}C$ abfallen .....	83
Abbildung 6-16: Aufbau zur Bestimmung der Zeitdifferenz der Isolationszeit von Zellulose/Holzfaser geschützt durch Gipsplatten des Typ F, die bei $T_{Grenz} = 400^{\circ}C$ abfallen .....	83

Abbildung 6-17: Grundschutzzeiten für Zellulose $\rho=50 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke.....	84
Abbildung 6-18: Positionsbeiwert $k_{\text{pos,exp}}$ zur Berücksichtigung davorliegender Schichten für Zellulose .....	85
Abbildung 6-19: Positionsbeiwert für $\Sigma t_{\text{prot},i-1}$ kleiner gleich $t_{\text{prot},i}/2$ .....	85
Abbildung 6-20: Positionsbeiwert für $\Sigma t_{\text{prot},i-1}$ größer als $t_{\text{prot},i}/2$ .....	85
Abbildung 6-21: Positionsbeiwert $k_{\text{pos,unexp}}$ zur Berücksichtigung dahinterliegender Dämmschichten für Zellulose.....	86
Abbildung 6-22: Zeitdifferenz $\Delta t_i$ bei Verwendung von Gipsplatten des Typ F oder Gipsfaserplatten als schützende Schicht vor Zellulose bei einer Wandkonstruktion..	86
Abbildung 7-1: verschiedene Wege des Wärmedurchgangs durch eine Holzkonstruktion .	89
Abbildung 7-2: Einteilung des Bauteils in schützende und isolierende Schichten nach Schleifer [1].....	90
Abbildung 7-3: Ermittlung der Schutzzeiten $t_{\text{prot},1}$ und $t_{\text{prot},2}$ nach Schleifer [1].....	90
Abbildung 7-4: Schutzzeit/Grundschutzzeit der druckfesten Holzfaserplatte hergestellt im Nassverfahren aus verschiedenen Großbrandversuchen in Abhängigkeit der Rohdichte .....	96
Abbildung 7-5: Schutzzeit/Grundschutzzeit der druckfesten Holzfaserplatte hergestellt im Trockenverfahren aus verschiedenen Großbrandversuchen in Abhängigkeit der Rohdichte .....	96
Abbildung 7-6: Grundschutzzeiten der druckfesten Holzfaserdämmung EN 13171 in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens (Nass- oder Trockenverfahren).....	97
Abbildung 7-7: Grundschutzzeiten aller druckfesten Holzfaserplatten aus vorliegenden Versuchen .....	98
Abbildung 7-8: Vergleich der Schutzzeiten von flexibler Holzfaserdämmung in Wandkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten der Holzfaserdämmung in Wandkonstruktionen im Handrechenverfahren .....	102
Abbildung 7-9: a) Direkter Wärmedurchgang durch das Bauteil.....	103
Abbildung 7-10: b) Heiße Gase strömen über die Flanken hinter die Dämmung infolge des Schrumpfen des Dämmstoffes.....	103
Abbildung 7-11: Vergleich der Gesamtisoliationszeit $t_{\text{ins}}$ von Wandkonstruktionen mit flexiblen Holzfaserdämmungen im Versuch mit der Gesamtisoliationszeit im Handrechenverfahren .....	104
Abbildung 7-12: Vergleich der Schutzzeiten von druckfester Holzfaserdämmung (unverputzt) in Wandkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten von Wandkonstruktionen im Handrechenverfahren .....	106

Abbildung 7-13: Vergleich der Gesamtisoliationszeit $t_{ins}$ von Wandkonstruktionen mit druckfesten Holzfaserdämmungen im Versuch mit der Gesamtisoliationszeit im Handrechenverfahren .....	107
Abbildung 7-14: Vergleich der Schutzzeiten von Zelluloseeinblasdämmung in Wand- und Deckenkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten im Handrechenverfahren	109
Abbildung 7-15: Vergleich der Schutzzeiten von Zelluloseeinblasdämmung in Wand- und Deckenkonstruktionen im Versuch mit den Schutzzeiten im Handrechenverfahren nach Einführung eines $k_{fall}$ Faktors .....	110
Abbildung 7-16: Vergleich der Gesamtisoliationszeit $t_{ins}$ von Wand- und Deckenkonstruktionen mit Zelluloseeinblasdämmung im Versuch mit der Gesamtisoliationszeit im Handrechenverfahren .....	111
Abbildung 8-1: Darstellung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Zeit $t$ für $t_{ch} < t_f$ [37]	115
Abbildung 8-2: Darstellung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Zeit für $t_{ch} = t_f$ und einer Abbrandtiefe von 25 mm zum Zeitpunkt $t_a$ [37] .....	115
Abbildung 8-3: Ideeller verbleibender Restquerschnitt eines durch Hohlraumdämmung geschützten Holzbauteils einer Holztafel [37] .....	116
Abbildung 8-4: Abbrandphasen von geschütztem Holz [41] .....	116
Abbildung 8-5: Querschnittsfaktor in Abhängigkeit von der Breite [41] .....	117
Abbildung 8-6: Dämmungsfaktor $k_2$ in Abhängigkeit der Bekleidungsdicke $h_b$ [41] .....	118
Abbildung 8-7: Post Protection Faktor $k_3$ in Abhängigkeit von der Versagenszeit der Bekleidung [41] .....	119
Abbildung 8-8: Verhältnis der Querschnittsfläche zum Abbrandverhältnis [41] .....	120
Abbildung 8-9: Verhältnis der Widerstandsmomente zum Abbrandverhältnis [41] .....	120
Abbildung 8-10: Verhältnis des Flächenträgheitsmomentes zum Abbrandverhältnis [41].	120
Abbildung 8-11: Abbrandmodell für Holzrahmenkonstruktionen gedämmt mit Glaswolle [42] .....	121
Abbildung 8-12: Positionen der Thermolemente Just/Tiso [2] .....	122
Abbildung 8-13: Ideeller Restquerschnitt und Abbrandphasen des Berechnungsmodells	124
Abbildung 8-14: Darstellung der Flächen zur Berechnung der Widerstandsmomente $W_n$ und $W_{fi}$ .....	127
Abbildung 8-15: Darstellung des Rückzugs der Dämmung vom Holzquerschnitt bezogen auf das Temperaturprofil [46] .....	130
Abbildung 8-16: Rückzug der Holzfaserdämmung über die Zeit $d_{300,s}(t)$ bei den Versuchen 11 und 12 der ersten Versuchsreihe .....	131
Abbildung 8-17: Rückzug der Holzfaserdämmung über die Zeit $d_{300,s}(t)$ bei der zweiten Versuchsreihe .....	132

Abbildung 8-18: Rückzug der Zellulosedämmung über die Zeit $d_{300,s}(t)$ bei den Versuchen 10, 11, 12 der ersten Versuchsreihe .....	133
Abbildung 8-19: Rückzug der Zellulosedämmung über die Zeit $d_{300,s}(t)$ der zweiten Versuchsreihe.....	133
Abbildung 8-20: Gleichungen zur Berechnung der Rückzugsgeschwindigkeit nach Tiso [45] .....	135
Abbildung 8-21: Rückzug nach Tiso für die 1. Versuchsreihe Zellulose [45] .....	137
Abbildung 8-22: Rückzug nach Tiso für die 1. Versuchsreihe Holzfaser [45].....	137
Abbildung 8-23: Rückzug nach Tiso für die 2. Versuchsreihe Zellulose [45] .....	137
Abbildung 8-24: Rückzug nach Tiso für die 2. Versuchsreihe Holzfaser [45].....	137
Abbildung 8-25: Bestimmung der Protection Level für HTE, GW und CF nach Tiso [45]..	139
Abbildung 8-26: Bestimmung der Protection Level für Zellulose nach Versuchsreihe 1 ...	139
Abbildung 8-27: Bestimmung der Protection Level für Holzfaser nach Versuchsreihe 1...	139
Abbildung 8-28: Bestimmung der Protection Level für Zellulose nach Versuchsreihe 2 ...	139
Abbildung 8-29: Bestimmung der Protection Level für Holzfaser nach Versuchsreihe 2...	139
Abbildung 8-30: Darstellung der ermittelten $k_{2,1}$ -Faktoren im Verhältnis zur Gesamtdicke aller Bekleidungslagen .....	145
Abbildung 8-31: Vergleich der ermittelten Dämmkoeffizienten und Koeffizienten für das Verhalten nach Versagen der Brandschutzbekleidung mit den Koeffizienten nach DIN EN 1995-1-2 und Tiso.....	148
Abbildung 8-32: Abbrand der Holzständer der zweiten Versuchsreihe mit Zellulose (V3)	152

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Darstellung der Gebäudeklassen nach MBO .....	13
Tabelle 2-2: Baurechtliche Anforderungen nach Musterbauordnung (MBO) und Sonderbauverordnungen an Baustoffe und Bauteile .....	16
Tabelle 2-3: Zulässige Feuerwiderstandsfähigkeiten der tragenden und aussteifenden Bauteile nach IndBauRL [16] nach Verfahren nach Abschnitt 6.....	18
Tabelle 2-4: Bauphysikalische Kenngrößen von Zellulose als Einblasdämmstoff [17–20] ..	20
Tabelle 2-5: Bauphysikalische Kenngrößen von Zellulose als Matte [17–20].....	20
Tabelle 2-6: Bauphysikalische Kenngrößen von Holzfaserplatten [17, 18, 21, 22].....	21
Tabelle 2-7: Bauphysikalische Kenngrößen von Holzfaserplatten [17, 18, 21, 22] .....	22
Tabelle 3-1: Prozesse bei Erwärmung von Holz sowie Zusatzstoffen von biogenen Dämmstoffen.....	25
Tabelle 3-2: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe Durchwärmungsversuche .....	26
Tabelle 3-3: Temperaturmessstufen der ersten Versuchsreihe .....	27
Tabelle 3-4: Prüfkörper der ersten Versuchsreihe Durchwärmungsversuche .....	31
Tabelle 3-5: Übersicht der Versuche zur Resttragfähigkeit.....	37
Tabelle 3-6: Dämmstoffe und Schutzzeiten der einzelnen Gefache der „liegenden“ Versuche .....	41
Tabelle 3-7: Darstellung der Versuchsaufbauten im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8.....	45
Tabelle 4-1: Messprogramm der Guarded-Hot-Plate-Versuche.....	61
Tabelle 6-1: Effektive temperaturabhängige spezifische Wärmespeicherkapazität für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	72
Tabelle 6-2: Effektiver temperaturabhängiger Masseverlust für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	72
Tabelle 6-3: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für flexible Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	73
Tabelle 6-4: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für druckfeste Holzfaserdämmung (Trockenverfahren) mit einer Rohdichte von ca. 140 kg/m <sup>3</sup> .....	74
Tabelle 6-5: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für druckfeste Holzfaserdämmung (Nassverfahren) mit einer Rohdichte von ca. 230 kg/m <sup>3</sup> .....	75
Tabelle 6-6: Effektive temperaturabhängige spezifische Wärmespeicherkapazität für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	76
Tabelle 6-7: Effektiver temperaturabhängiger Masseverlust für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	77
Tabelle 6-8: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Zellulosedämmung mit einer Rohdichte von ca. 50 kg/m <sup>3</sup> .....	77

Tabelle 7-1: Effektive temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für alle druckfesten Holzfaserdämmungen.....	98
Tabelle 8-1: Übersicht der Versuche nach Tiso mit Zellulose gedämmt [2] .....	123
Tabelle 8-2: Definition der Protection-Level nach Tiso/Just zur Einordnung von Dämmstoffen .....	123
Tabelle 8-3: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der ersten Versuchsreihe .....	134
Tabelle 8-4: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der zweiten Versuchsreihe .....	134
Tabelle 8-5: Vergleich der Rückzugsgeschwindigkeiten der ersten und zweiten Versuchsreihe nach Tiso.....	138
Tabelle 8-6: Einordnung der Dämmstoffe in Protection Level.....	140
Tabelle 8-7: Beginn des Abbrandes $t_{ch}$ .....	141
Tabelle 8-8: Abbrandtiefen in der Achse des Holzquerschnitts .....	144
Tabelle 8-9: $t$ , $t_f$ , $t_{ch}$ -Werte für die Ermittlung der Abbrandrate .....	144
Tabelle 8-10: $\beta_{2,1}$ - und $\beta_{3,1}$ -Werte mit resultierenden $k_{2,1}$ -, und $k_{3,1}$ -Faktoren .....	145
Tabelle 8-11: Angepasste $k_{2,1}$ und $k_{3,1}$ Werte für Holzfaserdämmstoffe .....	147
Tabelle 8-12: Zusammenstellung der ermittelten Abbrandraten, Dämmkoeffizienten und Koeffizienten für das Verhalten nach Versagen der Brandschutzbekleidung.....	147
Tabelle 8-13: Ermittlung von $t_{ch,2}$ für die vorliegenden Versuche nach der Gleichung von Tiso [45].....	149
Tabelle 8-14: Ermittlung von $t_{ch,2}$ mit angepassten Werten für Zellulose.....	150
Tabelle 8-15: Restquerschnittswerte zur Bestimmung von $k_{3,2}$ .....	151
Tabelle 8-16: $k_{3,2}$ -Faktoren.....	151
Tabelle 8-17: Vergleich $d_{ch,1,n}$ , $I_n$ aus Versuch mit Zellulosefaser mit $d_{ch,1,n}$ , $I_n$ nach EC5 für Steinwolle .....	152

## Anhang

## Anhang A Bezeichnungen für Baustoffe und Bauteile nach DIN 4102

### Anhang A.1: Bauteile

Tabelle 1: Baustoffklassen nach DIN 4102: Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1 [21]

Bauaufsichtliche Benennung	Baustoffklasse nach DIN 4102
Nichtbrennbare Baustoffe	A
	A1
	A2
Brennbare Baustoffe	B
Schwer entflammbare Baustoffe	B1
Normal entflammbare Baustoffe	B2
Leicht entflammbare Baustoffe	B3

### Anhang A.2: Bauteile

Tabelle 2: Bauteilklassen nach DIN 4102-2: Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1 [21]

Bauaufsichtliche Benennung	Klasse nach DIN 4102-2	Kurzbezeichnung nach DIN 4102-2
feuerhemmend	Feuerwiderstandsklasse F 30	<b>F 30 B</b> <sup>1)</sup>
feuerhemmend und in den wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 30 und in den wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen <sup>5)</sup>	<b>F 30 AB</b> <sup>1)</sup>
feuerhemmend und aus nicht brennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 30 und aus nicht brennbaren Baustoffen	<b>F 30 A</b> <sup>1)</sup>
Hochfeuerhemmend	Feuerwiderstandsklasse F 60 und in den wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen	<b>F 60 AB</b> <sup>2)</sup>
	Feuerwiderstandsklasse F 60 und aus nicht brennbaren Baustoffen	<b>F 60 A</b> <sup>2)</sup>
feuerbeständig	Feuerwiderstandsklasse F 90 und in den wesentlichen Teilen aus nicht brennbaren Baustoffen	<b>F 90 AB</b> <sup>3) 4)</sup>
feuerbeständig und aus nicht brennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 90 und aus nicht brennbaren Baustoffen	<b>F 90 A</b> <sup>3) 4)</sup>
<sup>1)</sup> Bei nicht tragenden Außenwänden auch W 30 zulässig <sup>2)</sup> Bei nicht tragenden Außenwänden auch W 60 zulässig <sup>3)</sup> Bei nicht tragenden Außenwänden auch W 90 zulässig <sup>4)</sup> Nach bestimmten bauaufsichtlichen Verwendungsvorschriften einiger Länder auch F 120 gefordert <sup>5)</sup> Die Bezeichnung „in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen“ entspricht der Beschreibung „Bauteile, deren tragende und aussteifende Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und die bei raumabschließenden		

Bauteilen zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben“, die in neueren Bauordnungen oft zu finden ist

### Anhang A.3: Sonderbauteile

Tabelle 3: Sonderbauteilklassen nach DIN 4102 Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bau-  
regelliste A Teil 1 [21]

Bauteil	Nach DIN 4102	Feuerwiderstandsklasse					Zusatz
		Feuerwiderstandsdauer [min]					
		≥ 30	≥ 60	≥ 90	≥ 120	≥ 180	
Wände, Decken, Stützen	2	F 30	F 60	F 90	F 120	F 180	A/ AB/ B
Brandwände	3	F 90-A + Stoßbeanspruchung					—
Nichttragende Außenwände		W 30	W 60	W 90	W 120	W 180	A/ AB/ B
Feuerschutzabschlüsse (Türen, Tore, Klappen)	5	T 30	T 60	T 90	T 120	T 180	—
Abschlüsse in Fahrschachtwänden der Feuerwiderstandsklasse F 90		verhindern die Übertragung von Feuer und Rauch in andere Geschosse					—
Brandschutzverglasungen - strahlungs <u>u</u> ndurchlässig - strahlungsdurchlässig	13	F 30	F 60	F 90	F 120	—	—
		G 30	G 60	G 90	G 120	—	—
Rohre und Formstücke für Lüftungsleitungen	6	L 30	L 60	L 90	L 120	—	—
Absperrvorrichtungen in Lüftungsleitungen (Brandschutzklappen)		K 30	K 60	K 90		—	—
Kabelabschottungen	9	S 30	S 60	S 90	S 120	S 180	—
Installationsschächte und Kanäle	11	I 30	I 60	I 90	I 120	—	—
Rohrdurchführungen		R 30	R 60	R 90	R 120	—	—
Bedachungen	7	Widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme					—
Funktionserhalt elektrischer Leitungen	12	E 30	E 60	E 90	—	—	—

## Anhang B Bezeichnungen für Baustoffe und Bauteile nach DIN EN 13501 und Bauregelliste Teil A

### Anhang B.1: Kurzzeichen für Baustoffe

Tabelle 4: Kurzzeichen für Baustoffe nach DIN EN 13501: Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1 [21]

Kurzzeichen	Kriterium	Anwendungsbereich
A1 A2 B C D E F	Baustoffklassen (Leistungskriterien)	Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen
s (smoke) s1 – s3	Rauchentwicklung	Anforderungen an die Rauchentwicklung
d (droplets) d0 – d2	Brennendes Abtropfen/ Abfallen	Anforderungen an das brennende Abtropfen/ Abfallen
... fl (floorings)		Brandverhaltensklasse für Bodenbeläge
... L (Linear Pipe Thermal Insulation Products)		Brandverhaltensklasse für Produkte zur Wärmedämmung von linearen Rohren

### Anhang B.2: Baustoffe

Tabelle 5: Baustoffklassen nach DIN EN 13501 mit Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1 [21]

Bauaufsichtliche Anforderungen	Zusatzanforderungen		Europäische Klassen nach DIN EN 13501-1 <sup>1), 2)</sup>		
	Kein Rauch	Kein brennendes Abfallen/ Abtropfen <sup>3)</sup>	Bauprodukte, ausgenommen lin. Rohrdämmstoffe und Bodenbeläge	Lineare Rohrdämmstoffe	Bodenbeläge
nichtbrennbar	✓	✓	A1	A1 <sub>L</sub>	A1 <sub>fl</sub>
	✓	✓	A2 – s1, d0	A2 <sub>L</sub> – s1, d0	A2 <sub>fl</sub> – s1
Schwer entflammbar	✓	✓	B – s1, d0 C – s1, d0	B <sub>L</sub> – s1, d0 C <sub>L</sub> – s1, d0	B <sub>fl</sub> – s1 C <sub>fl</sub> – s1
	—	✓	A2 – s2, d0 A2 – s3, d0 B – s2, d0 B – s3, d0 C – s2, d0 C – s3, d0	A2 <sub>L</sub> – s2, d0 A2 <sub>L</sub> – s3, d0 B <sub>L</sub> – s2, d0 B <sub>L</sub> – s3, d0 C <sub>L</sub> – s2, d0 C <sub>L</sub> – s3, d0	

	✓	—	A2 – s1, d1 A2 – s1, d2 B – s1, d1 B – s1, d2 C – s1, d1 C – s1, d2	A2 <sub>L</sub> – s1, d1 A2 <sub>L</sub> – s1, d2 B <sub>L</sub> – s1, d1 B <sub>L</sub> – s1, d2 C <sub>L</sub> – s1, d1 C <sub>L</sub> – s1, d2	
<b>Schwer entflammbar</b>	—	—	A2 – s3, d2 B – s3, d2 C – s3, d2	A2 <sub>L</sub> – s3, d2 B <sub>L</sub> – s3, d2 C <sub>L</sub> – s3, d2	
<b>Normal entflammbar</b>	—	✓	D – s1, d0 D – s2, d0 D – s3, d0 E	D <sub>L</sub> – s1, d0 D <sub>L</sub> – s2, d0 D <sub>L</sub> – s3, d0 E <sub>L</sub>	A2 <sub>fi</sub> – s2 B <sub>fi</sub> – s2 C <sub>fi</sub> – s2 D <sub>fi</sub> – s1 D <sub>fi</sub> – s2 E <sub>fi</sub>
<b>Fortsetzung normal entflammbar</b>	—	—	D – s1, d1 D – s2, d1 D – s3, d1 D – s1, d2 D – s2, d2 D – s3, d2	D <sub>L</sub> – s1, d1 D <sub>L</sub> – s2, d1 D <sub>L</sub> – s3, d1 D <sub>L</sub> – s1, d2 D <sub>L</sub> – s2, d2 D <sub>L</sub> – s3, d2	
<b>leicht entflammbar</b>	—	—	E – d2 F	E <sub>L</sub> – d2 F <sub>L</sub>	F <sub>fi</sub>
1)	In den europäischen Prüf- und Klassifizierungsregeln ist das Glimmverhalten von Baustoffen nicht erfasst. Für Verwendungen, in denen das Glimmverhalten erforderlich ist, ist es nach nationalen Regeln nachzuweisen				
2)	Mit Ausnahme der Klassen A1 und E kann das Brandverhalten von Oberflächen von Außenwänden und Außenwandbekleidungen (Bauarten) nach DIN EN 13501-1 nicht abschließend klassifiziert werden				
3)	Nicht relevant für Bodenbeläge				

## Anhang B.3: Bauteile

Tabelle 6: Kurzzeichen für Bauteile, Erläuterungen der Klassifizierungskriterien

Herleitung		Kriterium	Anwendungsbereich
<b>Basiszeichen</b>			
R	Résistance	Tragfähigkeit	Zur Beschreibung der Feuerwiderstandsfähigkeit
E	Étanchéité	Raumabschluss	
I	Isolation	Wärmedämmung (unter Brandeinwirkung)	
<b>Zusatz-Kennbuchstaben – zusätzliche Angaben zur Klassifizierung des Feuerwiderstandes</b>			
W	Radiation	Begrenzung des Strahlungsdurchtritts	Zur Beschreibung der Feuerwiderstandsfähigkeit
M	Mechanical	Mechanische Einwirkung auf Wände (Stoßbeanspruchung)	
S <sub>a</sub>	Smoke	Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit (Dichtheit, Leckrate), erfüllt die Anforderungen bei Umgebungstemperatur	Dichtschließende Abschlüsse
S <sub>200</sub>	Smoke <sub>max leakage rate</sub>	Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit (Dichtheit, Leckrate), erfüllt die Anforderungen sowohl bei Umgebungstemperatur, als auch bei 200 °C	Rauchschutzabschlüsse (als Zusatzanforderung auch bei Feuerschutzabschlüssen)
S	Smoke	Rauchdichtheit (Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit)	Entrauchungsleitungen, Entrauchungsklappen, Brandschutzklappen
C	Closing	Selbstschließende Eigenschaft (ggf. mit Anzahl der Lastspiele) einschließlich Dauerfunktion	Rauchschutztüren, Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
C <sub>xx</sub>	—	Dauerhaftigkeit der Betriebssicherheit (Anzahl der Öffnung- und Schließzyklen)	Entrauchungsklappen
P	Power	Aufrechterhaltung der Energieversorgung und/ oder Signalübermittlung	Elektrische Kabelanlagen, allgemein
G	—	Rußbrandbeständigkeit	Schornsteine
K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub>	—	Brandschutzvermögen	Wand- und Deckenbekleidungen (Brandschutzbekleidungen)
l <sub>1</sub> , l <sub>2</sub>	—	Unterschiedliche Wärmedämmungskriterien	Feuerschutzabschlüsse (einschl. Abschlüsse für Förderanlagen)
i→o i←o i↔o	in - out	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Nichttragende Außenwände, Installationsschächte/ -kanäle, Lüftungsanlagen/ -klappen
a↔b	above - below	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Unterdecken

$v_e, h_o$	vertical, horizontal	Für vertikalen/ horizontalen Einbau konzipiert	Lüftungsleitungen, Brandschutzklappen, Entrauchungsleitungen
$v_{ew}, h_{ow}$		Für vertikalen/ horizontalen Einbau in Wände konzipiert	Entrauchungsklappen
$v_{ed}, h_{od}$		Für vertikalen/ horizontalen Einbau in Leitungen konzipiert	Entrauchungsklappen
$v_{edw}, h_{odw}$		Für vertikalen/ horizontalen Einbau in Wände und Leitungen konzipiert	Entrauchungsklappen
U/U	uncapped/ uncapped	Rohrende offen innerhalb des Prüfofens/ Rohrende offen außerhalb des Prüfofens	Rohrabschottungen
U/C	uncapped/ capped	Rohrende offen innerhalb des Prüfofens/ Rohrende geschlossen außerhalb des Prüfofens	Rohrabschottungen
C/U	capped/ uncapped	Rohrende geschlossen innerhalb des Prüfofens/ Rohrende offen außerhalb des Prüfofens	Rohrabschottungen
MA	—	Manuelle Auslösung (auch automatische Auslösung mit manueller Übersteuerung)	Entrauchungsklappen
multi	—	Eignung, einen oder mehrere feuerwiderstandsfähige Bauteile zu durchdringen bzw. darin einzubauen	Entrauchungsklappen, Entrauchungsleitungen
-ef	—	Leistungsverhalten wird nach Außenbrandkurve anstatt nach Einheitstemperaturkurve bestimmt	Nichttragende Außenwände

Tabelle 7: Bauteilklassen nach DIN EN 13501: Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände	Doppelböden	Selbstständige Unterdecken
	ohne Raumabschluss <sup>1)</sup>	mit Raumabschluss <sup>1)</sup>				
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) E 30-ef (i←o)	REI 30	EI 30 (a↔b)
hochfeuerhemmend	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) E 60-ef (i←o)	—	EI 60 (a↔b)
feuerbeständig	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) E 90-ef (i←o)	—	EI 90 (a↔b)
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 min	R 120	REI 120	—	—	—	—
Brandwand	—	REI 90-M	EI 90-M	—	—	—
<b>Bedachungen</b>						
<b>Bauaufsichtliche Anforderungen</b>					<b>Klasse nach DIN EN 13501-5</b>	
Widerstandsfähigkeit gegen Flugfeuer und strahlende Wärme (harte Bedachung)					B <sub>ROOF</sub> (t1)	
Keine Leistung festgestellt (weiche Bedachung)					F <sub>ROOF</sub> (t1)	
<sup>1)</sup> Für die mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Stahlbauteile ist die Angabe IncSlow gemäß DIN EN 13501-2 zusätzlich erforderlich						

## Anhang C Sicherheitskategorien nach MIndBauRL

Mit Sicherheitskategorie werden nach MIndBauRL klassifizierungsstufen bezeichnet, welche die brandschutztechnische Infrastruktur eines Industriebaus einordnen. Diese Einordnung ist abhängig von der Brandmeldung, dem Vorhandensein und der Stärke einer Werkfeuerwehr, sowie der Art der Feuerlöschanlage.

Tabelle 8: Sicherheitskategorien nach MIndBauRL

Sicherheits- kategorie	Beschreibung
<b>K 1</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte ohne besondere Maßnahmen für Brandmeldung und Brandbekämpfung
<b>K 2</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage
<b>K 3.1</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werkfeuerwehr in mindestens Staffelstärke <sup>1)</sup> ; diese Staffel muss aus hauptberuflichen Kräften bestehen <sup>3)</sup>
<b>K 3.2</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werkfeuerwehr in mindestens Gruppenstärke <sup>2), 3)</sup>
<b>K 3.3</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werkfeuerwehr mit mindestens zwei Staffeln <sup>3)</sup>
<b>K 3.4</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werkfeuerwehr mit mindestens drei Staffeln
<b>K 4</b>	Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit selbsttätiger Feuerlöschanlage
<sup>1)</sup> Bestehend aus einem Staffelführer, einem Maschinisten, einem Angriffstrupp und ein Wassertrupp (Trupps jeweils bestehend aus einem Truppmann und einem Truppführer) <sup>2)</sup> Taktische Grundeinheit der Feuerwehr, bestehend aus einem Gruppenführer, einem Maschinisten, einem Melder, einem Angriffstrupp, einem Wassertrupp, einem Schlauchtrupp (Trupps jeweils bestehend aus einem Truppmann und einem Truppführer) <sup>3)</sup> Bei Vorhandensein einer flächendeckenden halbstationären Feuerlöschanlage darf die jeweils nächsthöhere Kategorie angesetzt werden, wenn die Werkfeuerwehr der Verwendung der Feuerlöschanlage zugestimmt hat	

## Anhang D Bauteilkatalog gängiger Konstruktionen mit biogenen Dämmstoffen

### Anhang D.1: Außenwände

#### AW\_01: Außenwand mit hinterlüfteter Fassade ohne Installationsebene

Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	19 - 24	Holzverkleidung	F30 – F690 <sup>2)</sup> U = 0,27 - 0,15 W/(m <sup>2</sup> K) R = 43 – 49 dB
2	30 - 60 <sup>1)</sup>	Lattung / Hinterlüftung	
3	10 - 120	Unterdeckplatte	
4	120 - 280	Hohlraumdämmung <sup>3)</sup>	
5	120 - 280	Ständerwerk	
6	12 - 18	Holzwerkstoffplatte	
7 <sup>4)</sup>	12,5 - 15	Holzfaserplatte (i.d.R. GKF, Gipsfaserplatte)	
Anmerkungen 1) Bei zusätzlicher Querlattung (2 x 30 mm) 2) F90 kann mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten erreicht werden. 3) Weiche Holzfaserdämmplatten oder Zellulose-Einblaßdämmung 4) Schicht 7 kann entfallen, dann in Schicht 6 i.d.R. 15-18 mm GKF / Gipsfaserplatte			

#### AW\_02: Außenwand mit hinterlüfteter Fassade und Installationsebene

Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	19 - 24	Holzverkleidung	F30 – F90 <sup>2)</sup> U = 0,22 - 0,11 W/(m <sup>2</sup> K) R = 55 - 45 dB
2	30 - 48 <sup>1)</sup>	Lattung / Hinterlüftung	
3	20 - 60	Unterdeckplatte	
4	120 - 300	Hohlraumdämmung <sup>3)</sup>	
5	120 - 300	Ständerwerk	
6	10 - 16	Holzwerkstoffplatte	
7	40 - 80	Installationsebene	
8	12,5 - 15	GKF, Gipsfaserplatte	
Anmerkungen 1) Bei zusätzlicher Querlattung (2 x 24 mm) 2) F90 kann mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten erreicht werden. 3) Weiche Holzfaserdämmplatten oder Zellulose-Einblaßdämmung			

**AW\_03: Außenwand mit WDVS ohne Installationsebene**

Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	7	Putzsystem	F30 – F90 <sup>1)</sup> U = 0,24 - 0,15 W/(m <sup>2</sup> K) R = 49 – 52 dB
2	35 - 140	Holzfaserdämmplatte	
3	12 - 15	Holzwerkstoffplatte <sup>2)</sup>	
3	120 - 240	Hohlraumdämmung	
5	120 - 240	Ständerwerk	
6	12 - 19	Holzwerkstoffplatte	
6	12,5	GKF, Gipsfaserplatte	
Anmerkungen 1) F90 kann mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten erreicht werden. 2) Falls erforderlich, kann eine zusätzliche Holzwerkstoffplatte eingebaut werden.			

**AW\_04: Außenwand mit WDVS und Installationsebene**

Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	7	Putzsystem	F30 – F90 <sup>1)</sup> U = 0,18 - 0,10 W/(m <sup>2</sup> K) R = 51 – 59 dB
2	40 - 100	Holzfaserdämmplatte	
2	12 - 15	Holzwerkstoffplatte <sup>2)</sup>	
3	120 - 300	Hohlraumdämmung	
4	120 - 300	Ständerwerk	
5	12,5 - 19	Holzwerkstoffplatte	
6	40 - 80	Installationsebene	
7	12,5 - 15	GKF, Gipsfaserplatte	
Anmerkungen 1) F90 kann mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten erreicht werden. 2) Falls erforderlich, kann eine zusätzliche Holzwerkstoffplatte eingebaut werden.			



## Anhang D.3: Geschossdecken

<b>GD_01: Geschossdecke mit Nassestrich, ohne Schüttung, teilgedämmt</b>			
Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	50	Estrich (nass)	F30 – F60 $L_{nw} = 51 – 64 \text{ dB}$ $R_{nw} = 58 – 66 \text{ dB}$
2	30	Trittschalldämmung	
3	18 - 22	Holzwerkstoffplatte	
4	220	Deckenbalken	
5	100	Dämmung	
6	12 - 24	Schalung, bzw. Holzwerkstoffplatte	
7	12,5 – 25 <sup>1)</sup>	GKF, Gipsfaserplatte	
Anmerkungen 1) Bei 2 x 12,5 mm Gipsplatte			
<b>GD_02: Geschossdecke ohne Estrich, ohne Schüttung, vollgedämmt</b>			
Schicht Nr.	Dicke [mm]	Material	Bauphysikal. Wertebereich
1	18 - 22	Holzwerkstoffplatte	F30 – F60
2	220	Dämmung	
3	220	Deckenbalken	
4	24	Schalung	
5	12,5	GKF, Gipsfaserplatte	
Anmerkungen: -			

## Anhang E Versuchsaufbauten Durchwärmungsversuche

### Anhang E.1 Dokumentation Versuchskörper 20°C (Ausgangslage)

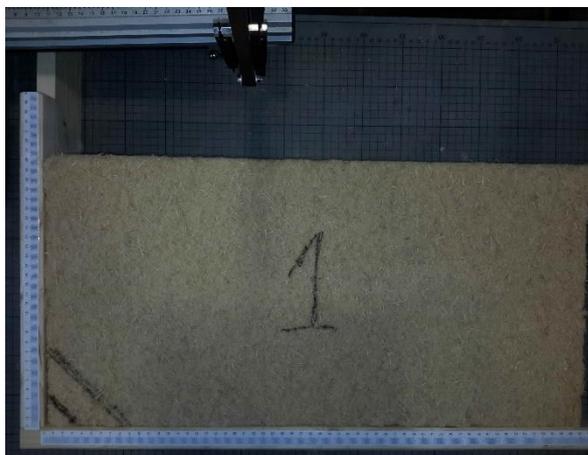


Abbildung 1: Prükörper 1 - 20°C

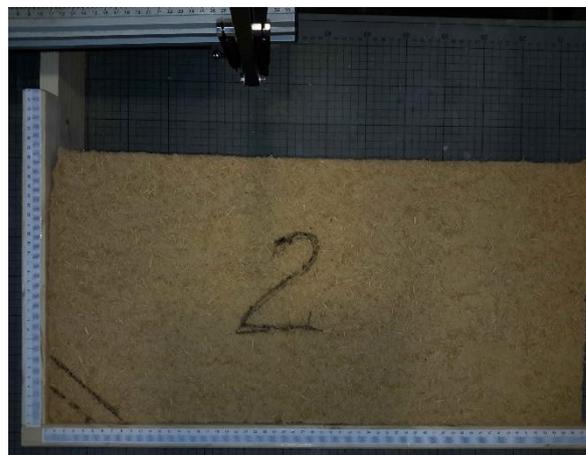


Abbildung 2: Prükörper 2 - 20°C



Abbildung 3: Prükörper 3 - 20°C

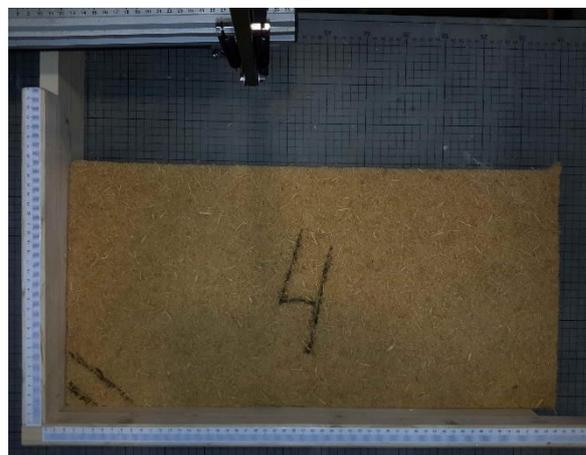


Abbildung 4: Prükörper 4 - 20°C



Abbildung 5: Prükörper 5 - 20°C

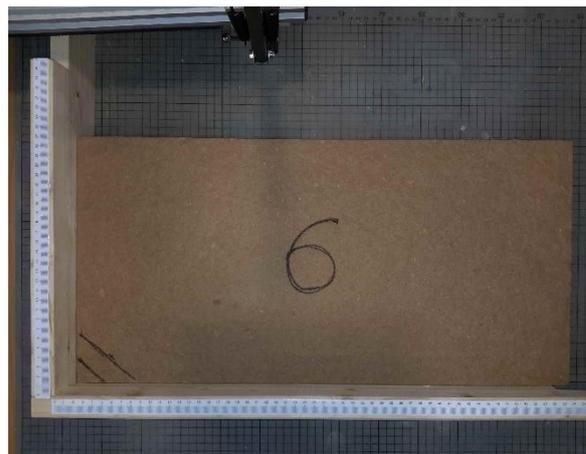


Abbildung 6: Prükörper 6 - 20°C

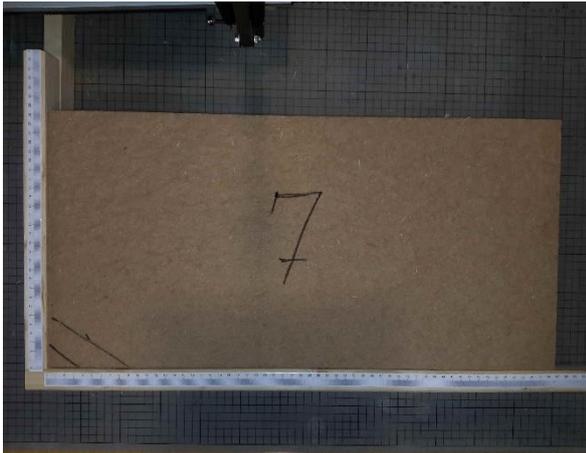


Abbildung 7: Prükörper 7 - 20°C



Abbildung 8: Prükörper 8 - 20°C

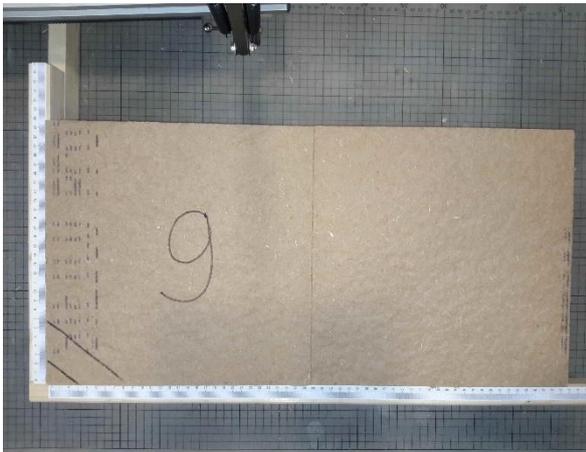


Abbildung 9: Prükörper 9 - 20°C

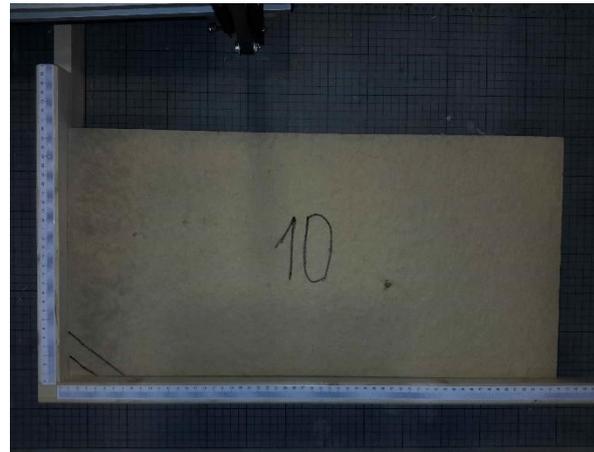


Abbildung 10: Prükörper 10 - 20°C

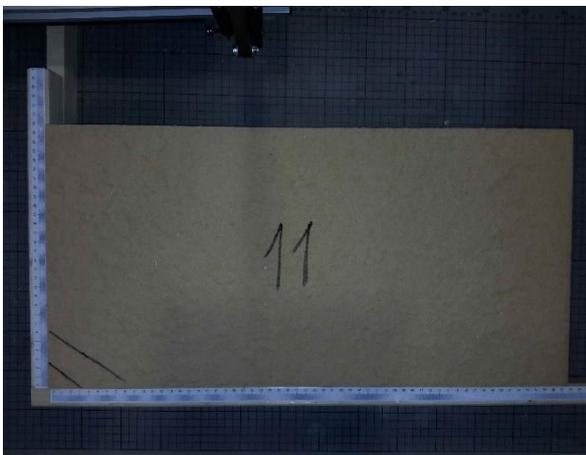


Abbildung 11: Prükörper 11 - 20°C

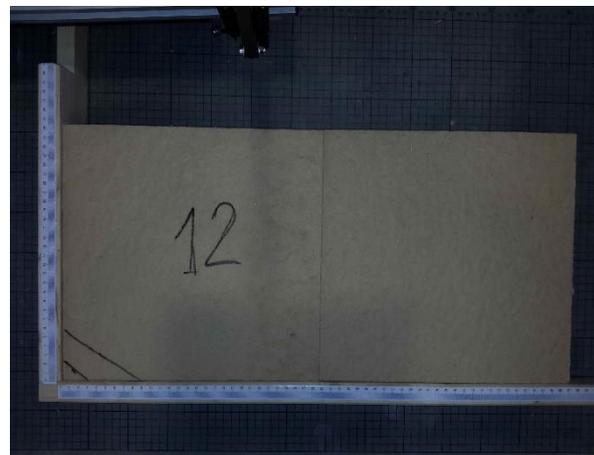


Abbildung 12: Prükörper 12 - 20°C

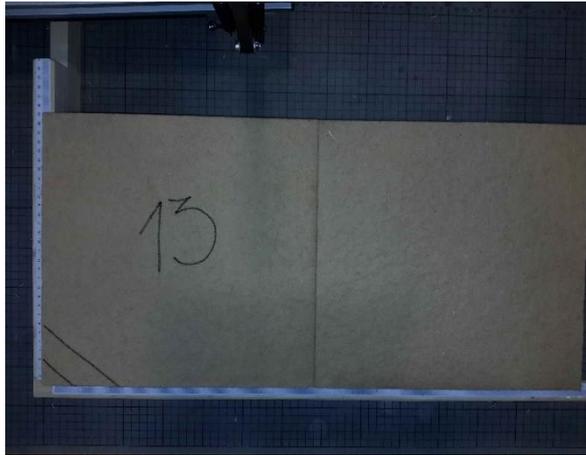


Abbildung 13: Prüfkörper 13 - 20°C



Abbildung 14: Prinzip der Befestigung der Prüfkörper 8, 9, 12, 13

## Anhang E.2 Dokumentation Versuchskörper 50 °C (Ausgangslage)

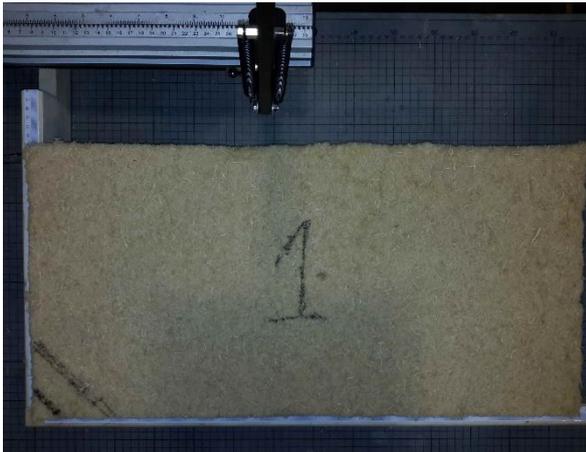


Abbildung 15: Versuchskörper 1 - 50°C



Abbildung 16: Versuchskörper 2 - 50°C



Abbildung 17: Versuchskörper 3 - 50°C



Abbildung 18: Versuchskörper 4 - 50°C



Abbildung 19: Versuchskörper 5 - 50°C

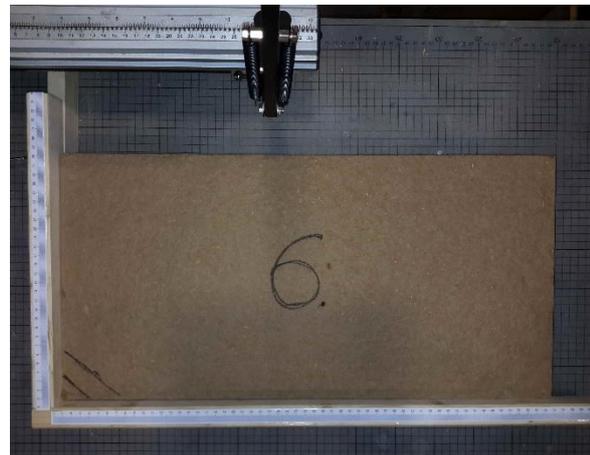


Abbildung 20: Versuchskörper 6 - 50°C

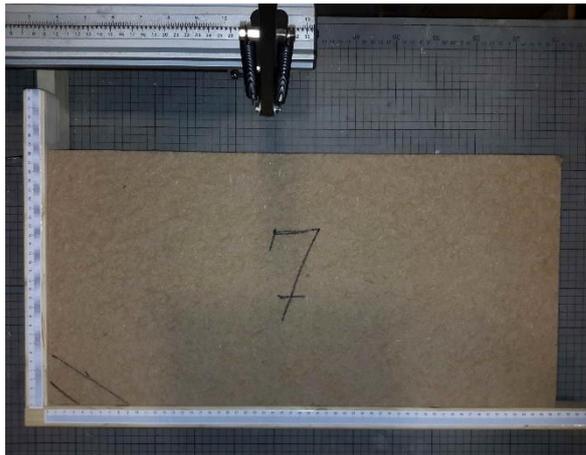


Abbildung 21: Versuchskörper 7 - 50°C



Abbildung 22: Versuchskörper 8 - 50°C

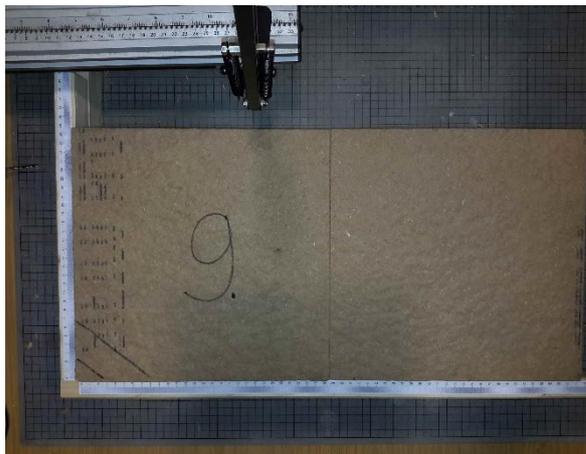


Abbildung 23: Versuchskörper 9 - 50°C



Abbildung 24: Versuchskörper 10 - 50°C

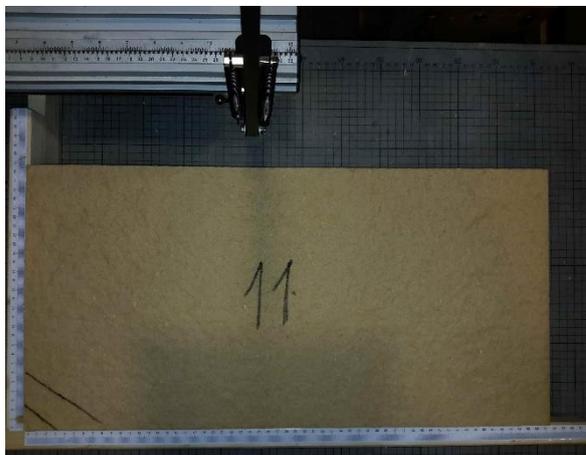


Abbildung 25: Versuchskörper 11 - 50°C



Abbildung 26: Versuchskörper 12 - 50°C

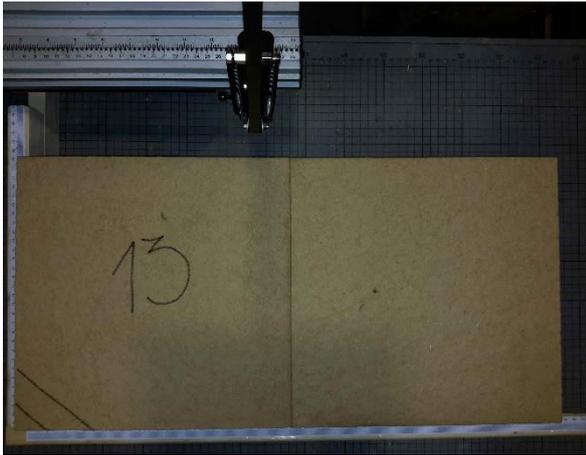


Abbildung 27: Versuchskörper 13 - 50°C

### Anhang E.3 Dokumentation Versuchskörper 70°C (Ausgangslage)

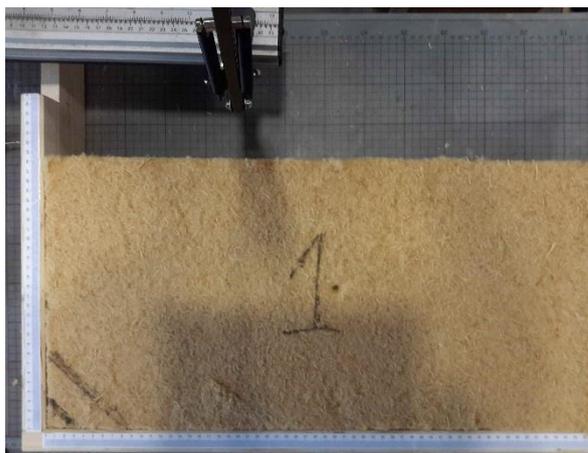


Abbildung 28: Versuchskörper 1 - 70°C



Abbildung 29: Versuchskörper 2 - 70°C

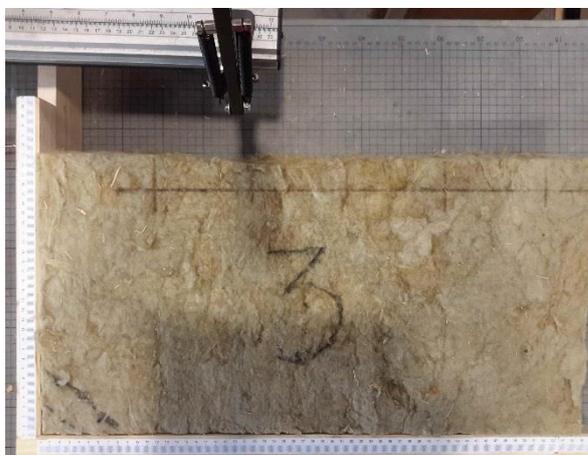


Abbildung 30: Versuchskörper 3 - 70°C

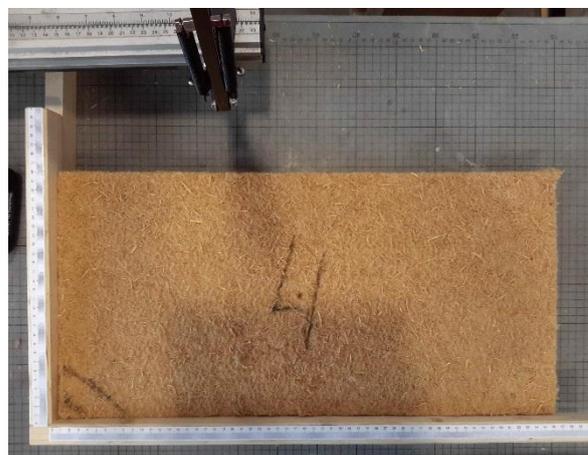


Abbildung 31: Versuchskörper 4 - 70°C



Abbildung 32: Versuchskörper 5 - 70°C

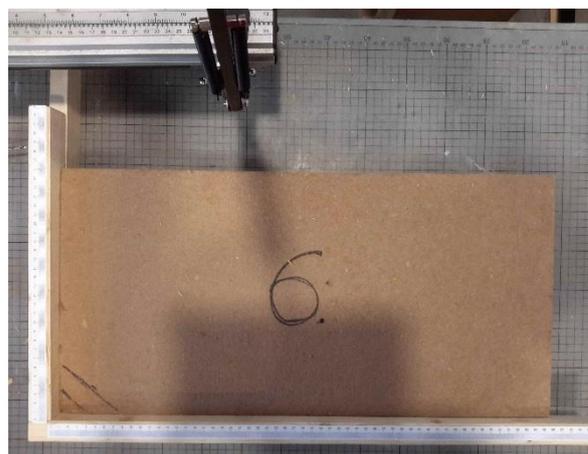


Abbildung 33: Versuchskörper 6 - 70°C

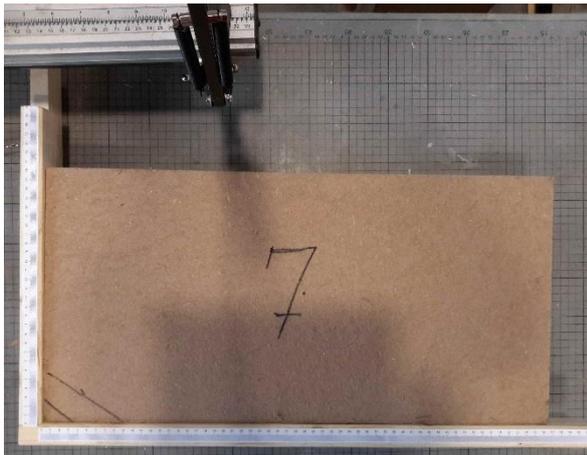


Abbildung 34: Versuchskörper 7 - 70°C

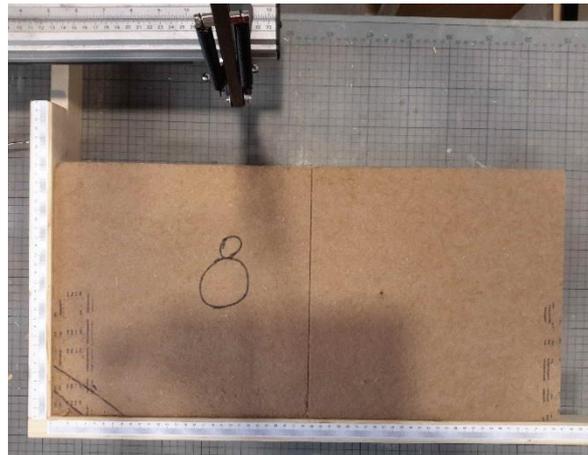


Abbildung 35: Versuchskörper 8 - 70°C

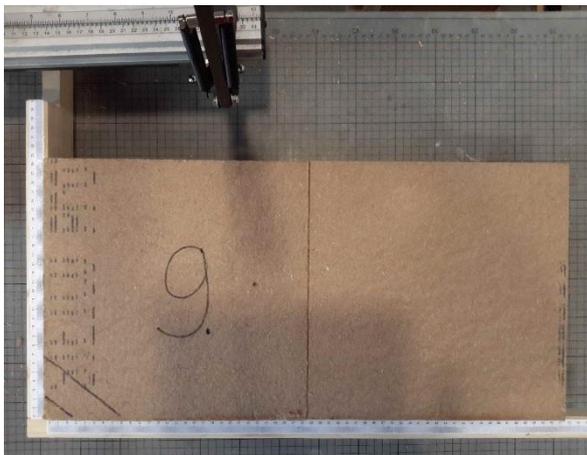


Abbildung 36: Versuchskörper 9 - 70°C

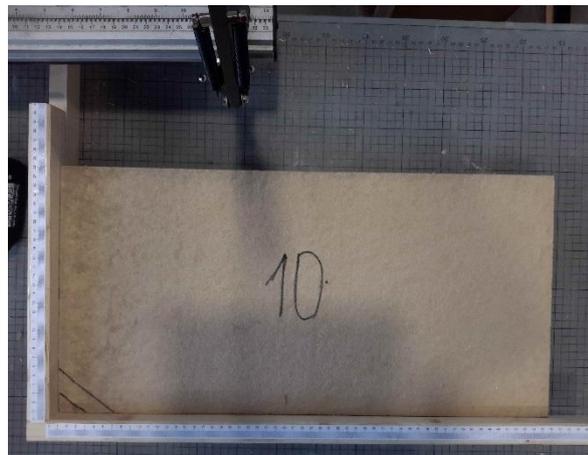


Abbildung 37: Versuchskörper 10 - 70°C

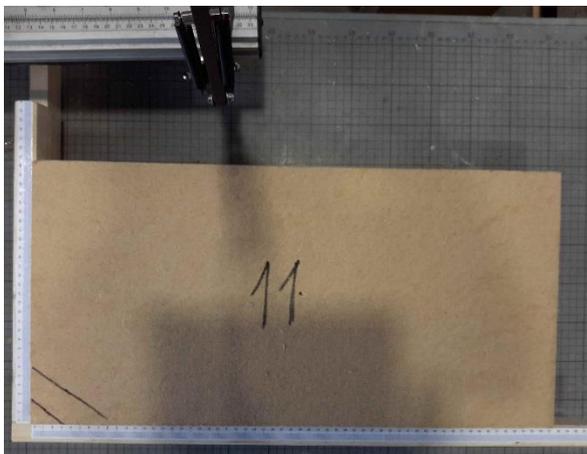


Abbildung 38: Versuchskörper 11 - 70°C

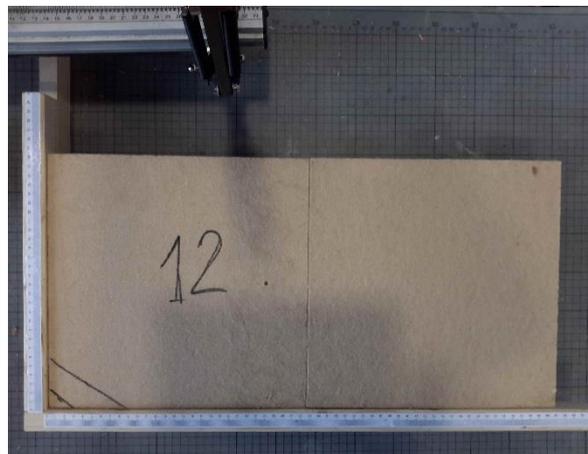


Abbildung 39: Versuchskörper 12 - 70°C

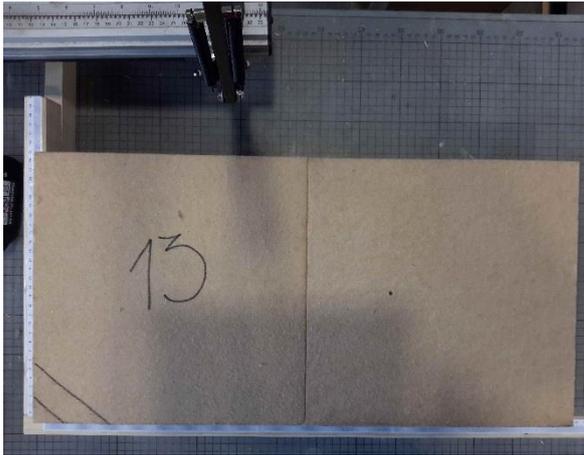


Abbildung 40: Versuchskörper 13 - 70°C

## Anhang E.4 Dokumentation Versuchskörper 90°C (Ausgangslage)



Abbildung 41: Versuchskörper 1 - 90°C



Abbildung 42: Versuchskörper 2 - 90°C

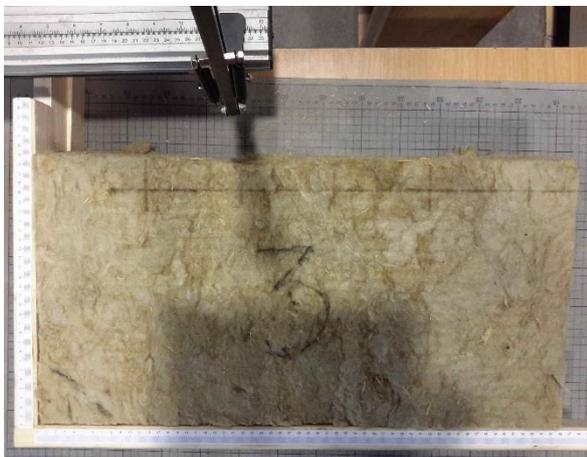


Abbildung 43: Versuchskörper 3 - 90°C



Abbildung 44: Versuchskörper 4 - 90°C



Abbildung 45: Versuchskörper 5 - 90°C

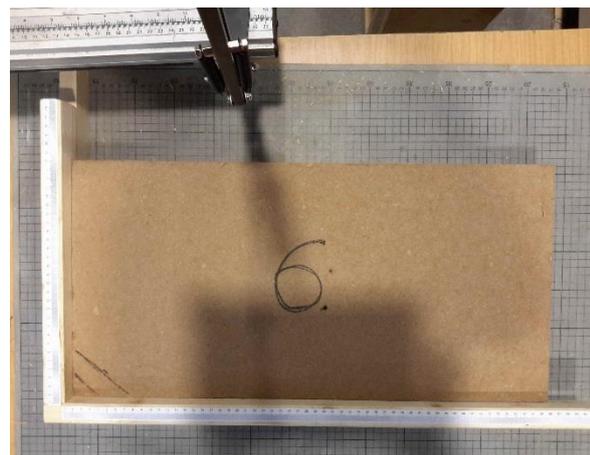


Abbildung 46: Versuchskörper 6 - 90°C

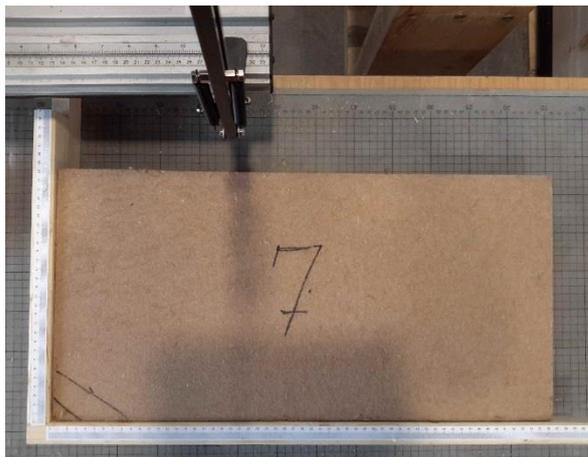


Abbildung 47: Versuchskörper 7 - 90°C



Abbildung 48: Versuchskörper 8 - 90°C



Abbildung 49: Versuchskörper 9 - 90°C



Abbildung 50: Versuchskörper 10 - 90°C

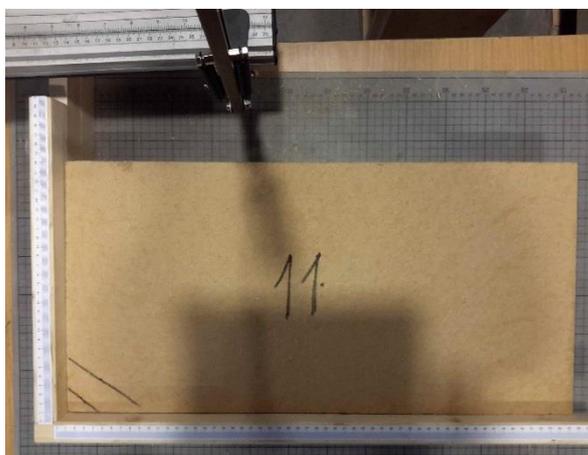


Abbildung 51: Versuchskörper 11 - 90°C

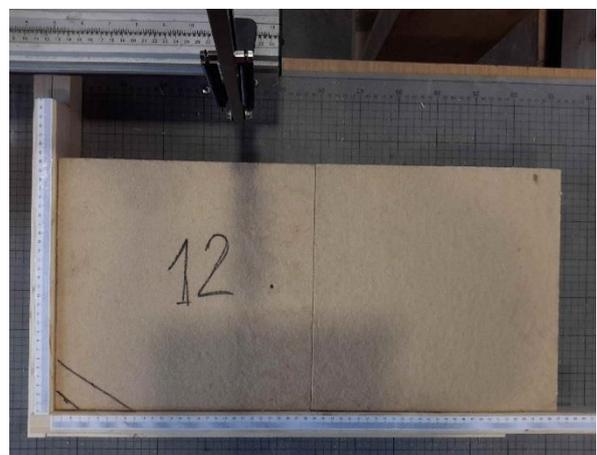


Abbildung 52: Versuchskörper 12 - 90°C

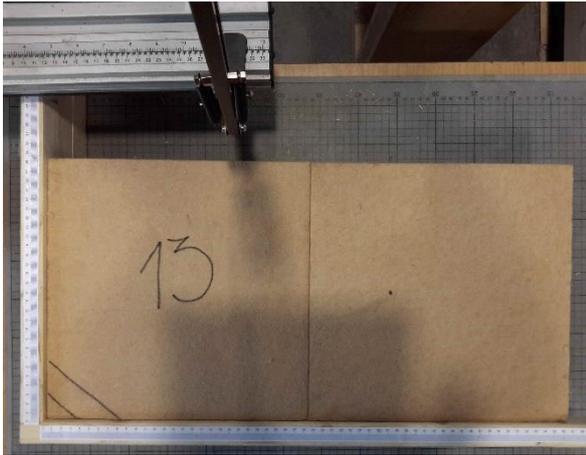


Abbildung 53: Versuchskörper 13 - 90°C

**Anhang E.5 Dokumentation Versuchskörper 110°C (Ausgangslage)**



Abbildung 54: Versuchskörper 1 - 110°C



Abbildung 55: Versuchskörper 2 - 110°C



Abbildung 56: Versuchskörper 3 - 110°C



Abbildung 57: Versuchskörper 4 - 110°C



Abbildung 58: Versuchskörper 5 - 110°C



Abbildung 59: Versuchskörper 6 - 110°C

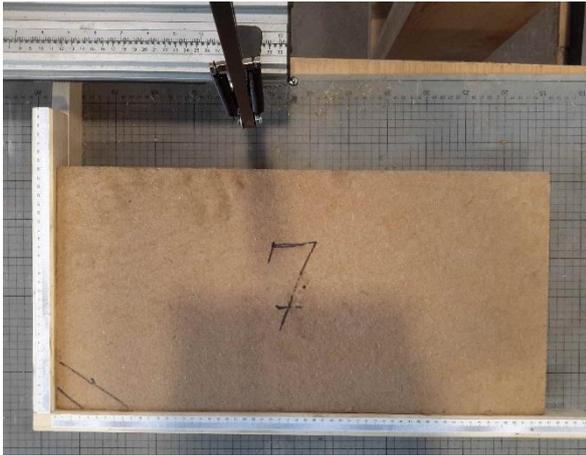


Abbildung 60: Versuchskörper 7 - 110°C



Abbildung 61: Versuchskörper 8 - 110°C

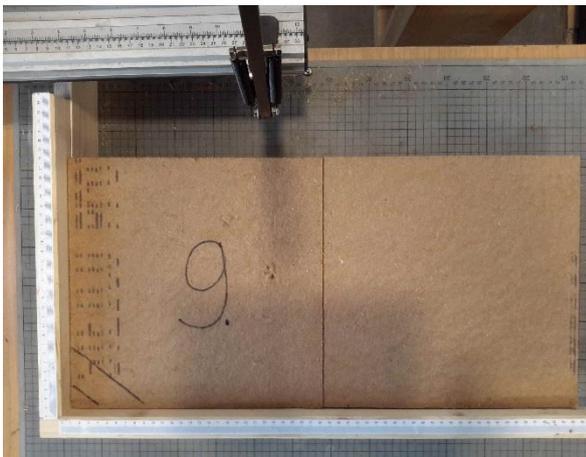


Abbildung 62: Versuchskörper 9 - 110°C



Abbildung 63: Versuchskörper 10 - 110°C

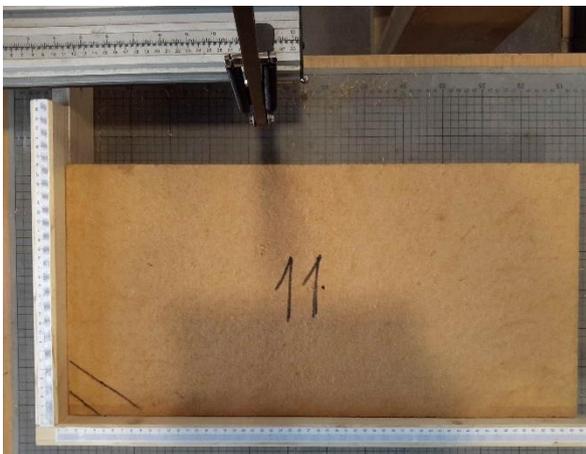


Abbildung 64: Versuchskörper 11 - 110°C

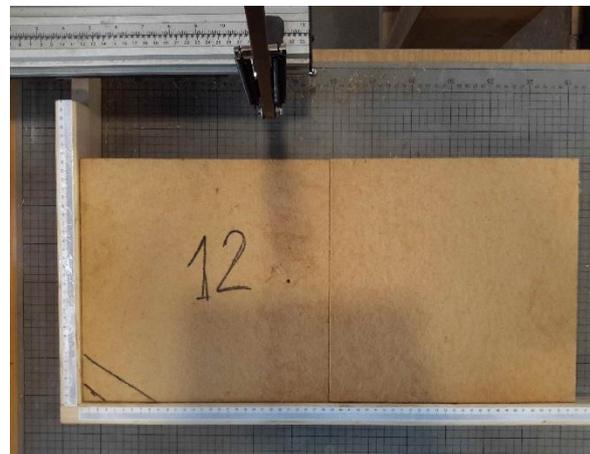


Abbildung 65: Versuchskörper 12 - 110°C

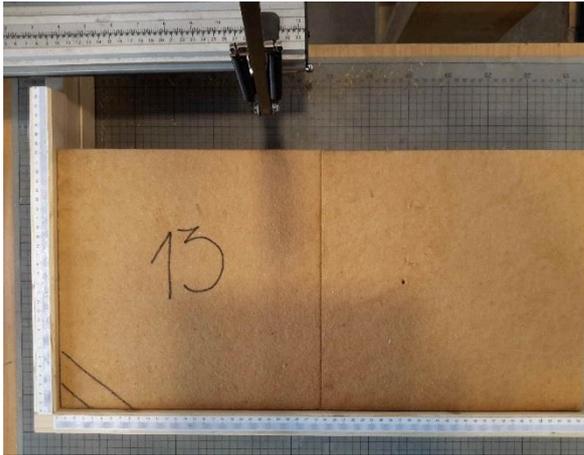


Abbildung 66: Versuchskörper 13 - 110°C

## Anhang E.6 Dokumentation Versuchskörper 140°C (Ausgangslage)



Abbildung 67: Versuchskörper 1 - 140°C



Abbildung 68: Versuchskörper 2 - 140°C



Abbildung 69: Versuchskörper 3 - 140°C



Abbildung 70: Versuchskörper 4 - 140°C



Abbildung 71: Versuchskörper 5 - 140°C



Abbildung 72: Versuchskörper 6 - 140°C

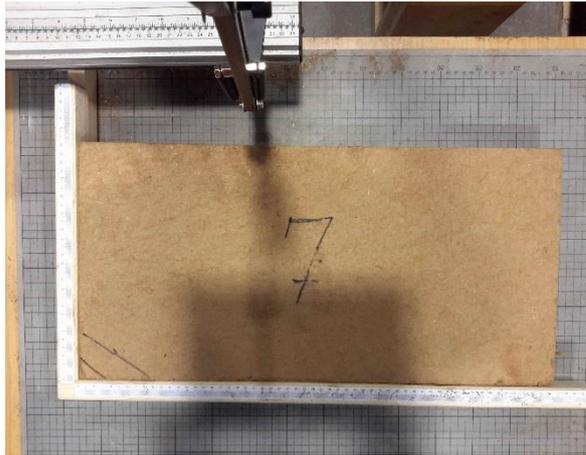


Abbildung 73: Versuchskörper 7 - 140°C

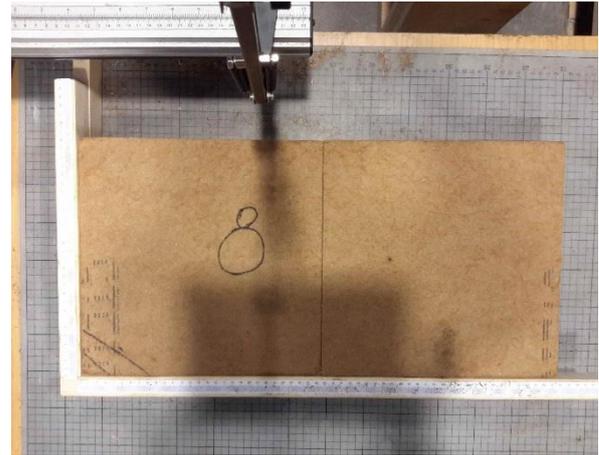


Abbildung 74: Versuchskörper 8 - 140°C

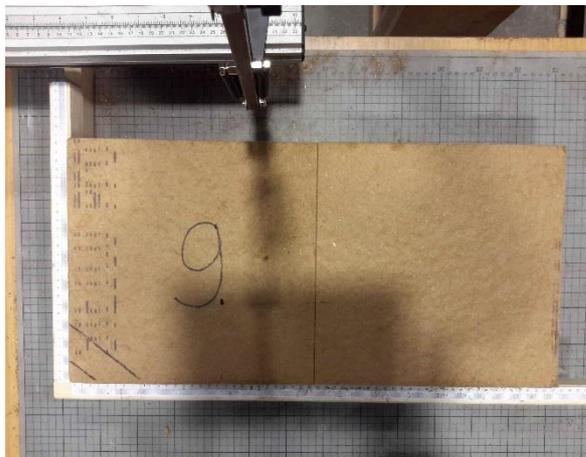


Abbildung 75: Versuchskörper 9 - 140°C



Abbildung 76: Versuchskörper 10 - 140°C



Abbildung 77: Versuchskörper 11 - 140°C



Abbildung 78: Versuchskörper 12 - 140°C

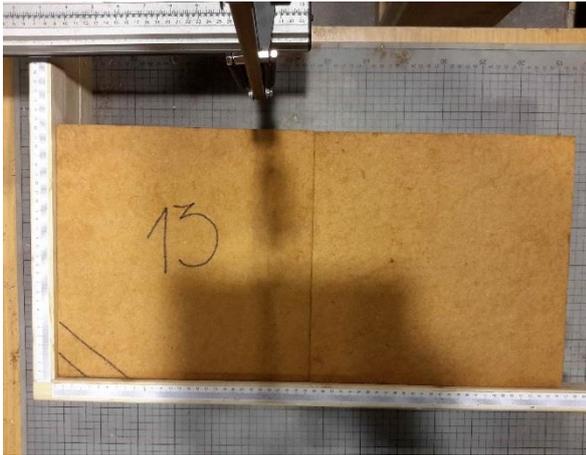


Abbildung 79: Versuchskörper 13 - 140°C

**Anhang E.7 Dokumentation Versuchskörper 170°C (Ausgangslage)**



Abbildung 80: Versuchskörper 1 - 170°C



Abbildung 81: Versuchskörper 2 - 170°C



Abbildung 82: Versuchskörper 3 - 170°C



Abbildung 83: Versuchskörper 4 - 170°C



Abbildung 84: Versuchskörper 6 - 170°C

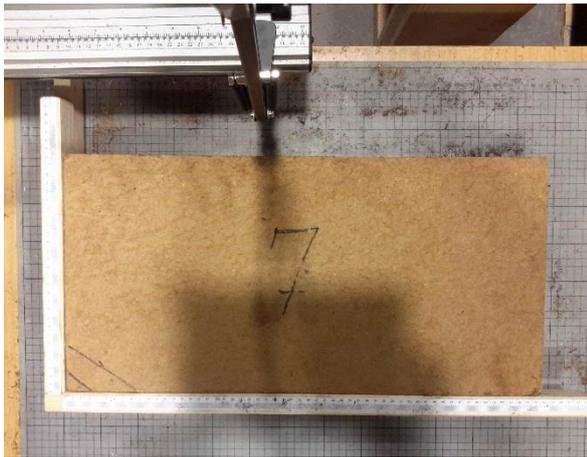


Abbildung 85: Versuchskörper 7 - 170°C

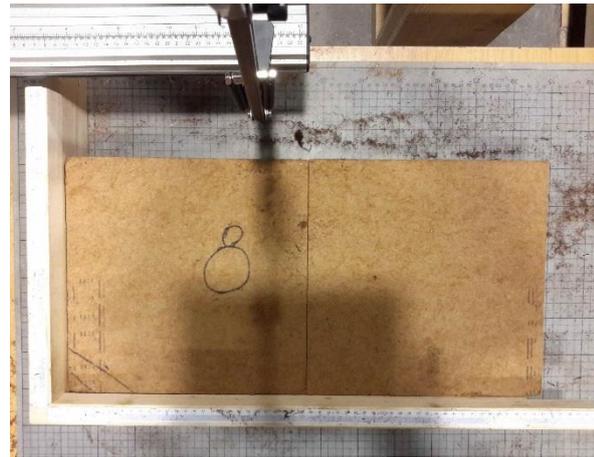


Abbildung 86: Versuchskörper 8 - 170°C



Abbildung 87: Versuchskörper 9 - 170°C



Abbildung 88: Versuchskörper 10 - 170°C



Abbildung 89: Versuchskörper 11 - 170°C



Abbildung 90: Versuchskörper 12 - 170°C

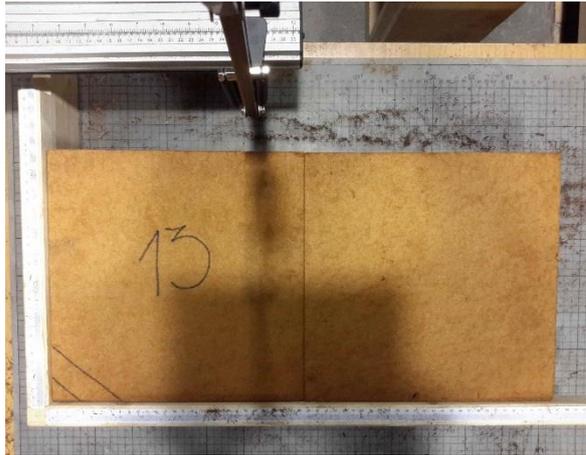
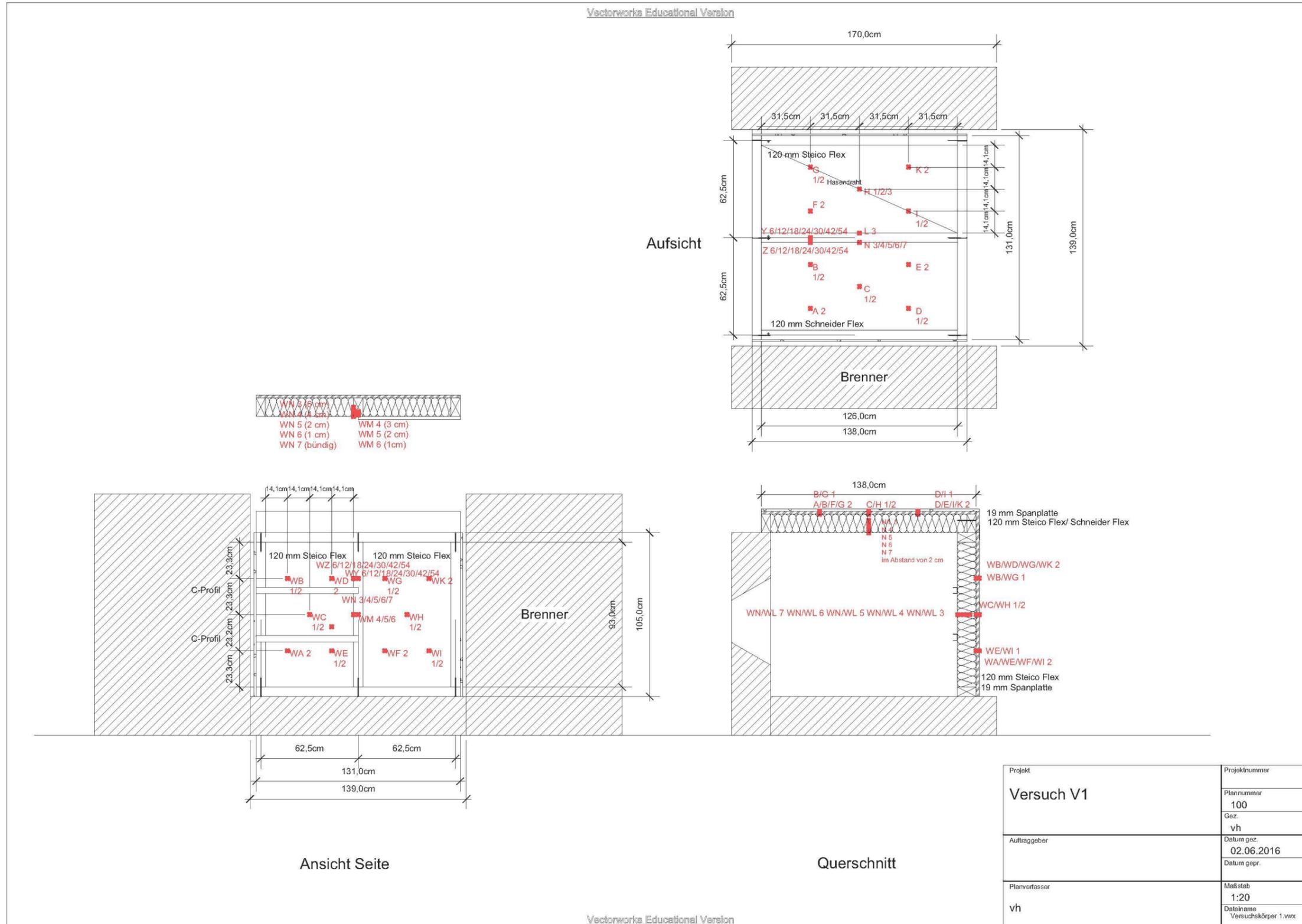


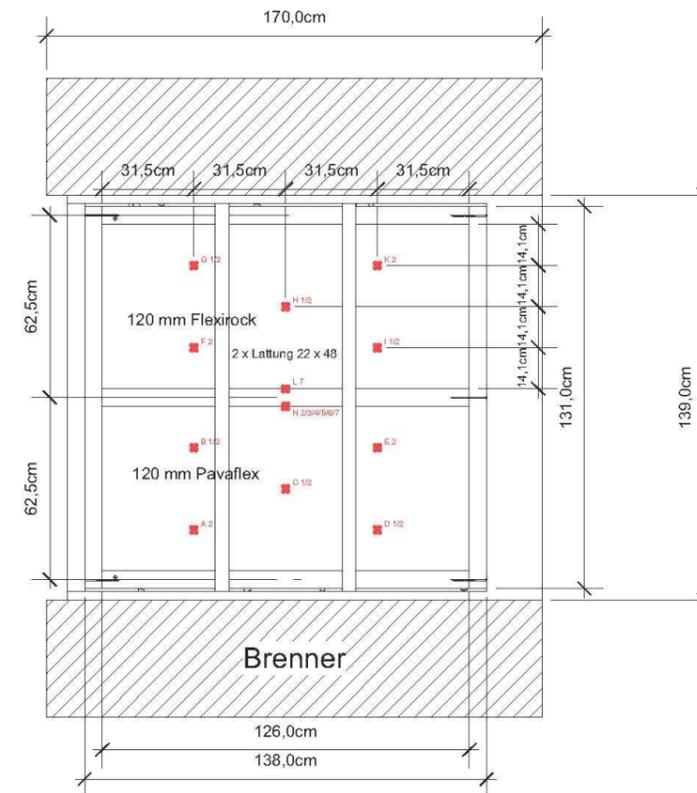
Abbildung 91: Versuchskörper 13 - 170°C

Anhang F Detailaufbauten Kleinbrandversuche

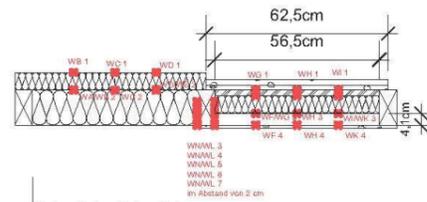


Vectorworks Educational Version

Aufsicht

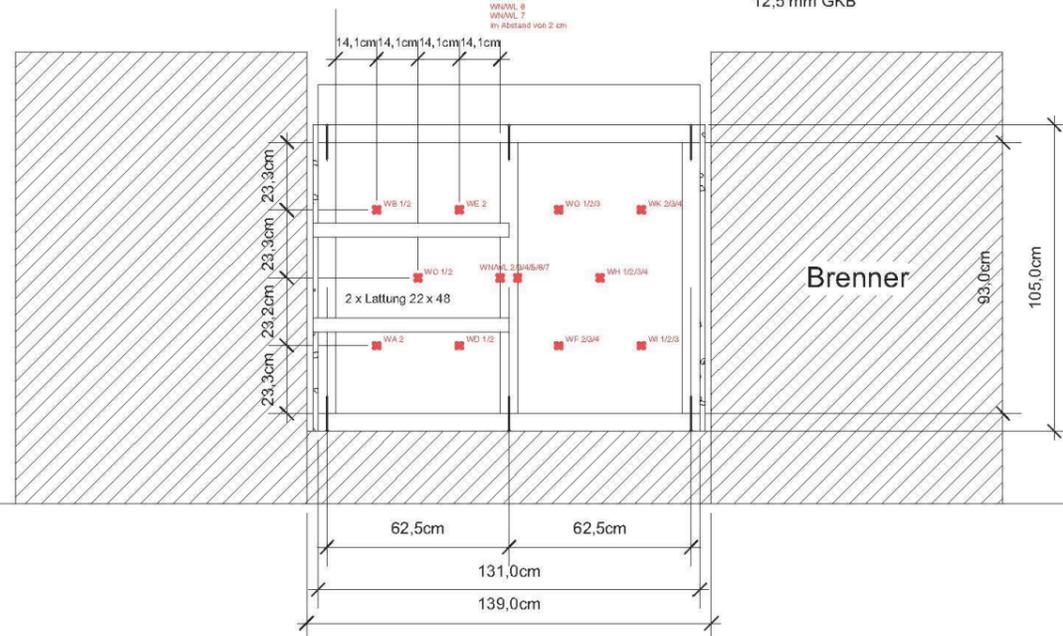


60 mm Protect Typ M  
120 mm Steico Flex

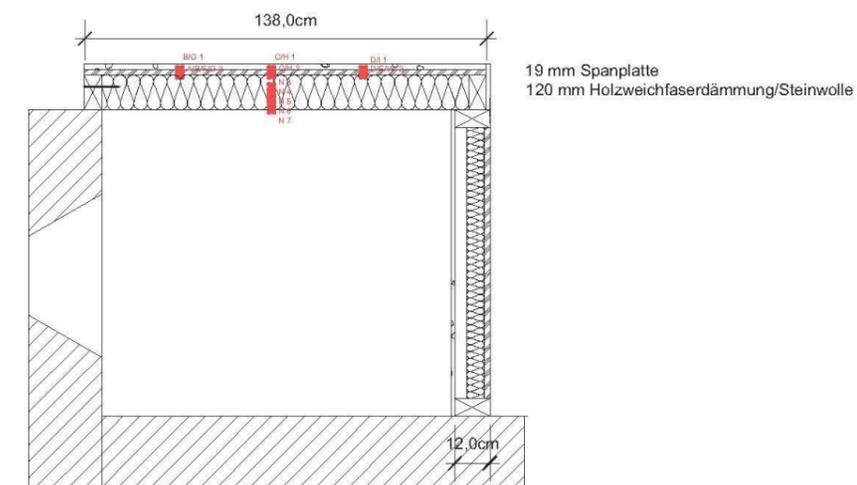


18 mm GKF (62,5 x 105)  
18 mm GKF  
19 mm Spanplatte  
60 mm Steico Flex  
40 mm Hohlraum  
12,5 mm GKB

Ansicht Seite



Querschnitt

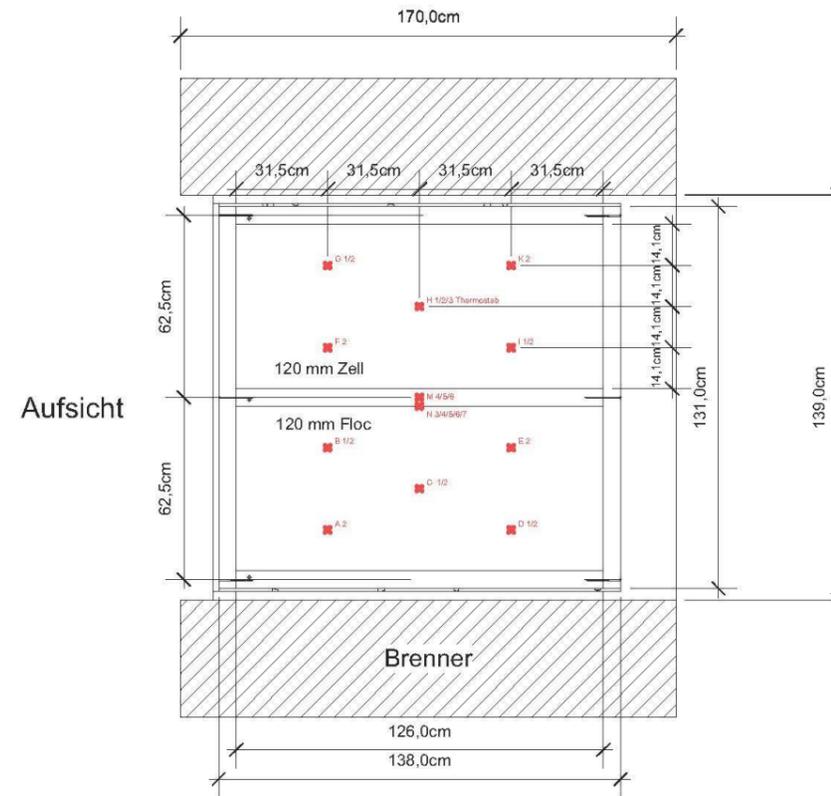


19 mm Spanplatte  
120 mm Holzweichfaserdämmung/Steinwolle

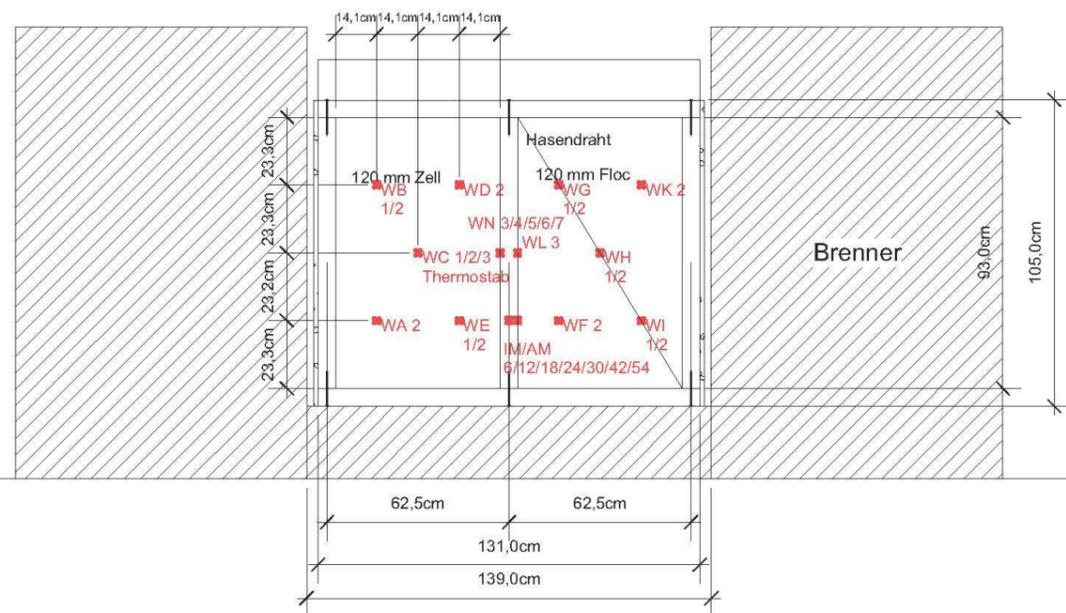
Projekt	Projektnummer
Versuch V2	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 2.vwx

Vectorworks Educational Version

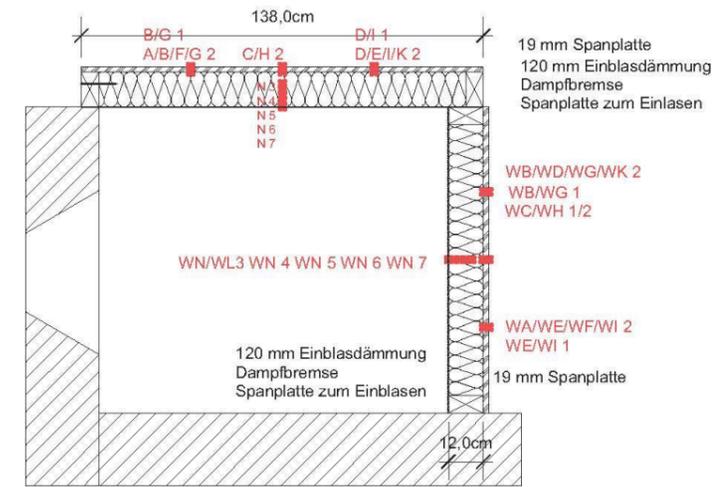
Vectorworks Educational Version



Aufsicht



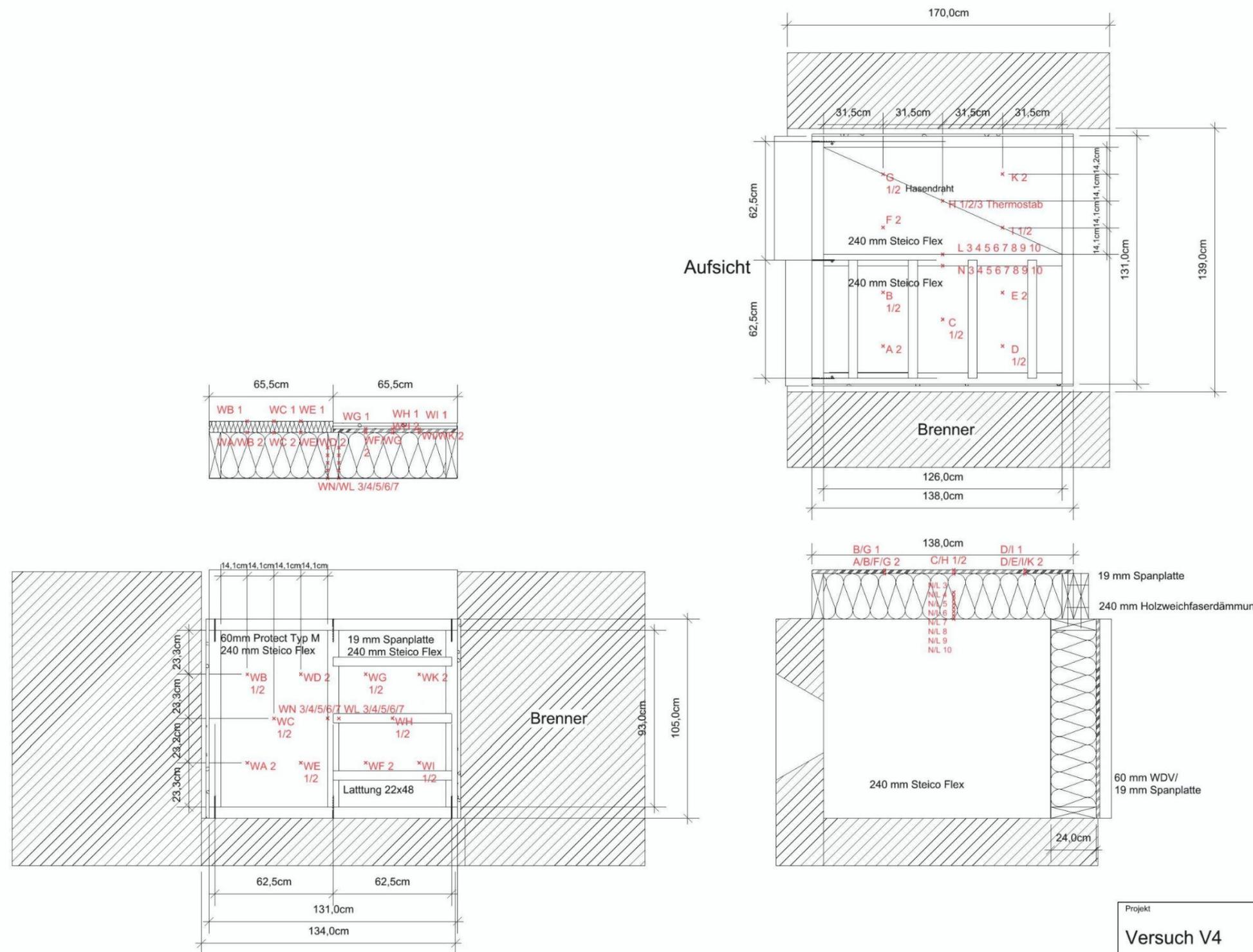
Ansicht Seite



Querschnitt

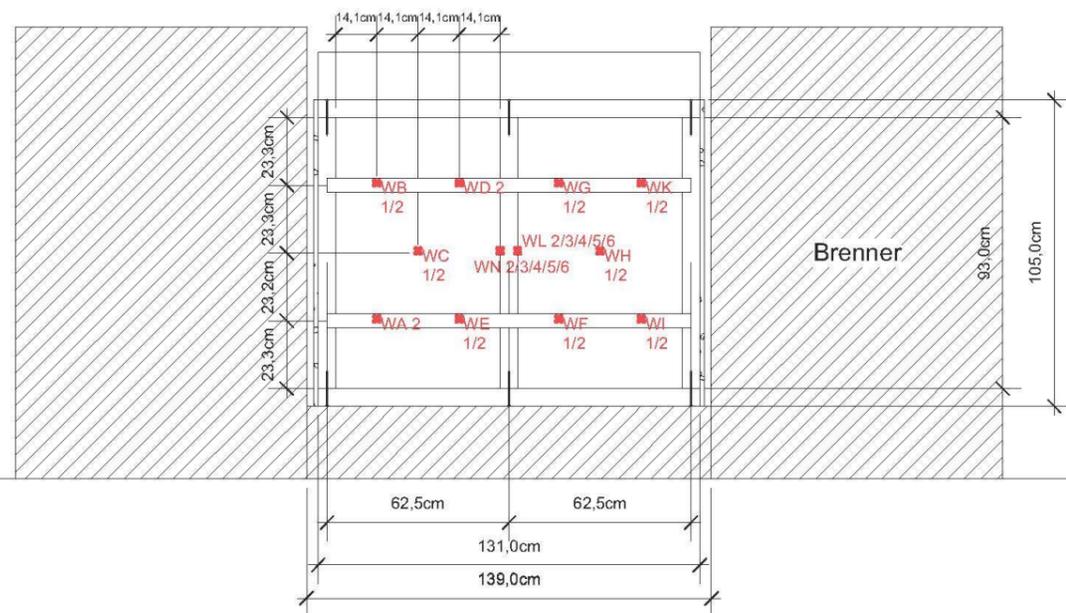
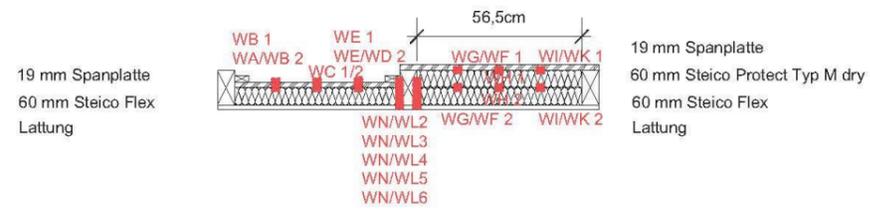
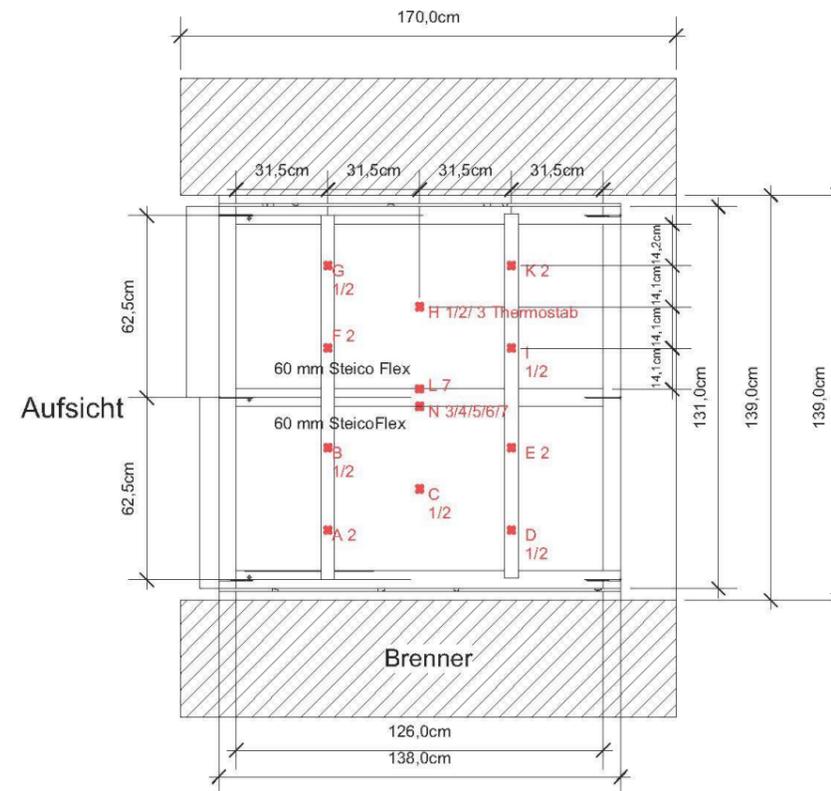
Projekt	Projektnummer
Versuch V3	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 3.vwx

Vectorworks Educational Version

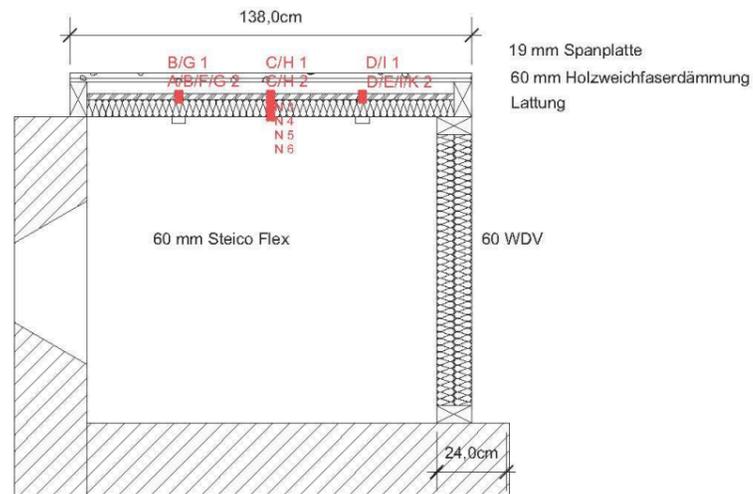


Projekt	Projektnummer
<b>Versuch V4</b>	Plannummer
	100
	Gez.
	vh
Auftraggeber	Datum gez.
	02.06.2016
	Datum gepr.
Planverfasser	Maßstab
vh	1:20
	Dateiname
	Versuchskörper 4
	v2017_07_04_geändert.v

Vectorworks Educational Version



Ansicht Seite

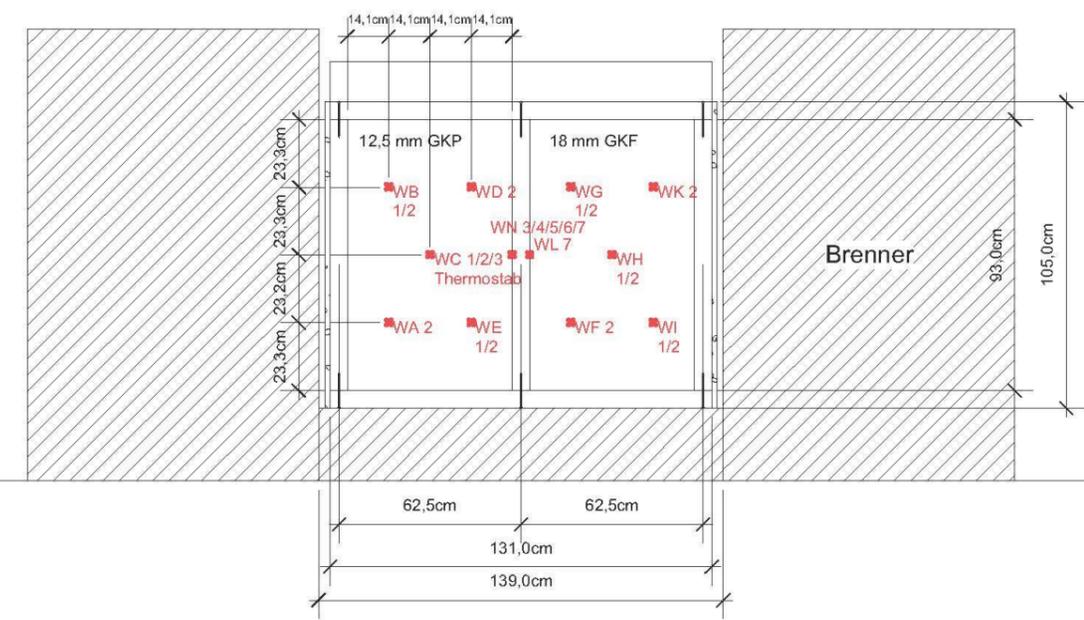
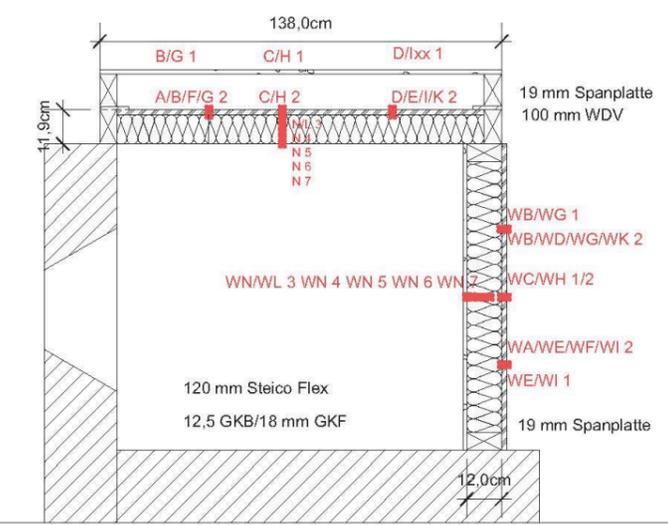
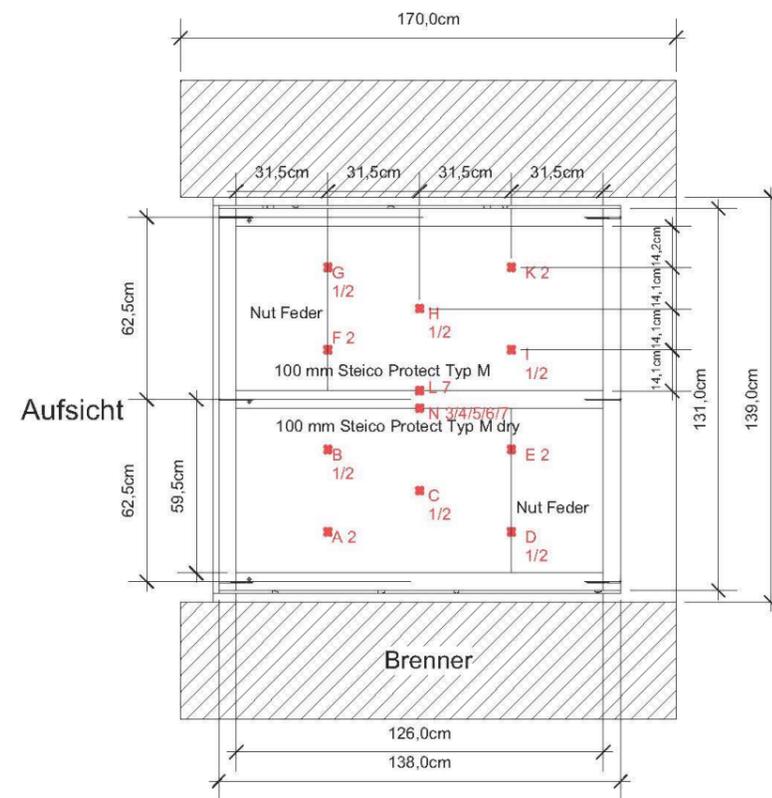


Querschnitt

Projekt	Projektnummer
Versuch V5	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh Datum gez. 02.06.2016 Datum gepr.
Planverfasser vh	Maßstab 1:20 Dateiname Versuchskörper 5.vwx

Vectorworks Educational Version

Vectorworks Educational Version



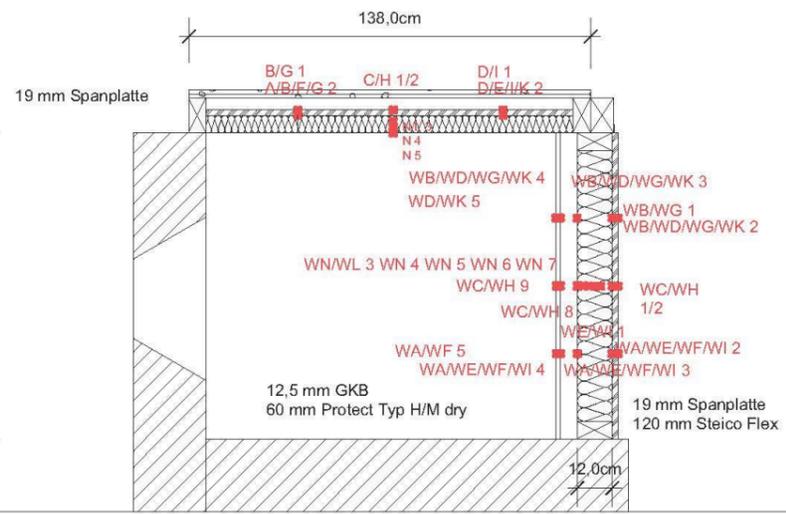
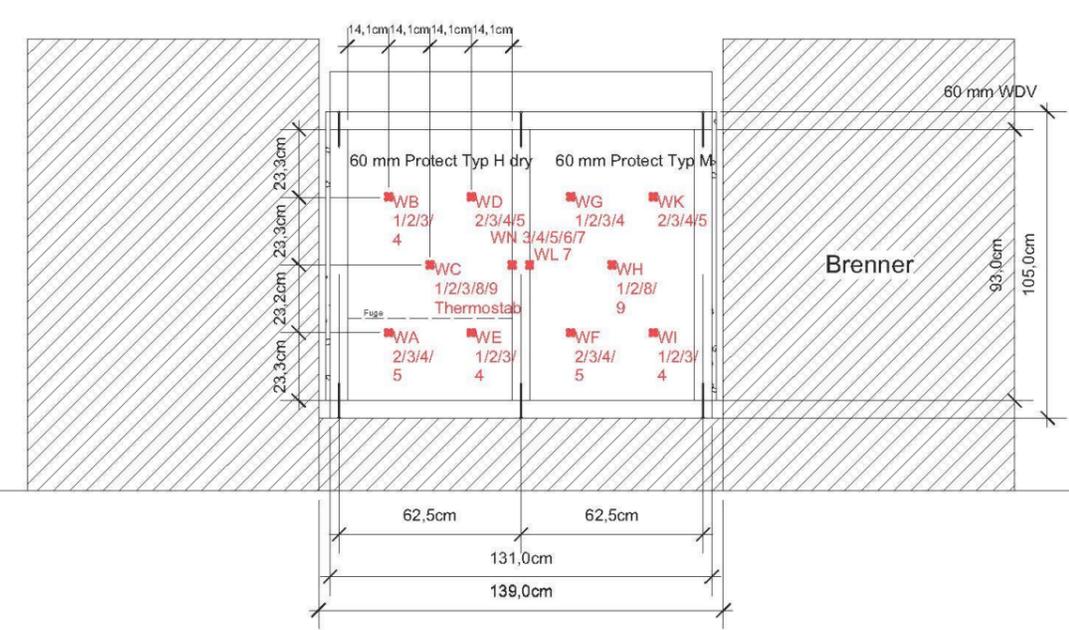
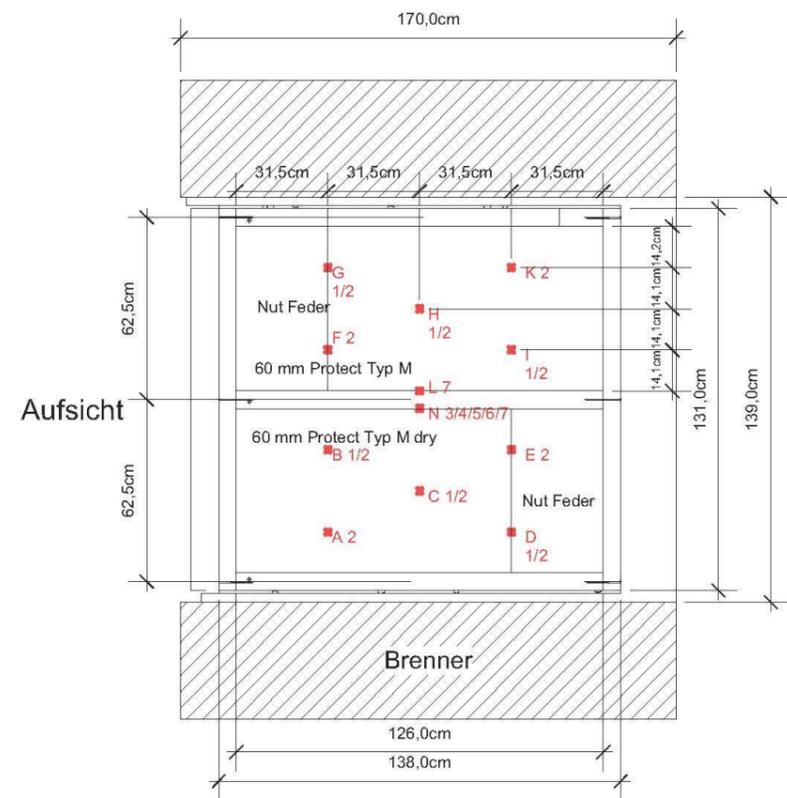
Ansicht Seite

Querschnitt

Projekt	Projektnummer
Versuch V6	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh Datum gez. 02.06.2016 Datum gepr.
Planverfasser	Maßstab 1:20 Dateiname Versuchskörper 6 v2017_07_04_geändert.v
vh	

Vectorworks Educational Version

Vectorworks Educational Version



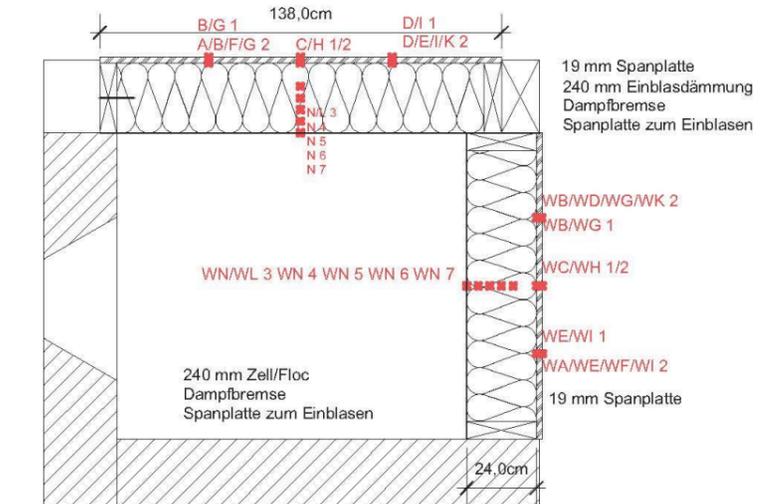
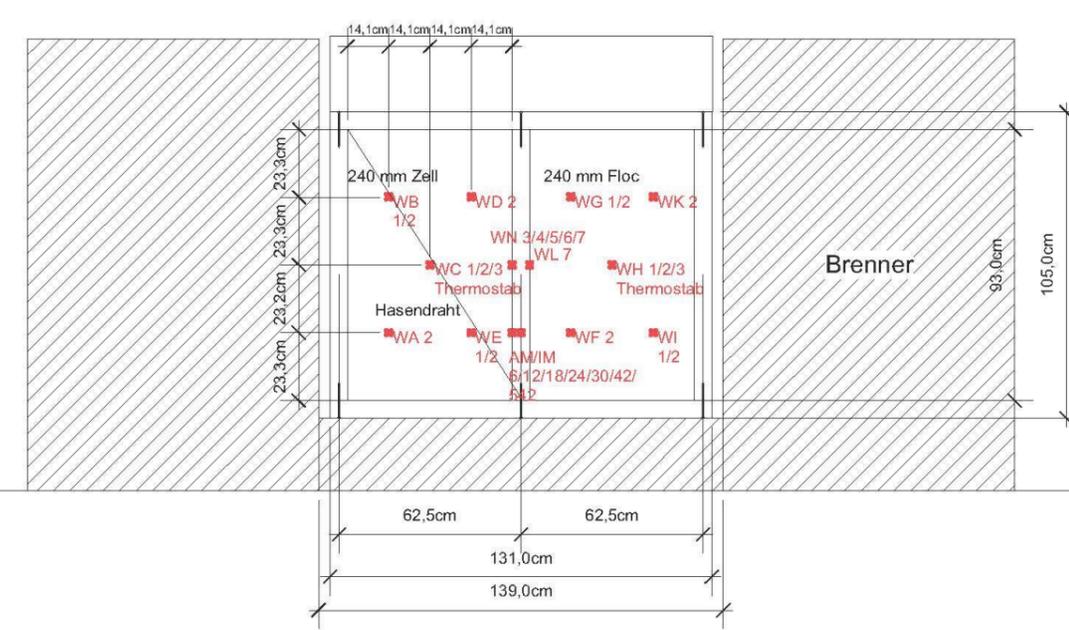
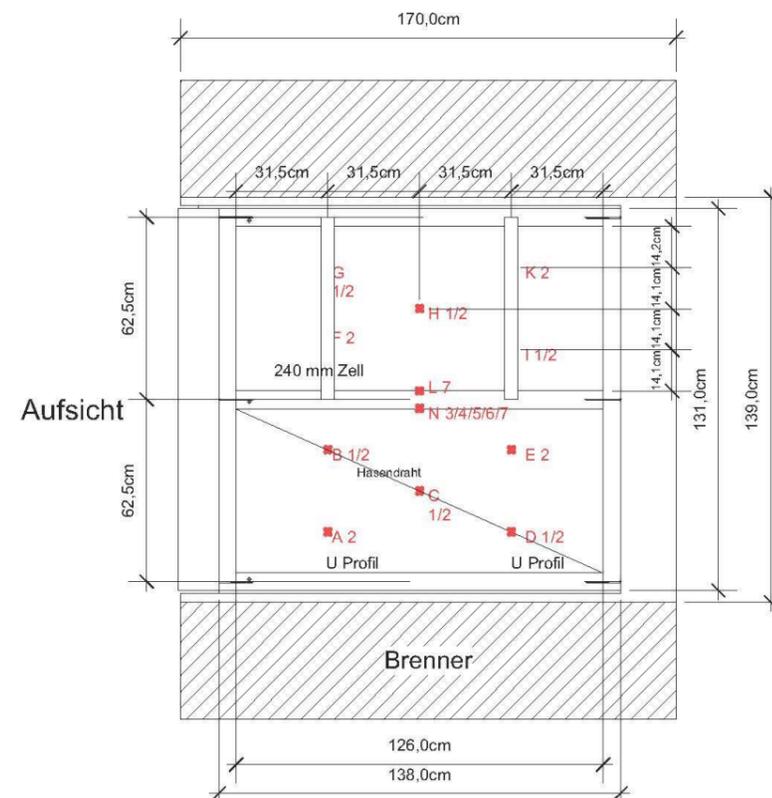
Ansicht Seite

Querschnitt

Projekt	Projektnummer
Versuch V7	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 7.vwx

Vectorworks Educational Version

Vectorworks Educational Version



Ansicht Seite

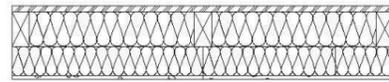
Querschnitt

Projekt	Projektnummer
Versuch V8	100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 8.vwx

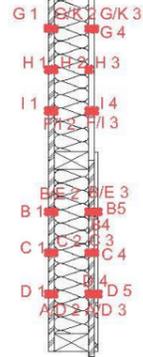
Vectorworks Educational Version

Vectorworks Educational Version

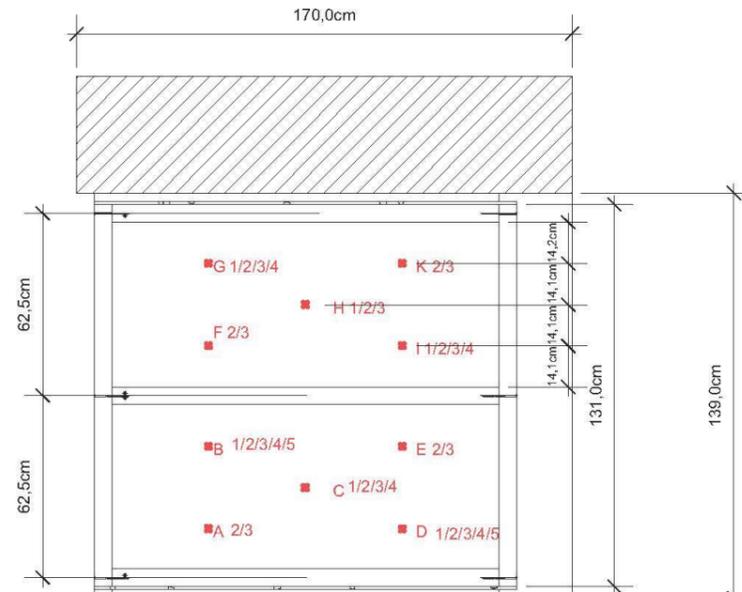
19 mm Spanplatte  
120 mm Steico Flex  
100 mm Protect Typ M  
12,5 mm GKB Knauf



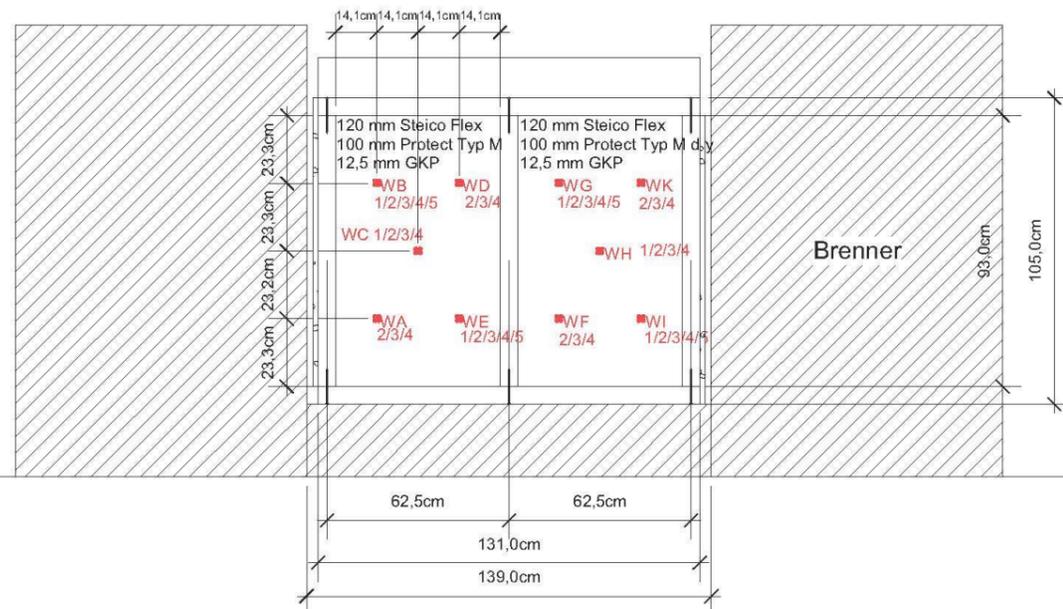
19 mm Spanplatte  
120 mm Steico Flex  
20 mm Massivholzplatte



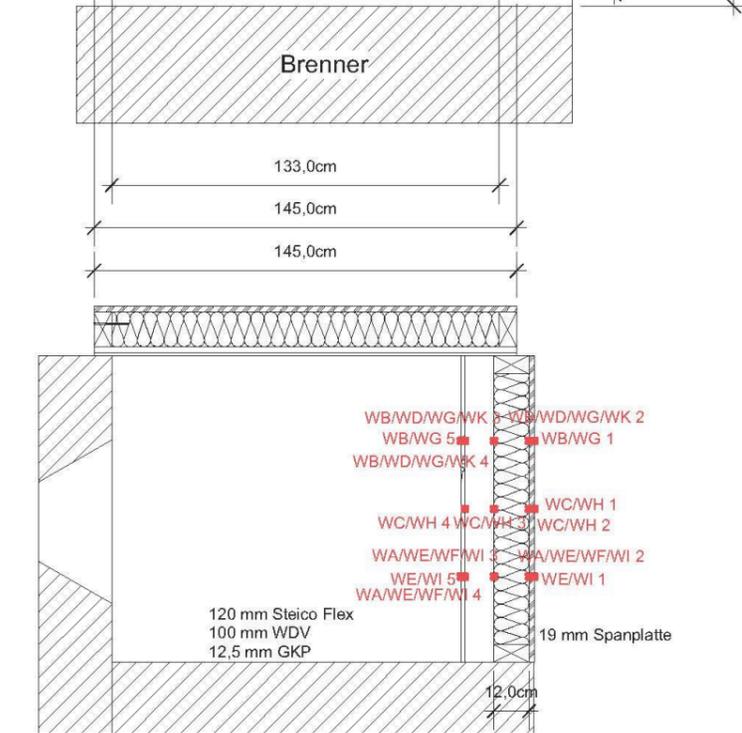
19 mm Spanplatte  
120 mm Steico Rock  
19 mm Spanplatte  
15 mm GKB Knauf



Aufsicht



Ansicht Seite



Querschnitt

Projekt	Projektnummer
Versuch V 9	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 9 v2017_geändert.vwx

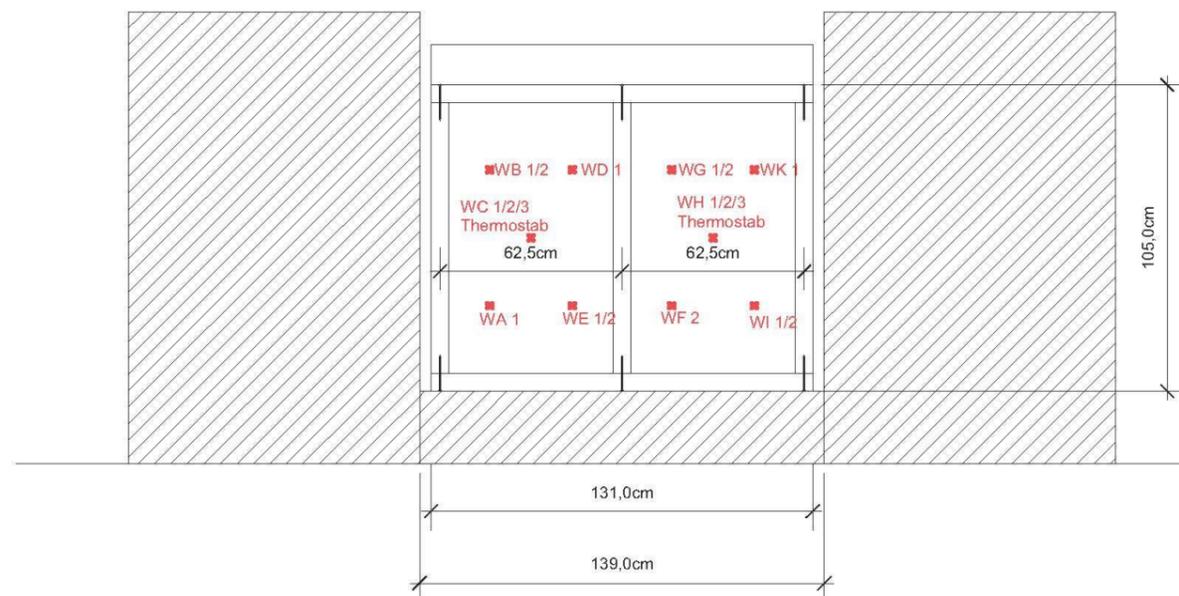
Vectorworks Educational Version

Vectorworks Educational Version

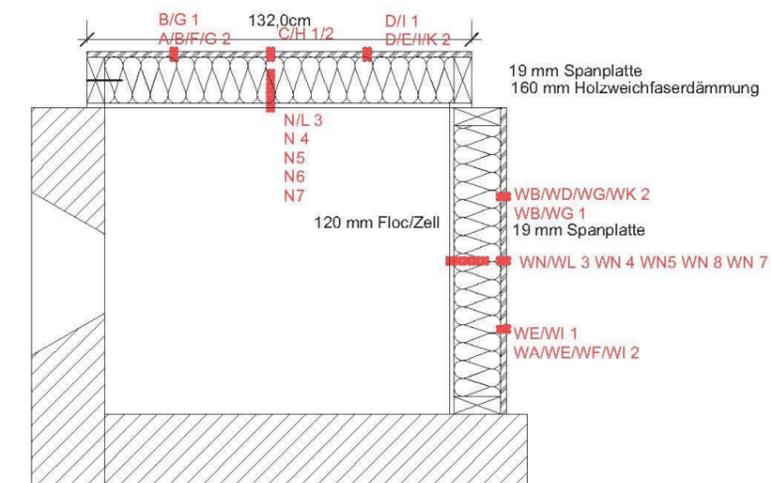
Aufsicht



Ansicht Seite



Querschnitt



Projekt	Projektnummer
Versuch V10	Plannummer 100
Auftraggeber	Gez. vh
Planverfasser	Datum gez. 02.06.2016
vh	Datum gepr.
	Maßstab 1:20
	Dateiname Versuchskörper 10bis12 v2017_07_04_geändert.v

Vectorworks Educational Version

## Anhang G Prüfprotokolle der Kleinbrandversuche für den Raumabschluss

### Prüfkörper 1

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
00:30	erstes Kohlen
00:50	Schwarzfärbung der Holzweichfaserdämmung
01:06	Entzündung Decke 2
01:40	Risse Dämmung
02:20	Bauchen Decke, Deutlicher Rückzug Gefach
02:40	Dämmstoff Decke G1 herausgefallen
03:30	Risse Oberfläche
04:46	Rückzug der Dämmung über die gesamte Länge am Ständer Wand
05:42	Langsames Kippen linke Dämmung Wand G1
06:00	Wand G1 Dämmung raus
08:02	Ständer volle Brandbeanspruchung
10:00	R1 deutlich
11:10	Kippen der Dämmung im Gefach 2 der Wand- mo nach vorne
18:37	Schrumpfen Wanddämmung ca. 20cm, Decke kein Schutz mehr am Hasendraht
22:47	Durchbruch Decke
24:14	Abbruch WC2 24



Abbildung 92: Prüfkörper V1 vor dem Versuch



Abbildung 93: Schwarzfärbung der Holzweichfaserdämmung (1. Minute)



Abbildung 94: Durchzündung der Decke (1. Minute)



Abbildung 95: Herausfallen der Decke 1 und starkes Schrumpfen der Holzwolledämmung (2. Minute)



Abbildung 96: Entzündung der Spanplatte im oberen Teil des Gefaches 1 der Wand nach Rückzug der Dämmung (5. Minute)



Abbildung 97: Herausfallen der Dämmung aus Gefach 1 der Wand (6. Minute)



Abbildung 98: Entzünden der Spanplatte, da Rückzug der Dämmung vom Rahmen an der Wand im Gefach 2 (8. Minute)



Abbildung 99: Entzündung des Rahmens an der Decke im Gefach 2 (8. Minute)



Abbildung 100: Kippen der Dämmung im oberen Bereich des Gefaches 2 der Wand (11. Minute)



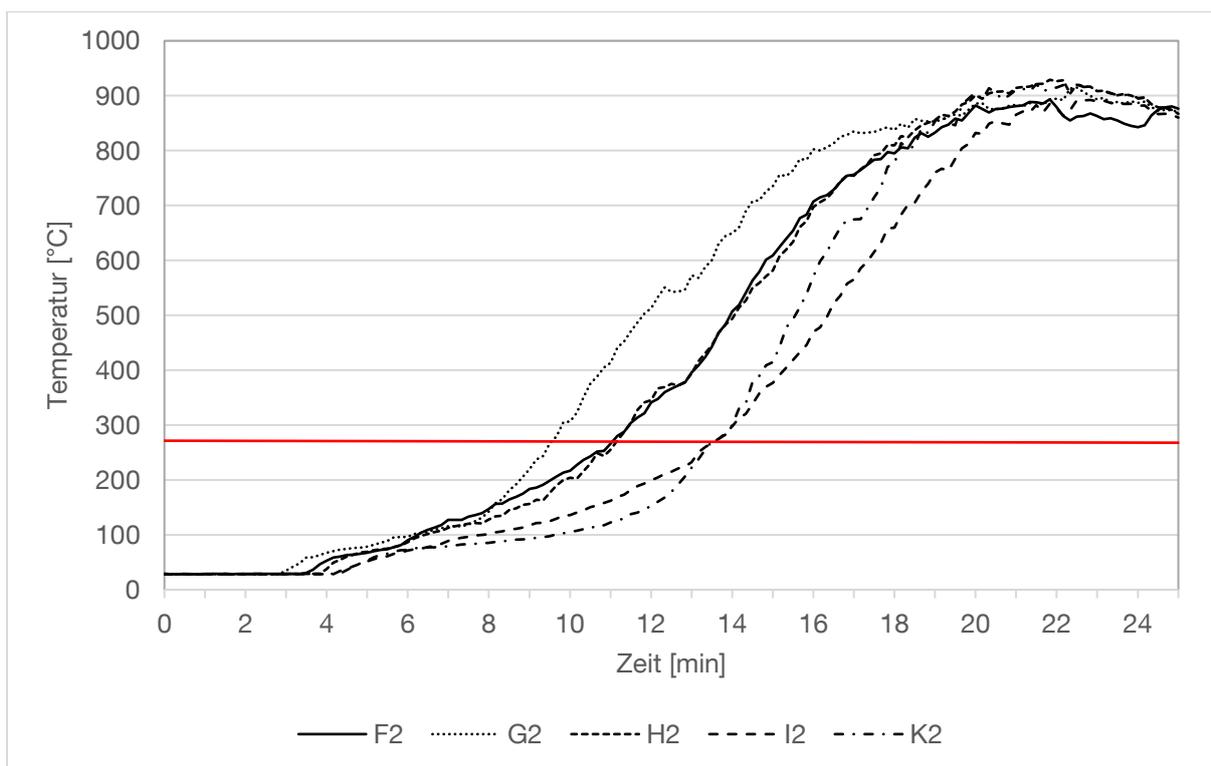
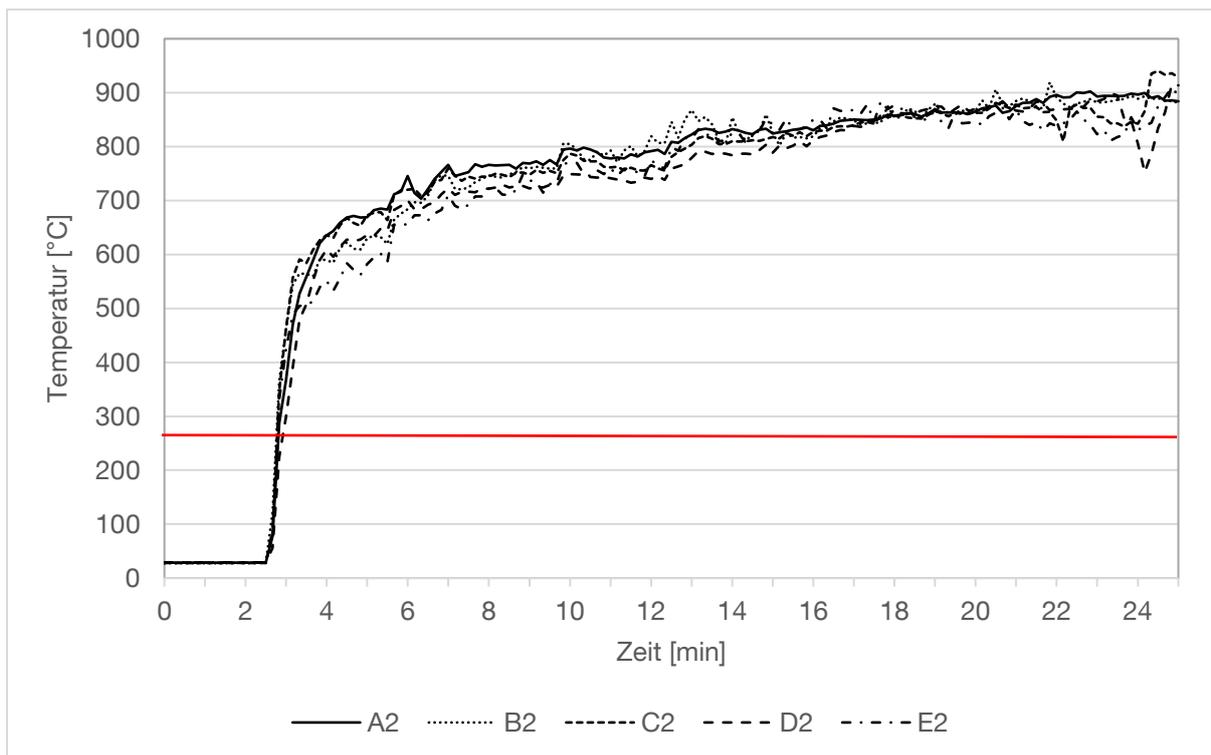
Abbildung 101: starkes Durchhängen der Dämmung im Gefach 2 der Decke und Durchzünden hinter der Dämmung (13. Minute)



Abbildung 102: Decke nach Versuchsende



Abbildung 103: Versuchskörper Decke nach Versuchsende



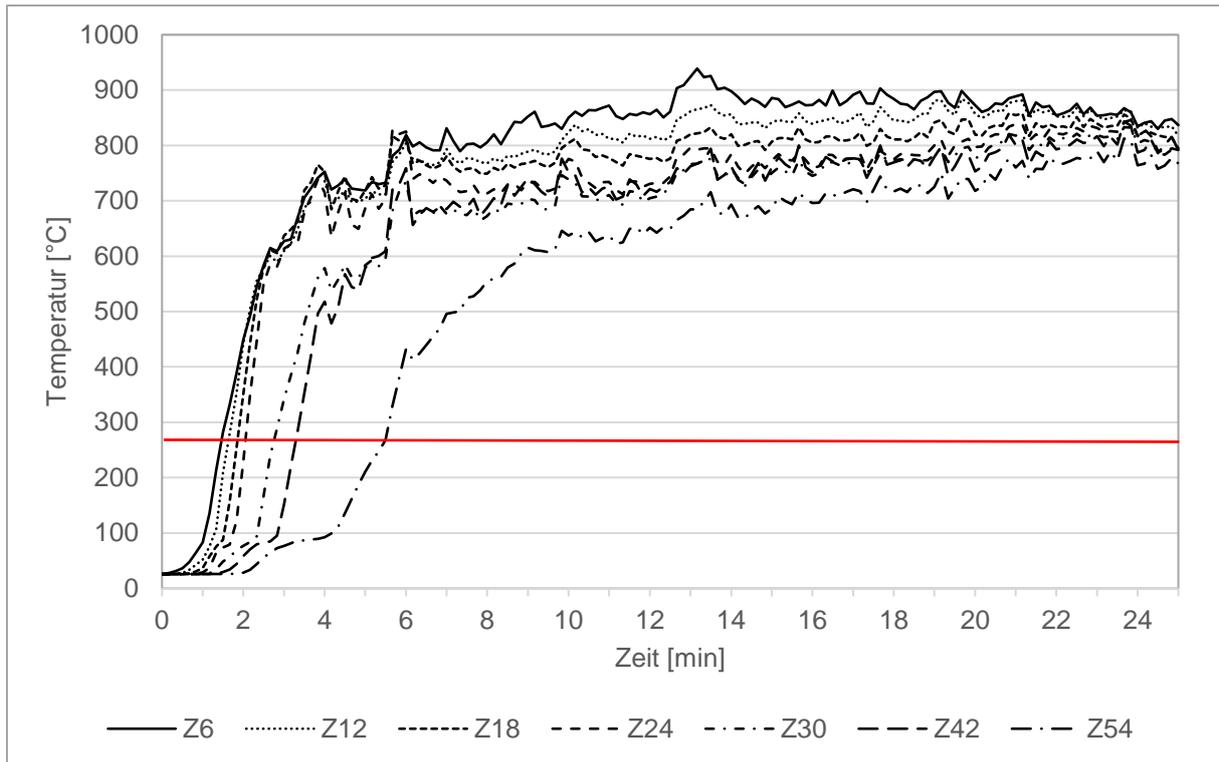


Abbildung 106: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 6 mm

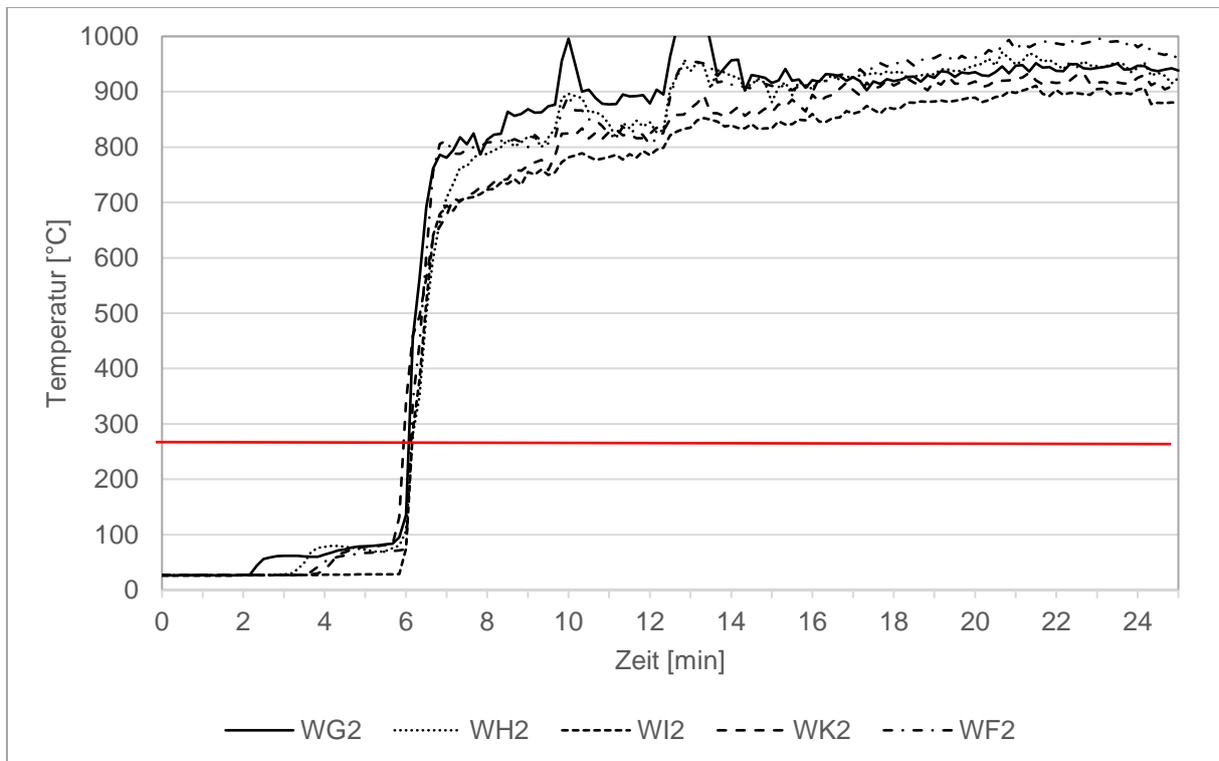


Abbildung 107: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaserplatte (120 mm Steico Flex- geschützt durch C-Profil) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

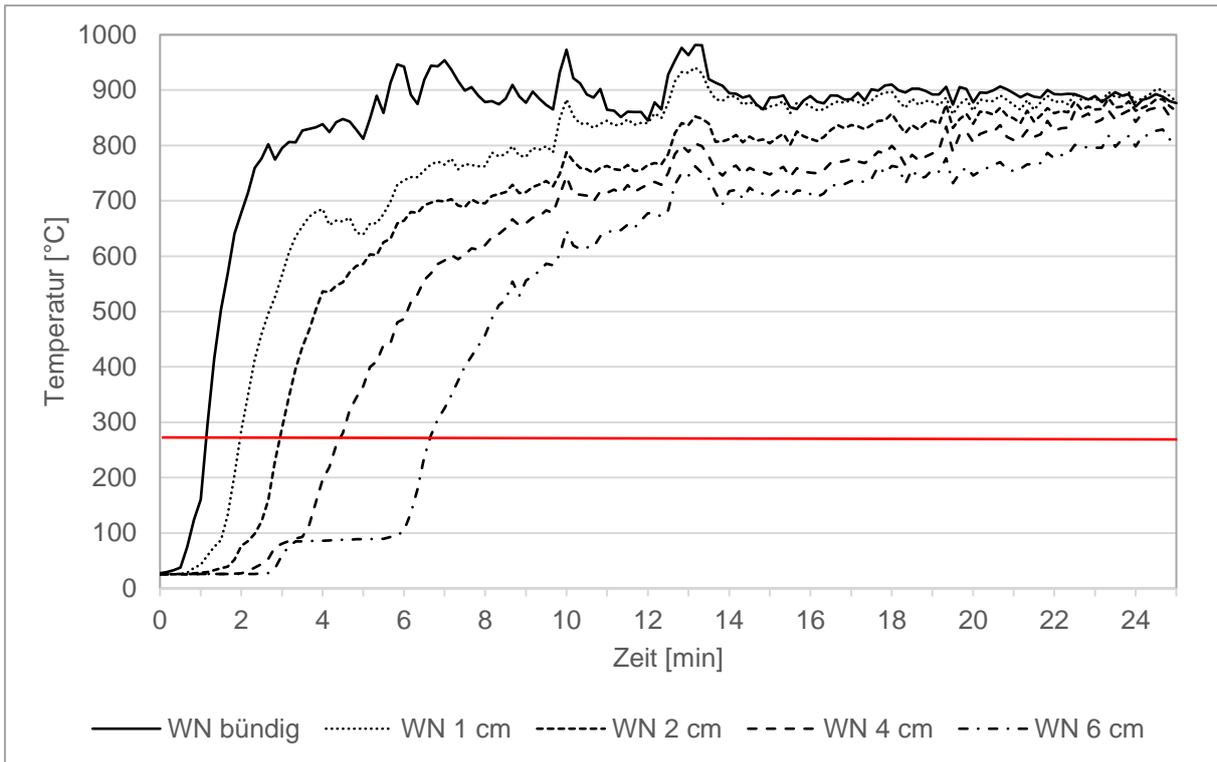


Abbildung 108: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1	ungesichert	2,5 min	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung
Decke 2	Hasendraht	8./9. Minute	Zündung am Rahmen und T > 270°C, 4 Minuten später starkes Durchhängen der Dämmung
Wand 1	ungesichert	6. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung
Wand 2	C-Profil	6. Minute	T > 270°C, da Schrumpfen der Dämmung (kein Beleg durch Thermolemente)

Aussagen für 120 mm HWF:

Eine ungesicherte Dämmung in der Decke versagt nahezu sofort (nach 2 Minuten).

Eine ganzflächige Lagesicherung der Dämmung bewirkt einen verlängerten Schutz dieser Schicht, der so lange anhält bis sich die Dämmung ganz vom Rahmen löst. (ca. 8. Minute)

In der Wand sackt die Dämmung stärker zusammen. Dies führt zu einer Entzündung der dahinterliegenden Schicht. Das Versagenskriterium wird schneller erreicht als bei der lagesicherten Dämmung in der Decke. (6. Minute)

## Prüfkörper 2

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
00:00	Brennerstart
02:11	Braunfärbung G1 Decke, G1 G2 Wand
03:00	Lattung verfärbt sich WN 7 funktioniert nicht, Wand und Decke durchzündet HW
03:50	G1 Decke Riss in HW von mo nach mu
04:30	Gipskarton flockt, Wand rechts unten reißt
05:00	HW Wand zieht sich zurück, Decke HW am mittleren Ständer zieht sich zurück
06:00	Risse in HW Wand von mm nach mu, Riss in HW Decke ro und von mo bis mu
07:50	Durchglühen in HW Decke
08:30	HW Wand wölbt sich mo
10:20	Dämmung quillt auf in Decke (HW)
10:30	HW Decke fällt mo
11:30	Lattung G1 fällt/knickt mo
11:50	Latten Wand G2 weg
12:00	Durchzündet
13:00	HW in Decke nahezu ganz herausgefallen
14:20	HW Wand G2 herausgefallen mo und mm
16:00	Risse in Steico Protect G2 Wand
17:20	Risse in Gipskartonwand G1 ro
22:00	Gipsplatte Wand als Schutz GA
23:30	Steinwolle und Gipsplatte Decke zum Schutz G1
24:00	Gipsplatte Wand G1 oben abgefallen
25:00	HW Dämmung Wand G1 draußen
26:00	Steinwolle hängt, etwas wölbt sich
26:30	Gipsplatte an Protect Platte Wand G2
30:00	Versuch beenden durch Brenner aus, Elemente mit Ausnahme Gefach Steinwolle brennen weiter
32:00	Löschen



Abbildung 109: Prüfkörper bei Versuchsbeginn



Abbildung 110: Schwarzfärbung der Holzwolle (2. Minute)



Abbildung 111: Schwarzfärbung Gipsplatte (4. Minute)



Abbildung 112: Durchzünden der Holzwolle in der Wand im Bereich der Lattung und Rückzug der Holzwolle in Decke und Wand vom Rahmen (5. Minute)



Abbildung 113: Entzündung der Holzwolle an der Decke, sichtbarer Riss in Decke G1 (6. Minute)



Abbildung 114: Holzwolle in Decke G1 wölbt sich (9. Minute)



Abbildung 115: Decke G1 fällt zum Teil heraus (10. Minute)



Abbildung 116: Lattung versagt an der Decke G1, Durchzündungen hinter der Dämmung (11. Minute)



Abbildung 117: Dämmung Decke G1 ganz herausgefallen (13. Minute)



Abbildung 118: Dämmung Wand G2 herausgefallen, Protect-Platte dahinter brennt (14. Minute)



Abbildung 119: Gipsplatte Wand G1 reißt stark (19. Minute)



Abbildung 120: Gipsplatte Wand weggefallen, Durchzündung (28. Minute)



Abbildung 121: Dämmung Wand G1 herausgefallen (28. Minute)



Abbildung 122: Flexirock Decke G2 hält, wölbt sich stark (31. Minute) Versuchsabbruch



Abbildung 123: Versuchskörper nach Versuchsende

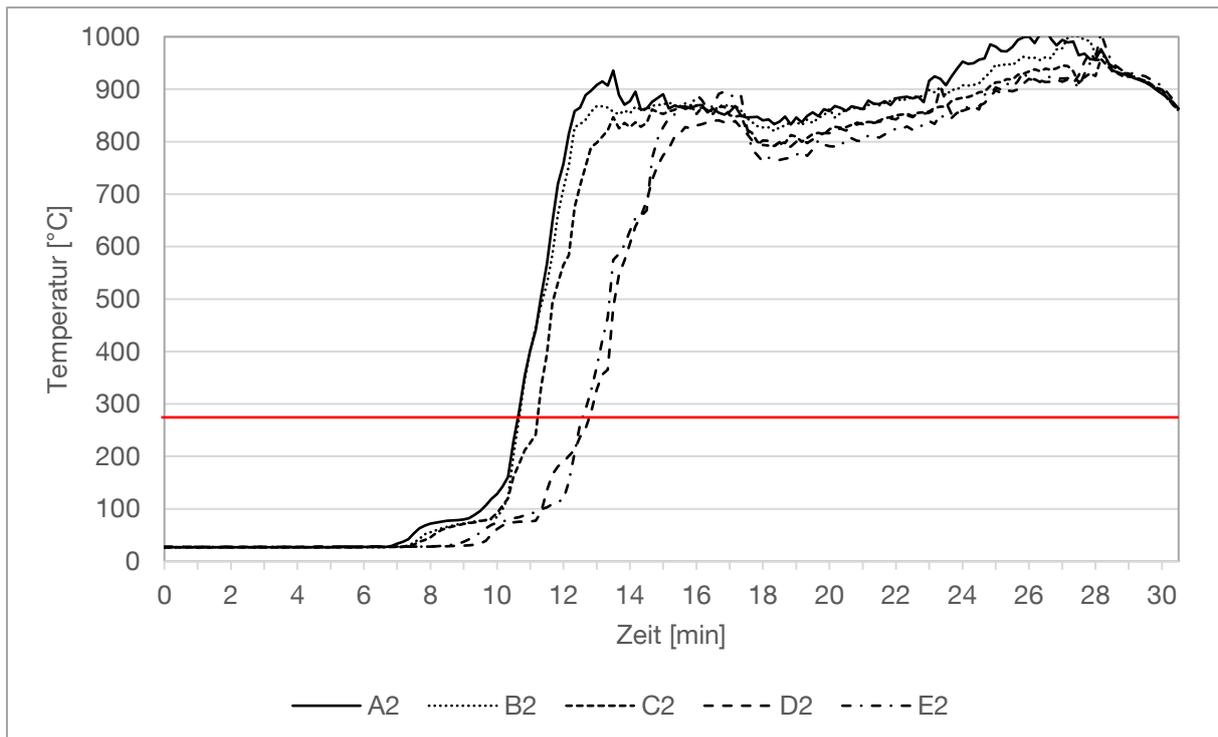


Abbildung 124: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaserplatte (120 mm Pavatex geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

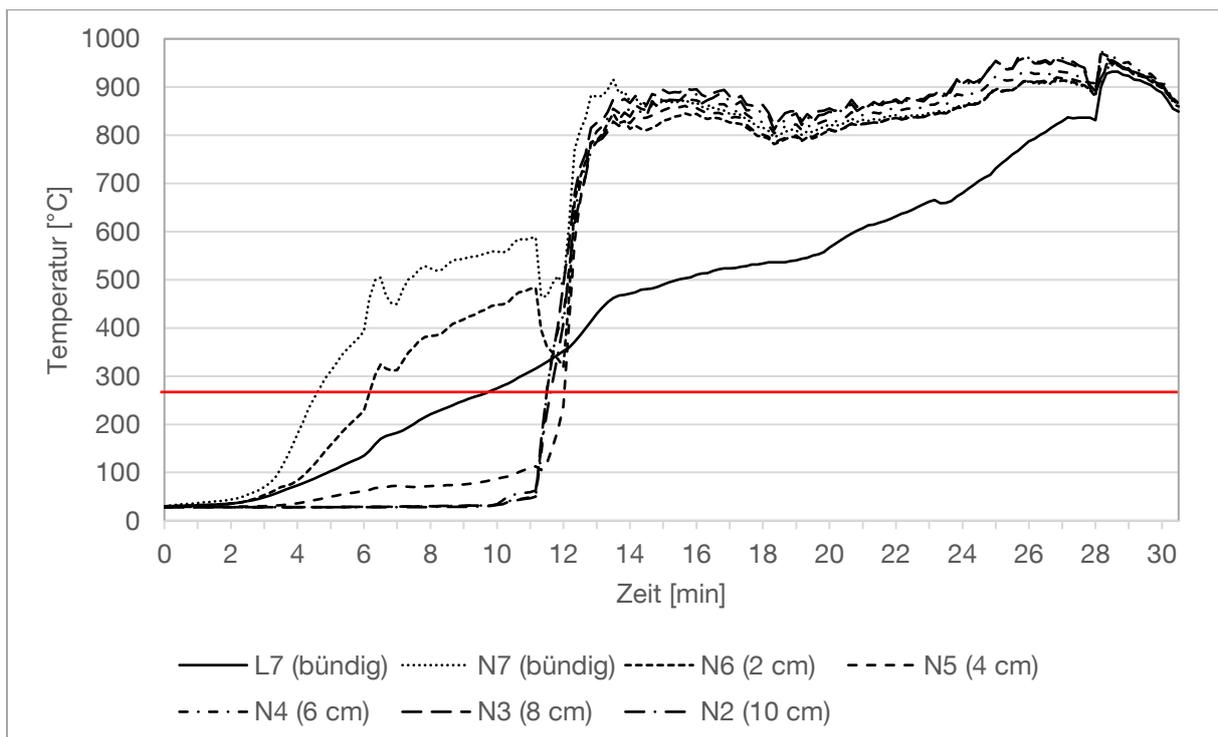


Abbildung 125: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

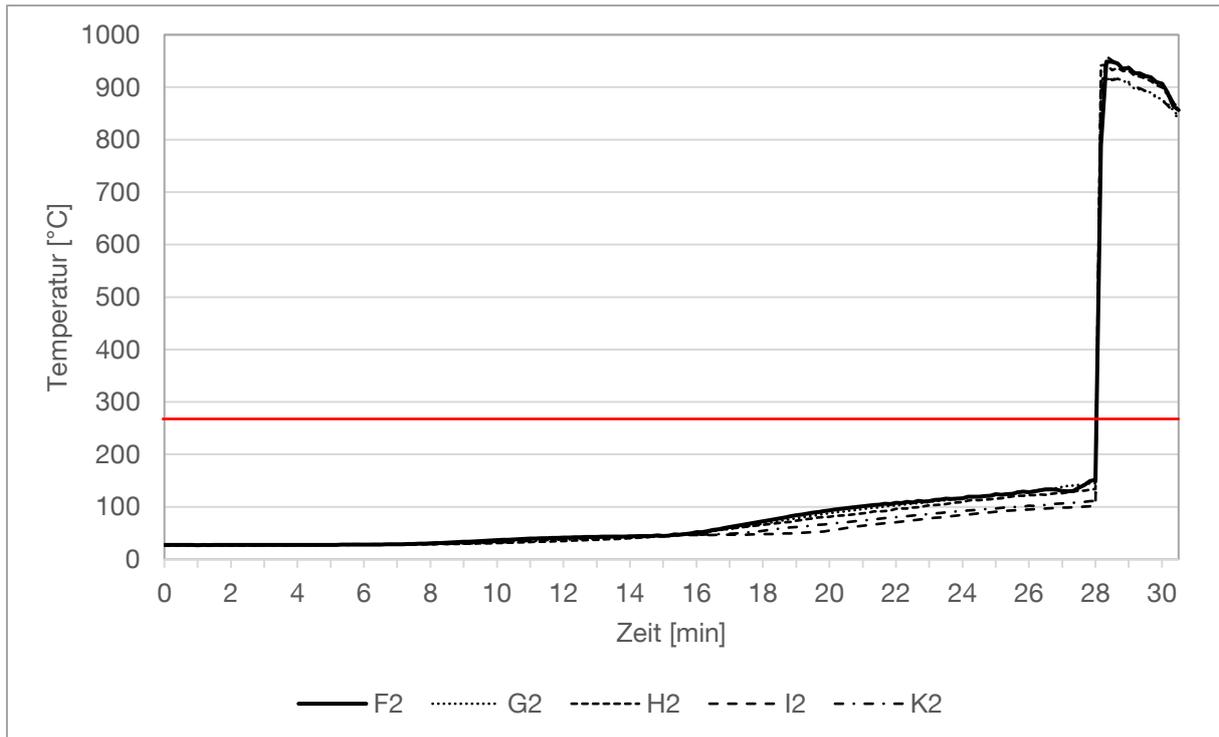


Abbildung 126: Temperaturverlauf zwischen Steinwolle (120 mm Flexirock geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

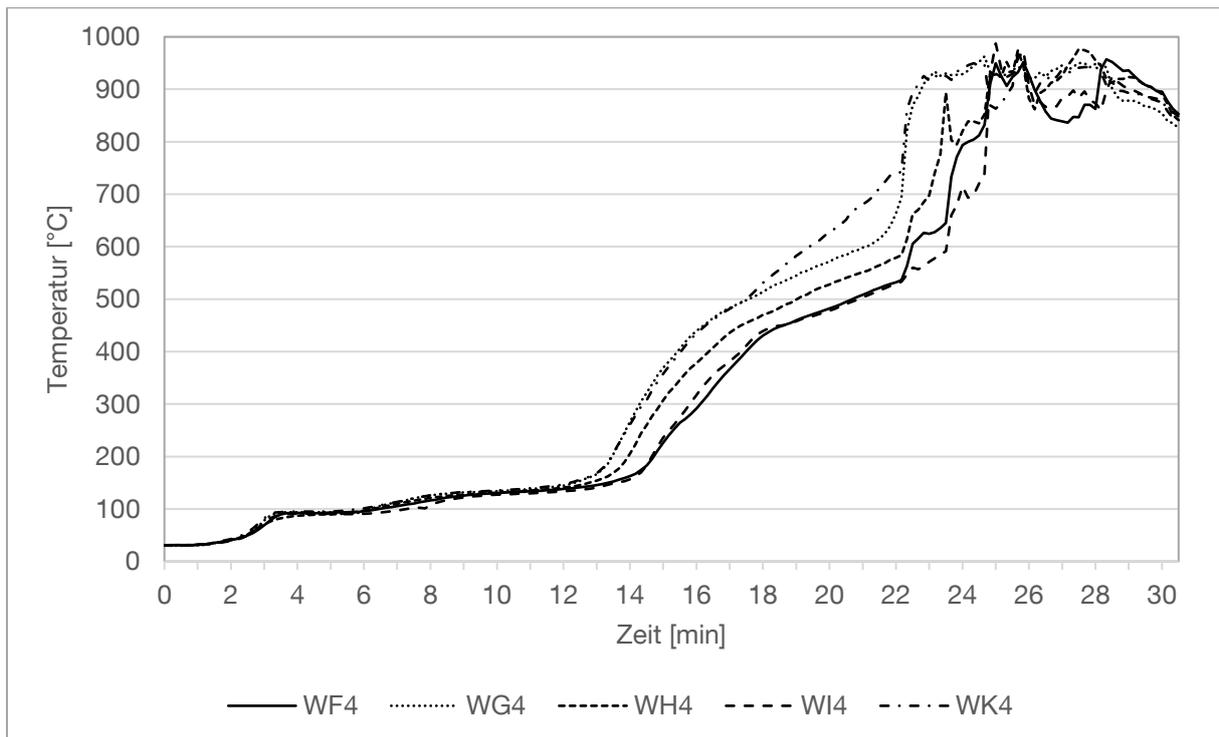


Abbildung 127: Temperaturverlauf zwischen Gipsplatte (12,54 mm GKB) und Hohlraum (41 mm) in der Wand im Gefach 1

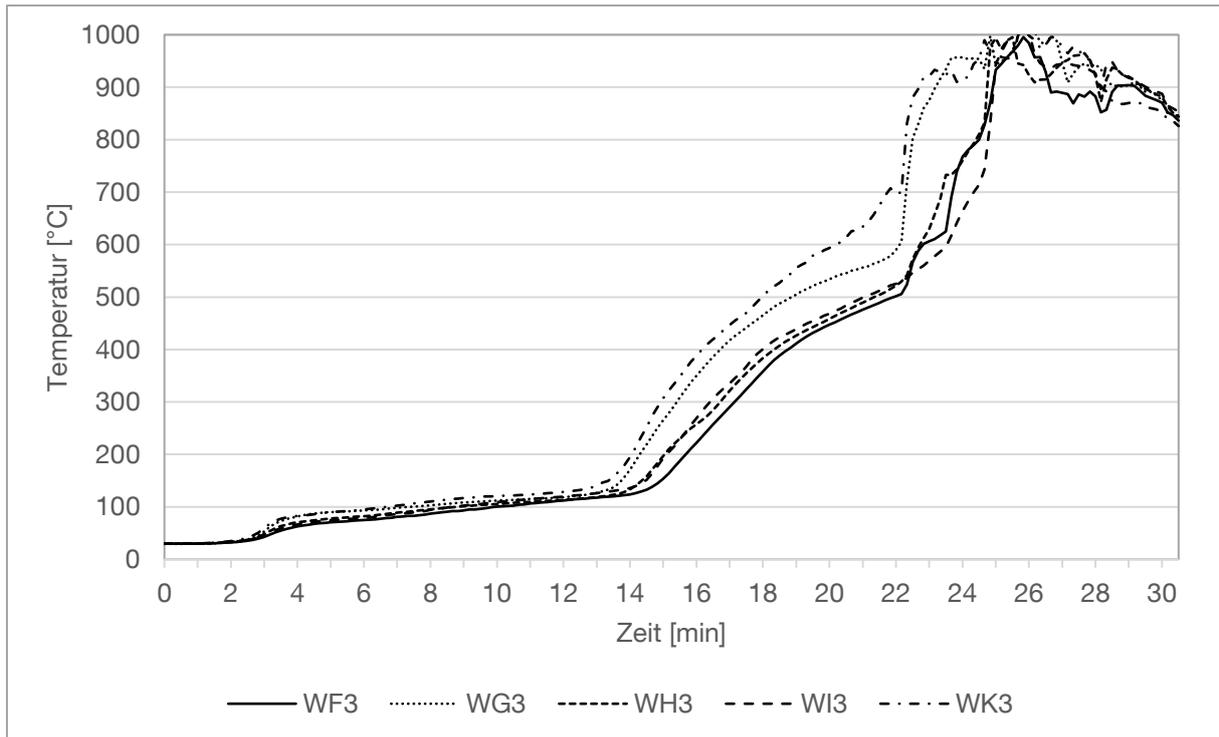


Abbildung 128: Temperaturverlauf zwischen Hohlraum (41 mm) und Holzwolle (60 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 1

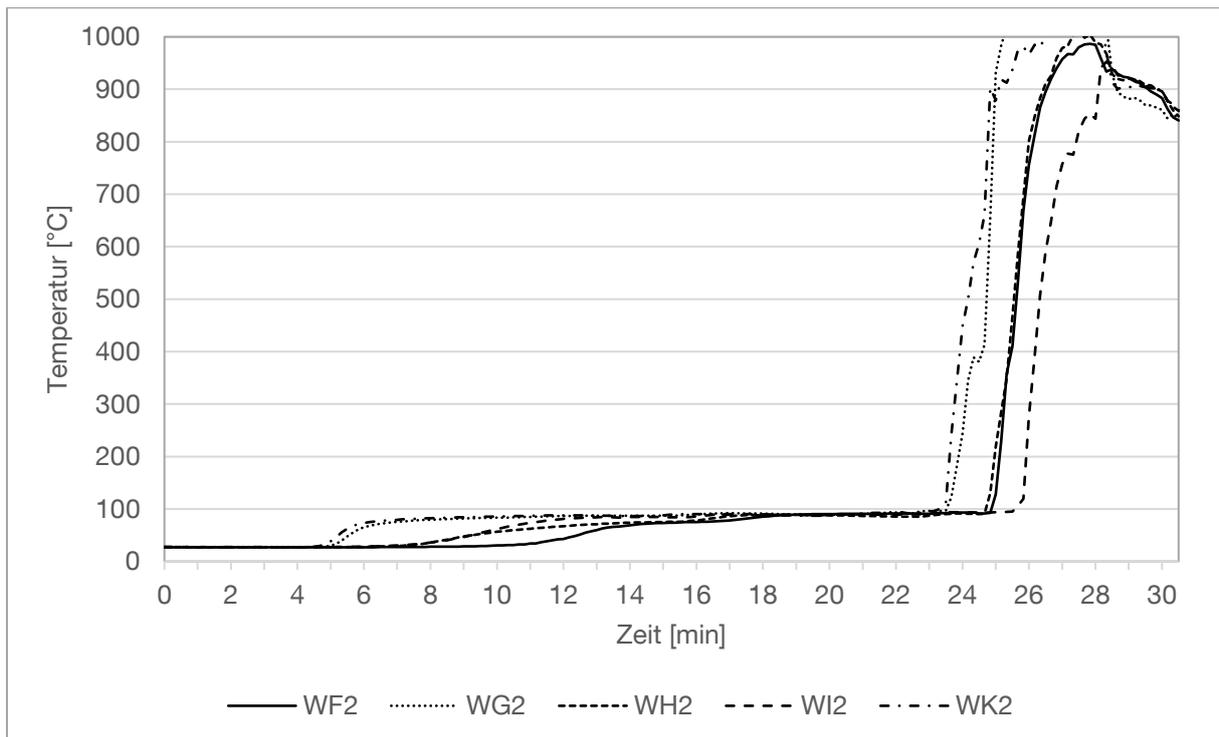


Abbildung 129: Temperaturverlauf zwischen Holzwolle (60 mm Steico Flex) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

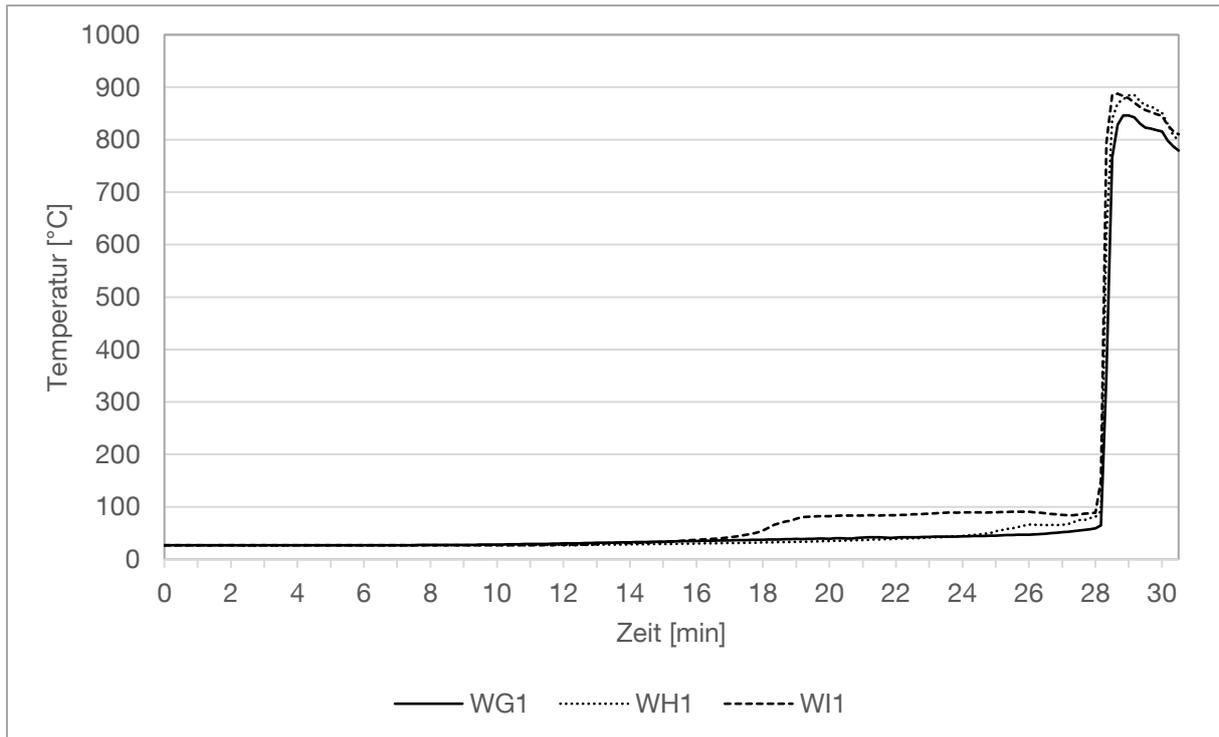


Abbildung 130: Temperaturverlauf hinter der Spanplatte in der Wand im Gefach 1

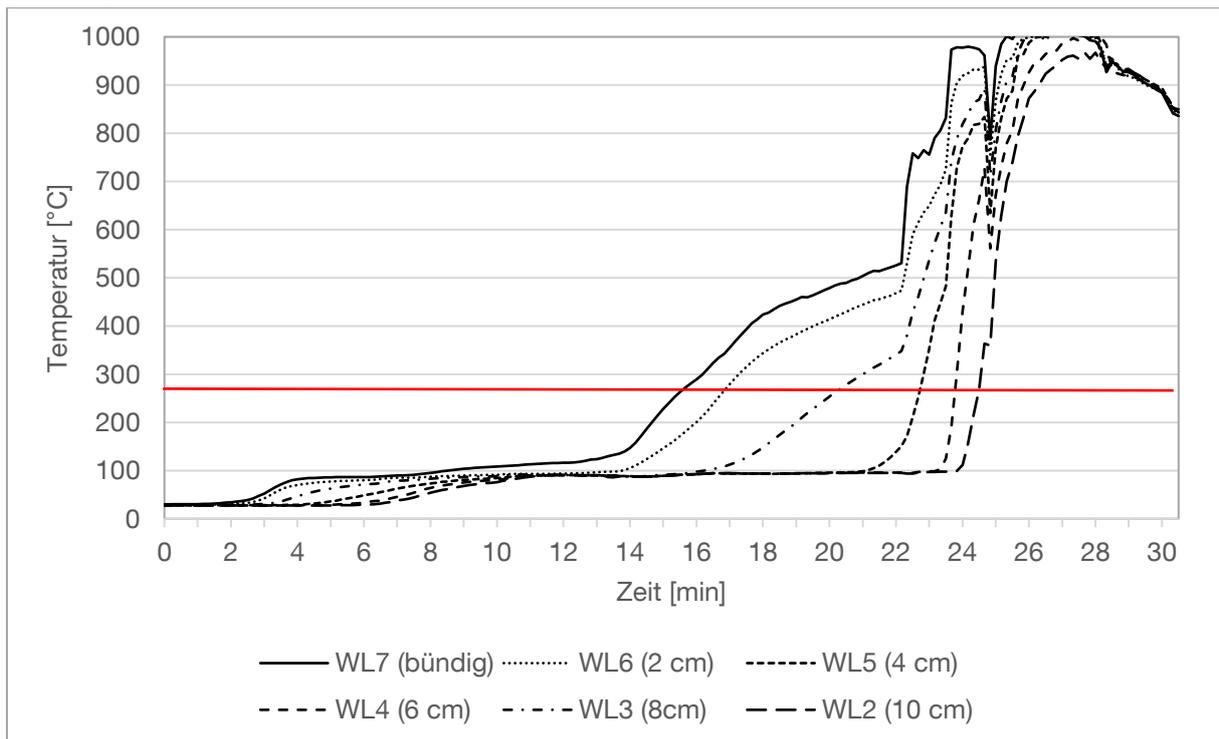


Abbildung 131: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

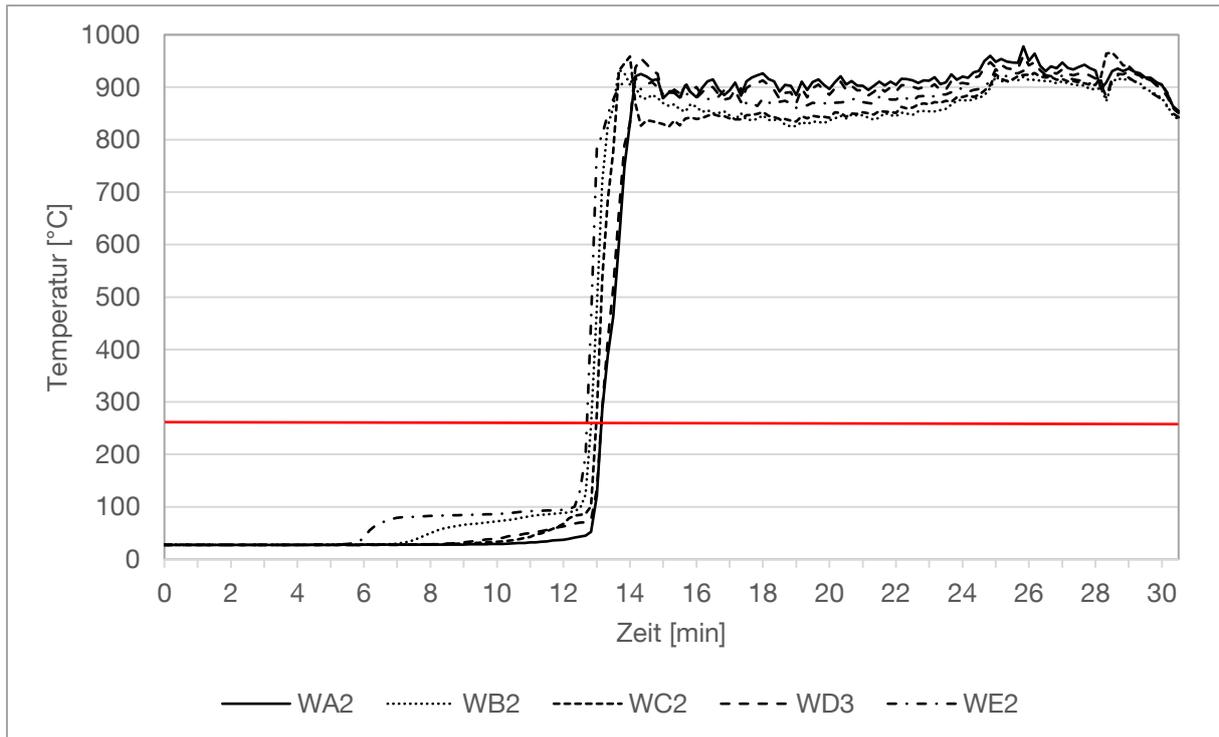


Abbildung 132: Temperaturverlauf zwischen Holzwolle (120 mm Steico Flex- geschützt durch Lattung) und 60 mm Protect Typ M in der Wand im Gefach 2

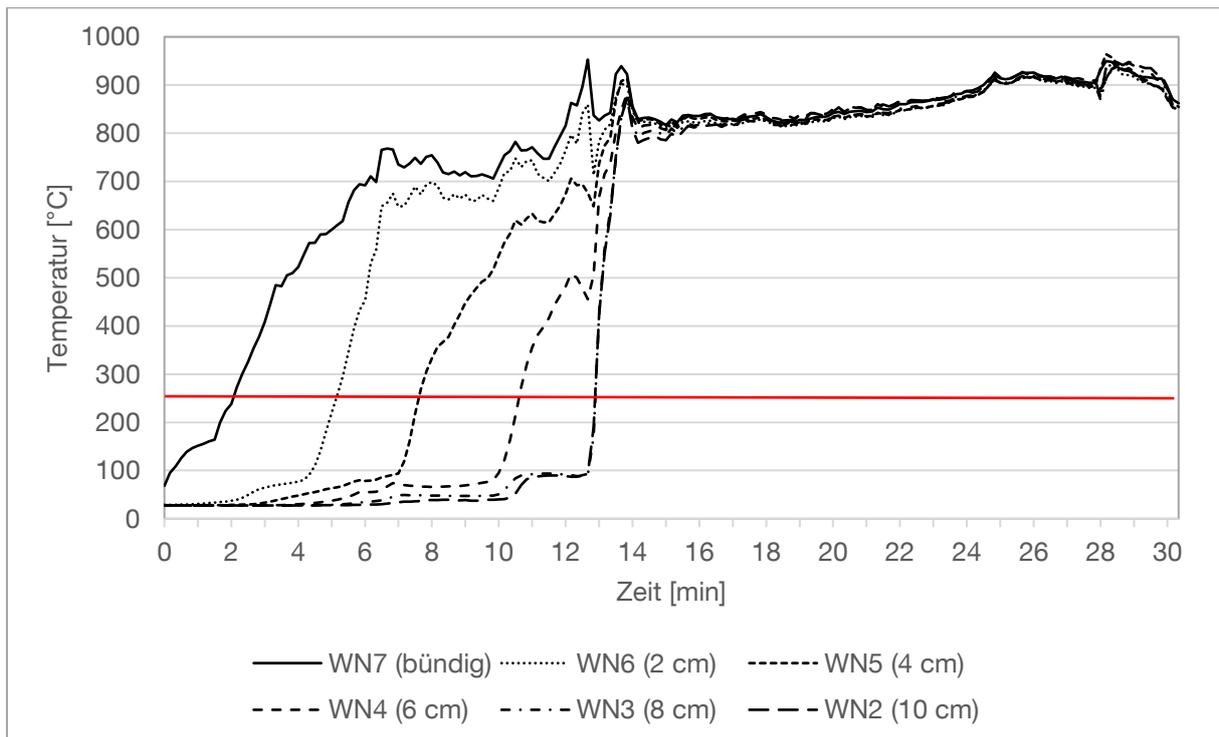


Abbildung 133: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1 HW	Lattung	8./9 Minute	Dämmung wölbt sich nach unten, T> 270°C,
Decke 2 Flexirock	Lattung	28. Minute	T> 270°C, Dämmung wölbt sich
Wand 1 Hohl- raum+60 mm HW	-	24. Minute	T> 270°C, Herausfallen der Dämmung
Wand 2 HW+ 60 mm Protect	Lattung	12. Minute	T> 270°C, Herausfallen der Dämmung

Aussagen für 120 mm HWF:

Eine Lagesicherung der Dämmung mittels Lattung an der Decke bewirkt einen Schutz dieser Schicht, der so lange anhält bis sich die Dämmung ganz vom Rahmen löst. (ca. 8. Minute)

Eine durch Lattung gesicherte Holzweichfaserdämmung, die mit einer 60 mm Protect-Platte hinterlegt ist, fällt im Gegensatz zur gesicherten Dämmung, die mit einer Spanplatte hinterlegt ist erst nach 12 Minuten ab.

### Prüfkörper 3

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
02:06	Glühende Brocken Zellulose, komplett schwarz, Wand G1 lo-rh Raum brennt, Luft zwischen Gefach und Dämmung
03:50	Lattung an Decke hält optimal
04:45	deutliche Risse in Wand, Absinken Wand G1, deutlicher Brand, Bauchen D1 mit Hasendraht
08:43	deutliche Risse 3 cm
12:24	Abdecken Wand 1, Abbruchkriterium erreicht durch Absinken der Dämmung, zu niedriger Einblasdruck
13:38	1cm Spalt Wand G2 oben, Rähm brennt mit
15:12	Lattung D2 Mitte hinten halb runter
16:16	Lattung D2 Mitte hinten ab
16:47	Anfang Bauchen D2 mitte
17:32	"Hängematte" D1
18:51	Abfallen D2 hinten, Abdecken D2
20:58	Spalt Wand 2 ungeschützt ca. 5-10cm
23:46	leichtes Kippen W2 oben
24:00	Abbrechen W2 oben, Abbruchkriterium erreicht, Platte davor
25:20	Brenner aus
27:50	große Risse, deutliches Glühen in den Rissen, Brenner wieder an
34:33	Wand 1 vgl. Foto Löcher in Dämmung im Bauch
40:47	Versagen Nägel am Balken
41:50	Versagen D1 => Abbruch, Ofen aus und Abschluss



Abbildung 134: Durchzündung und Schwarzfärbung (1. Minute)



Abbildung 135: Ablösen der gewebearmierten Dampfbremse (2. Minute)



Abbildung 136: deutlicher Spalt zwischen Rähm und Zellulose Wand G1, Risse in HW Wand G2 (5. Minute)

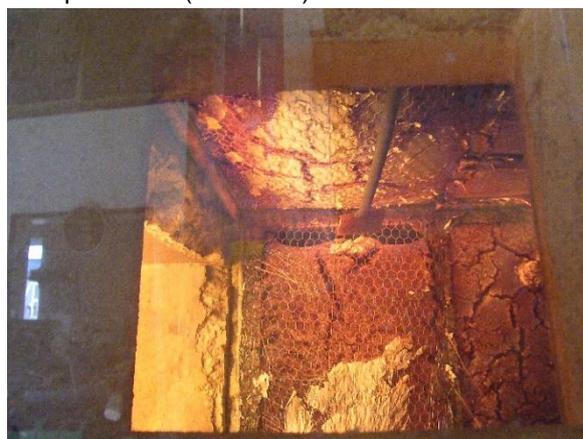


Abbildung 137: Dämmung Decke G1 wölbt sich (5. Minute)



Abbildung 138: Zündung im Spalt Wand G1 (10. Minute)



Abbildung 139: 1 cm Spalt zwischen Rähm und Zellulose in Wand G2, Zündung des Rahmens (15. Minute)



Abbildung 140: Lattung ab an Decke (15. Minute)



Abbildung 141: Bauchen der Decke G2 (17. Minute)



Abbildung 142: Abfallen von Teilen der Dämmung Decke G2, Durchzündung (20. Minute)



Abbildung 143: Dämmung Wand G1 und G2 oben zusammengefallen oder herausgefallen (31. Minute)



Abbildung 144: Dämmung Wand G2 zum großen Teil herausgefallen (35. Minute)



Abbildung 145: Decke G1 baucht sehr stark (41. Minute)



Abbildung 146: Durchzünden hinter Decke G1 (42. Minute)



Abbildung 147: Versuchskörper nach Versuchsende



Abbildung 148: Reste des Versuchskörpers

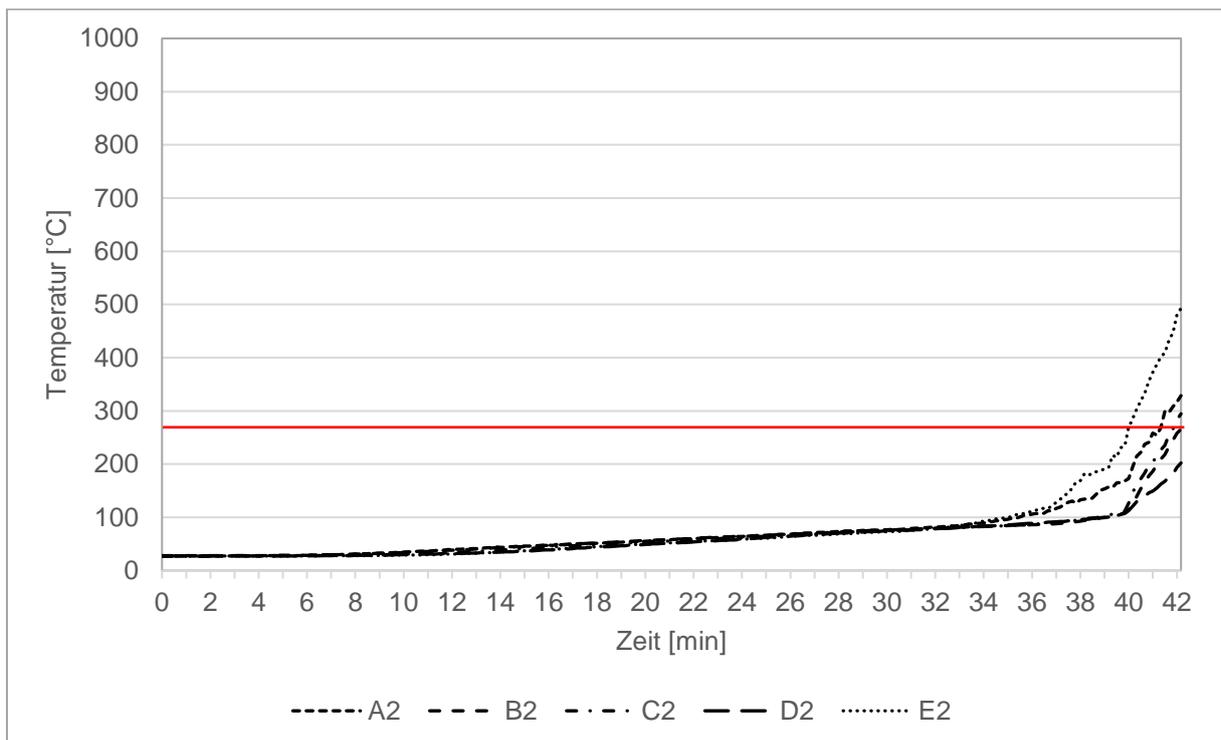


Abbildung 149: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (120 mm Steico Floc geschützt durch Hasendraht) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

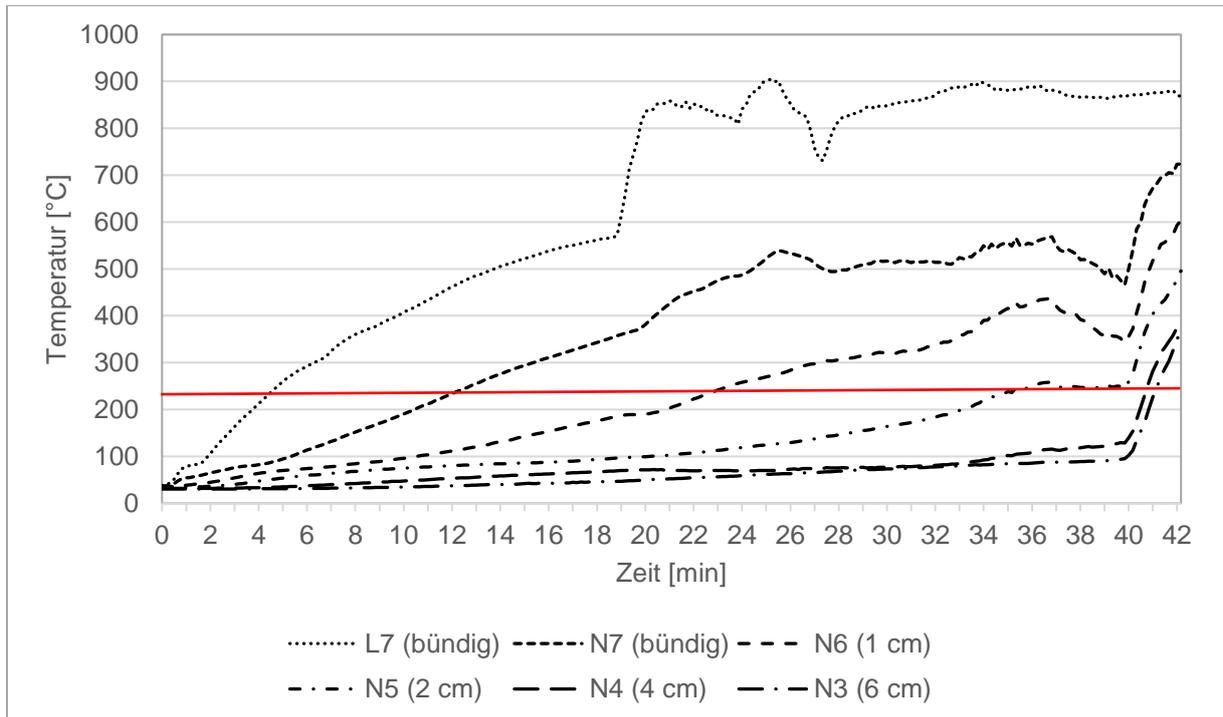


Abbildung 150: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von ca. 20 mm

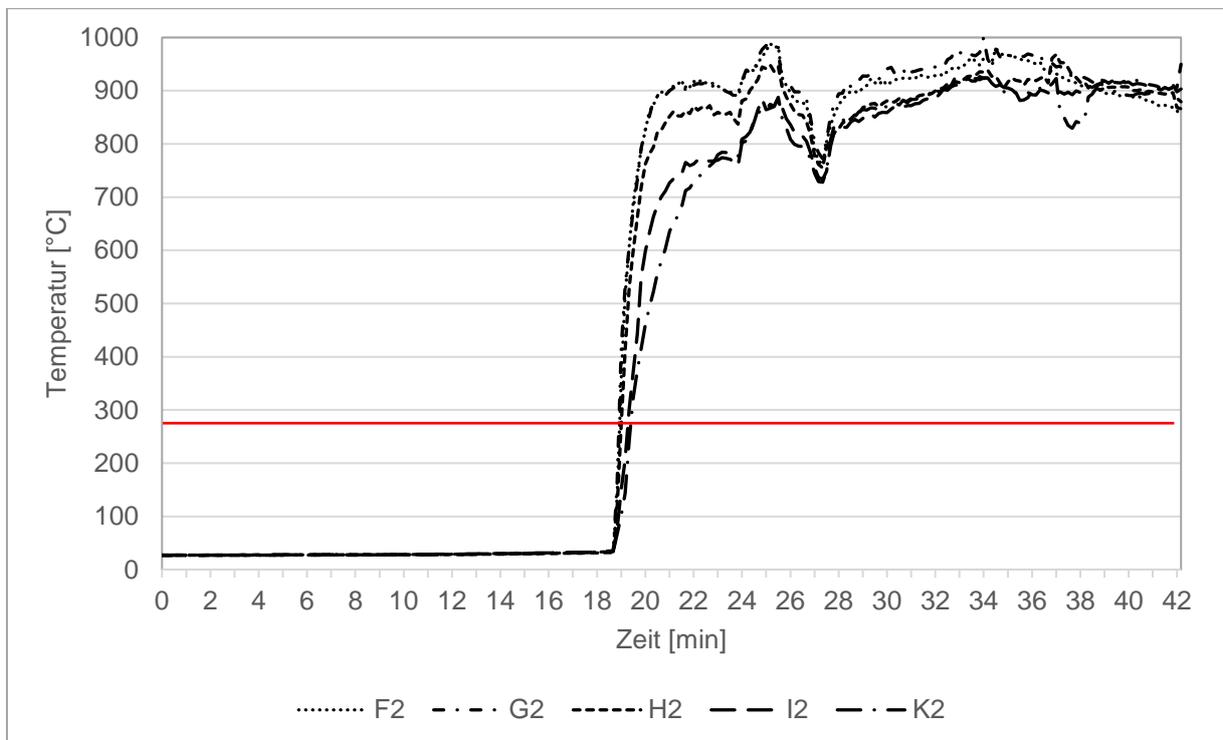


Abbildung 151: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (120 mm Isocell Zell geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

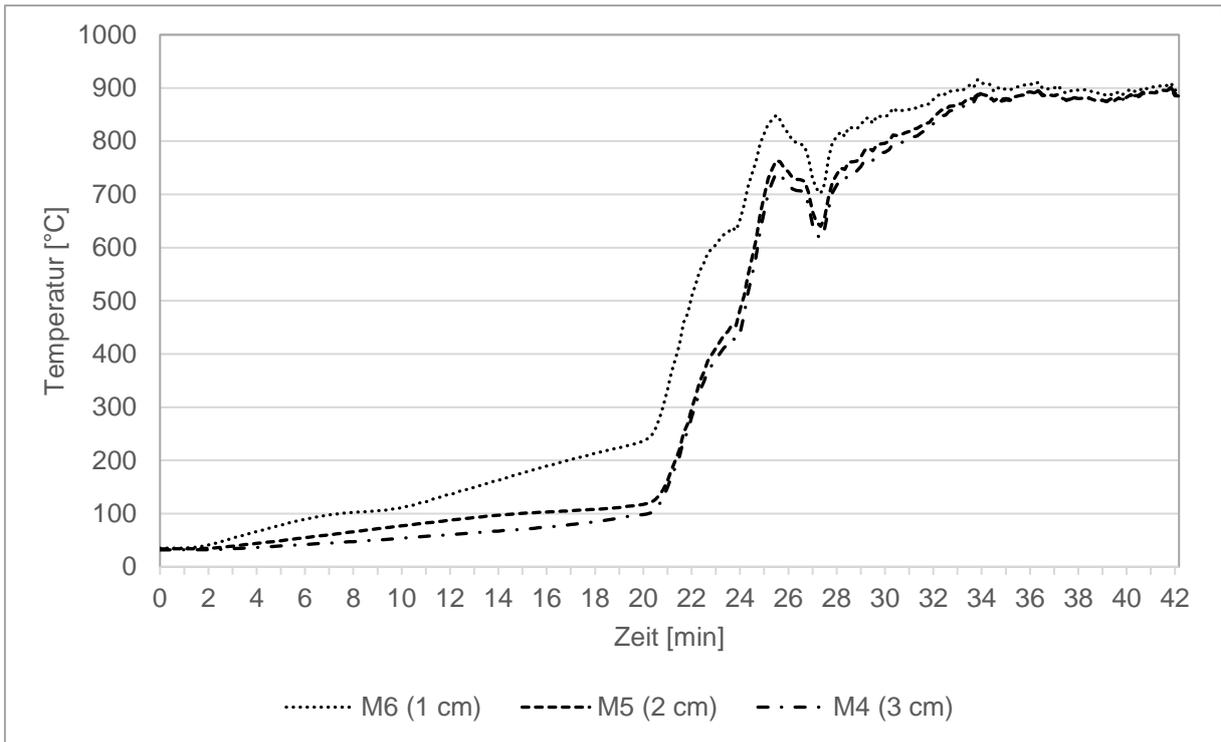


Abbildung 152: Temperaturverlauf in der Mitte des Zwischenholzes zwischen Gefach 1 und Gefach 2 der Decke

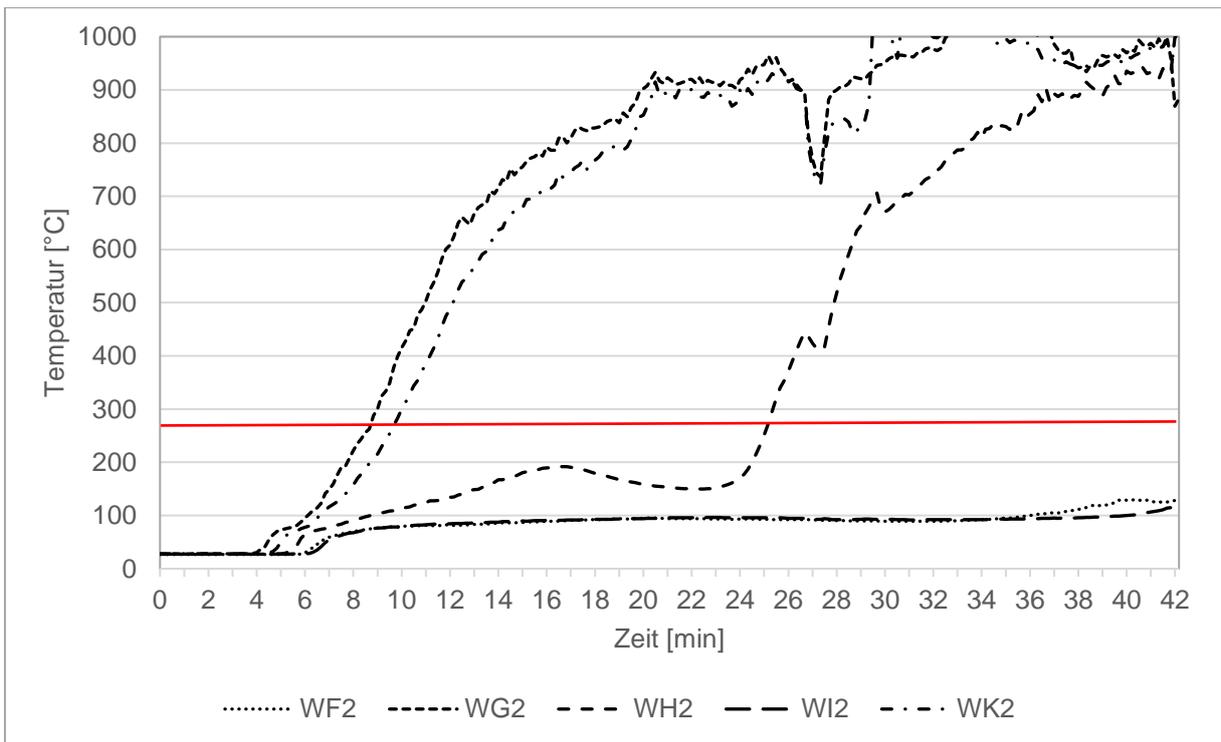


Abbildung 153: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (120 mm Steico Floc geschützt Hasendraht) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

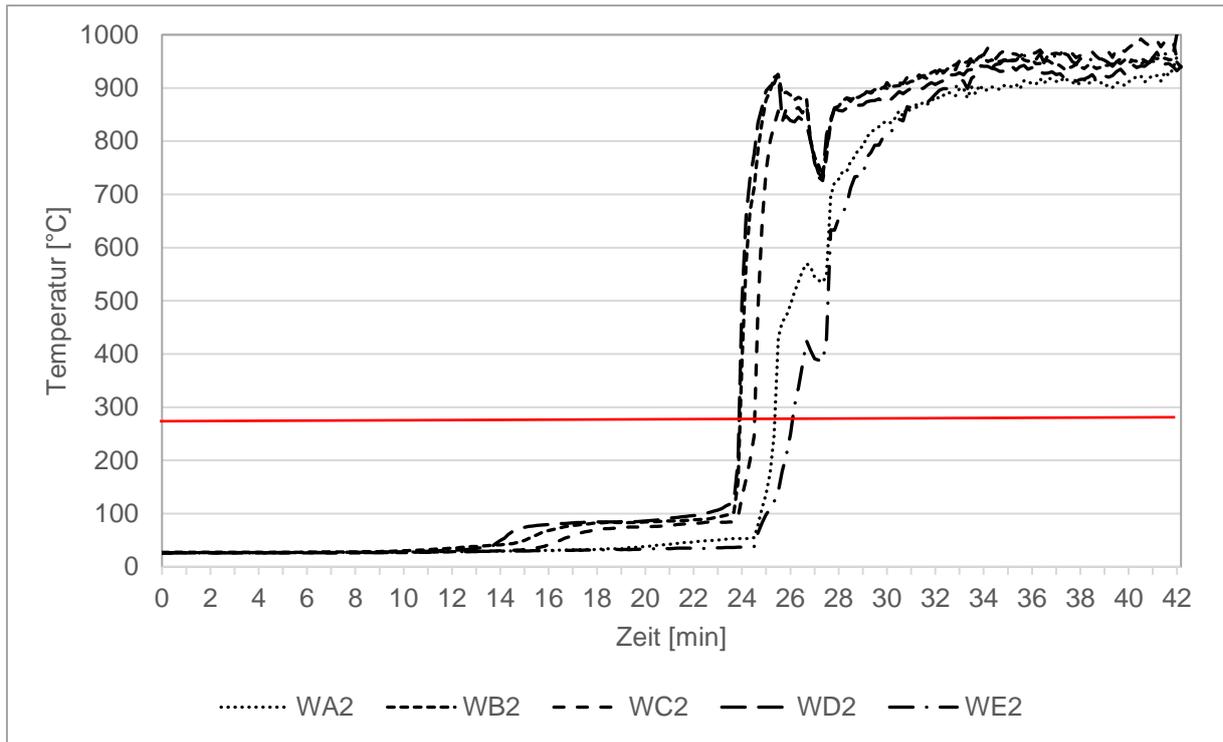


Abbildung 154: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (120 mm Isocell Zell ungeschützt) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

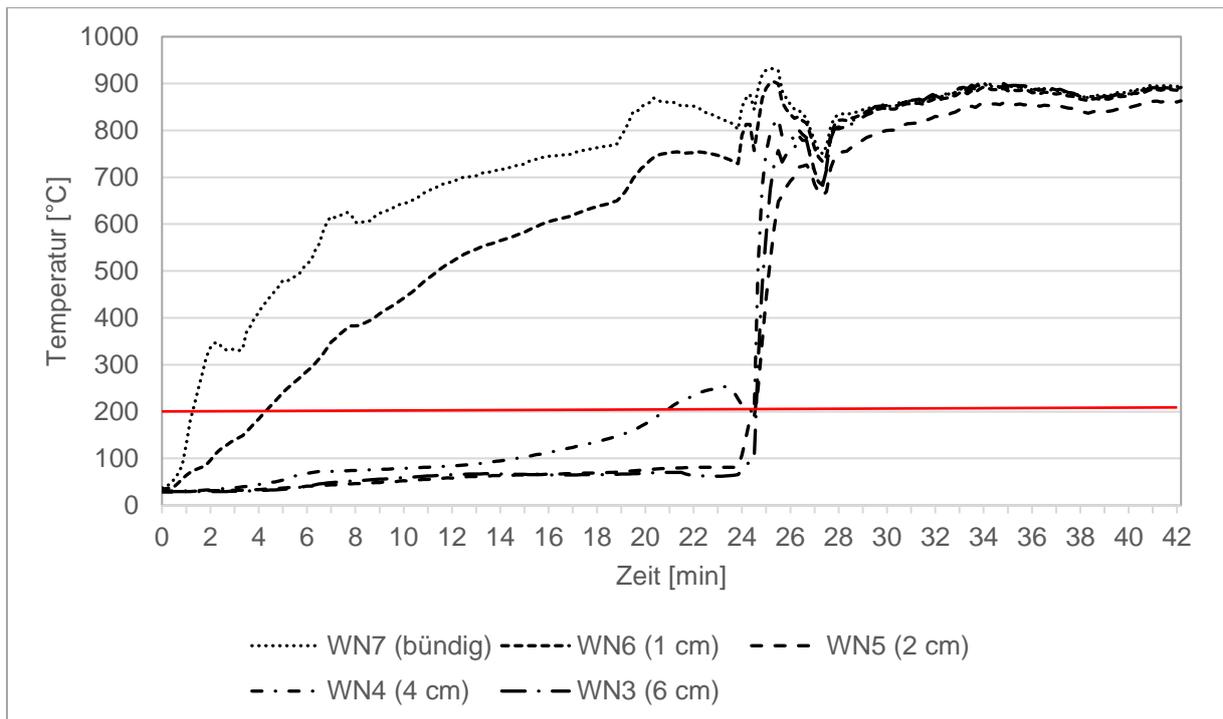


Abbildung 155: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

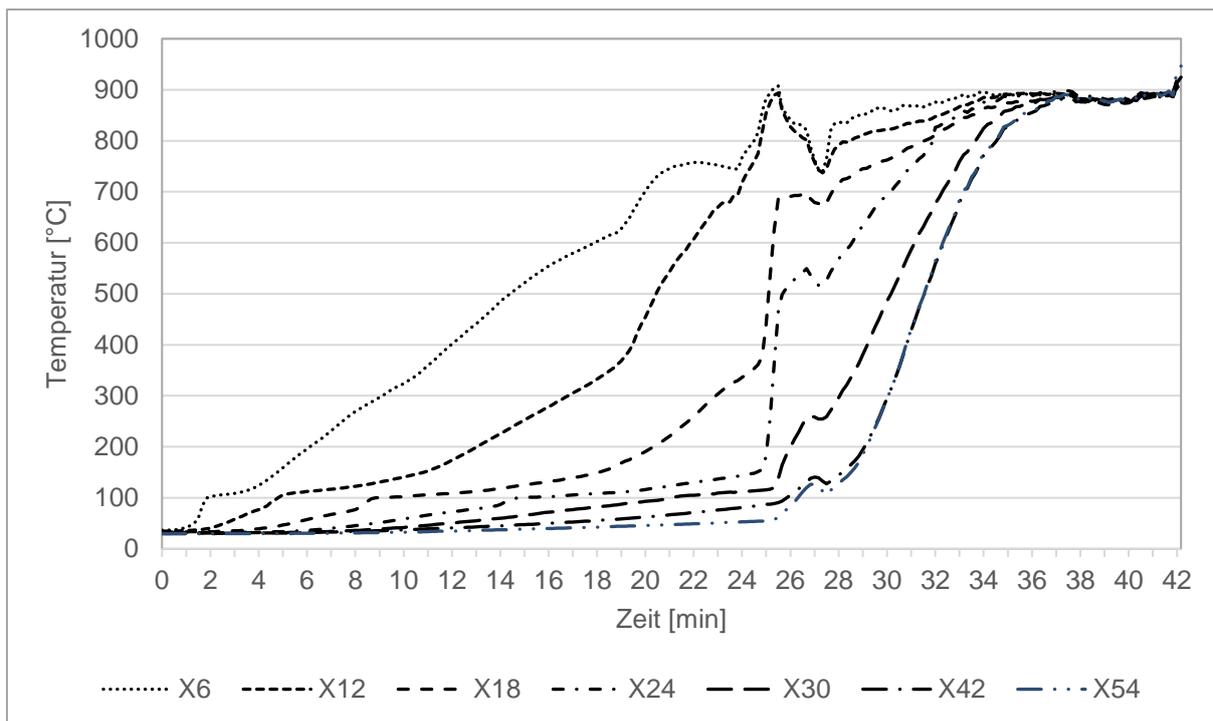


Abbildung 156: Temperaturverlauf im Mittelholz der Wand zwischen Gefach 1 und Gefach 2

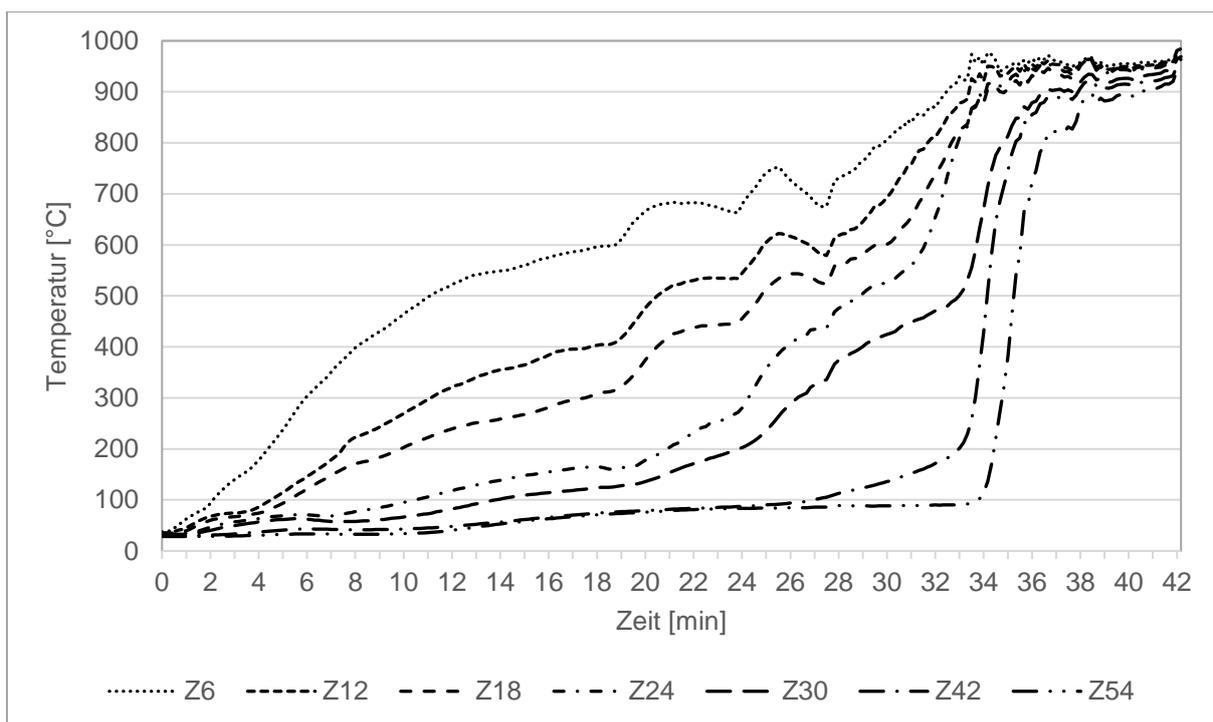


Abbildung 157: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 1? zugewandt

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1 Zellulose	Hasendraht	39. Minute	Dämmung wölbt sich nach unten, T > 270°C,
Decke 2 Zellulose	Lattung	19. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung
Wand 1 Zellulose	Hasendraht	7. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung im oberen Bereich der Wand, da schlecht eingeblasen
Wand 2 Zellulose	ungeschützt	23. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung

Aussagen für 120 mm Zellulose:

Eine ganzflächige Lagesicherung der Dämmung bewirkt einen Schutz von 39 Minuten. Sofern die Decke durch Lattung geschützt ist, fällt die Dämmung 4 Minuten nach dem Abbrand der Lattung heraus.

Eine ungeschützte Dämmung in der Wand schützt die dahinterliegende Schicht 23 Minuten lang. Eine schlecht eingeblasene Dämmung in der Wand bewirkt ein Zusammensacken und eine Beanspruchung der Spanplatte nach 7 Minuten.

**Prüfkörper 4**

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
01:33	erste deutliche Risse an der Wand und Decke
02:35	D1 Rückzug an Balken links
03:15	Trapezförmiges Rückziehen am Ständer Balken
04:04	W2 Kippen nach vorne ca. 3cm
04:50	D2 Hasendraht hängt durch, aber Dämmung nicht im Hasendraht, hält von selbst => Klemmen
09:00	Klemmwirkung D2 noch intakt, W1 und W2 trapezförmiger Rückzug sehr deutlich oberes Drittel
10:24	D2 hinten Klemmwirkung versagt, hängt in Hasendraht, Mitte Klemmwirkung noch intakt
12:44	Fugen zu Ständer ca. 7cm, kein Bauchen der Dämmung
14:10	W2 Kippen nach vorne oben l,m ca. 5cm, D2 Versagen der Klemmwirkung teilweise aber noch nicht im Draht
15:38	Versagen obere Lattung W1
16:23	Versagen Lattung D1 hinten
17:28	Versagen Lattung W1 Mitte, D2 Dämmung hängt fast komplett im Hasendraht
18:30	Versagen Lattung W1 unten
22:14	Versagen D1 vordere Schicht, hinterer Teil noch drin
23:23	Fallen des Restes D1 hinten
24:16	OT1 gezogen, falsche Stelle
24:40	OT1 zurück
25:11	Brenner aus
26:00	Abdecken D1
29:00	Deutliche Ausdehnung 10cm oben W1 und W2
30:46	Kippen W1
31:44	W1 Mitte oben gekippt
32:22	Versagen W1, OT3 gezogen
36:00	270°C W2 erreicht, Dämmung steht aber noch drin
36:52	Abbruch, Alle Versagenskriterien erreicht

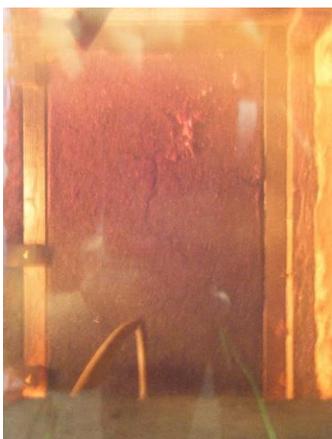


Abbildung 158: Verfärbung Gefach 2 Wand (2. Minute)



Abbildung 159: Verfärbung Gefach 1 Wand (2. Minute)

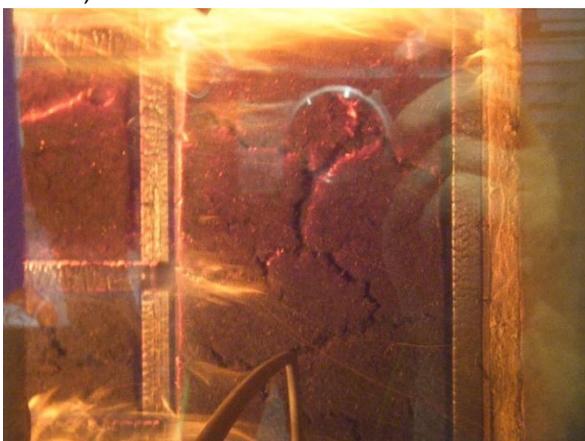


Abbildung 160: Entzündung des Rahmens (4. Minute)



Abbildung 161: Hasendraht Decke G1 wölbt sich, Dämmung noch nicht (5. Minute)

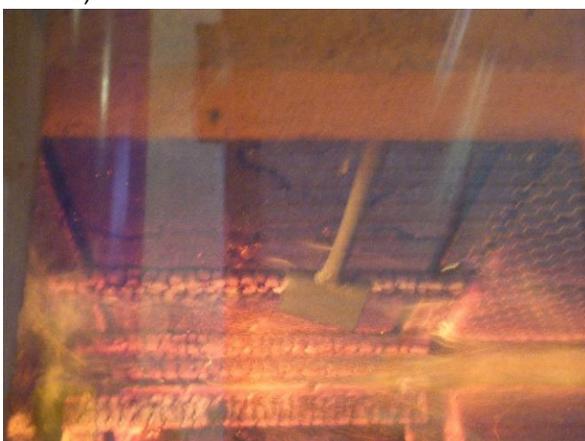


Abbildung 162: Dämmung Decke G1 löst sich etwas vom Rahmen (5. Minute)

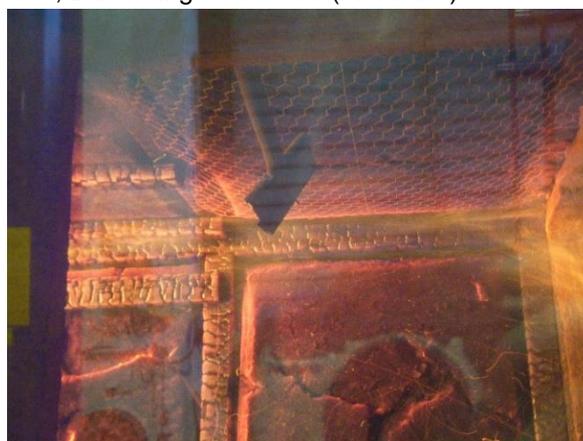


Abbildung 163: Rückzug der Dämmung an den Wänden vom Rahmen (6. Minute)



Abbildung 164: Erhöhter Rückzug der Dämmung vom Rahmen Wand G1 (9. Minute)



Abbildung 165: Versagen der Lattung Wand (15. Minute)



Abbildung 166: Versagen der Lattung Decke (17. Minute)



Abbildung 167: Dämmung Decke G1 herausgefallen (23. Minute)



Abbildung 168: Dämmung Wand G1 kippt oben (32. Minute)



Abbildung 169: Dämmstoff Wand G1 herausgefallen (33. Minute)



Abbildung 170: Dämmung Decke G2 wölbt sich stark (34. Minute)



Abbildung 171: Dämmung Wand G2 zieht sich zurück (36. Minute)



Abbildung 172: Versuchskörper nach Versuchsende

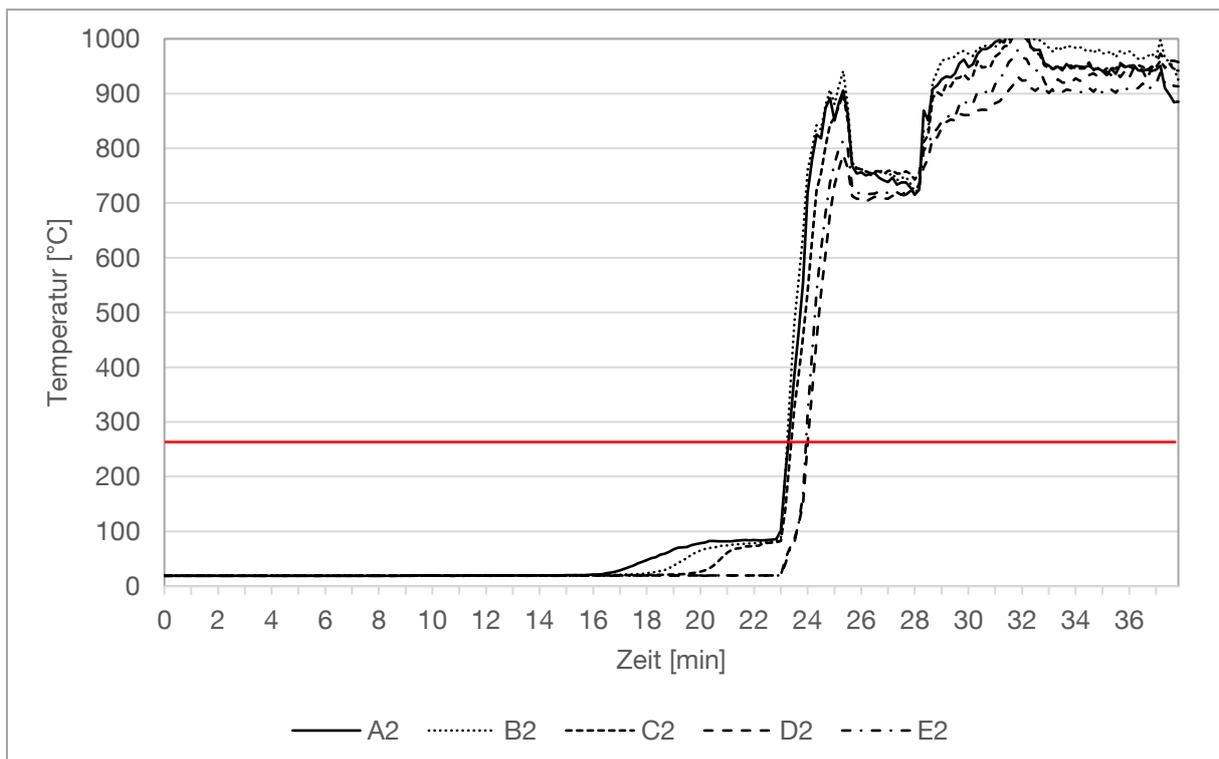


Abbildung 173: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (240 mm Steico geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

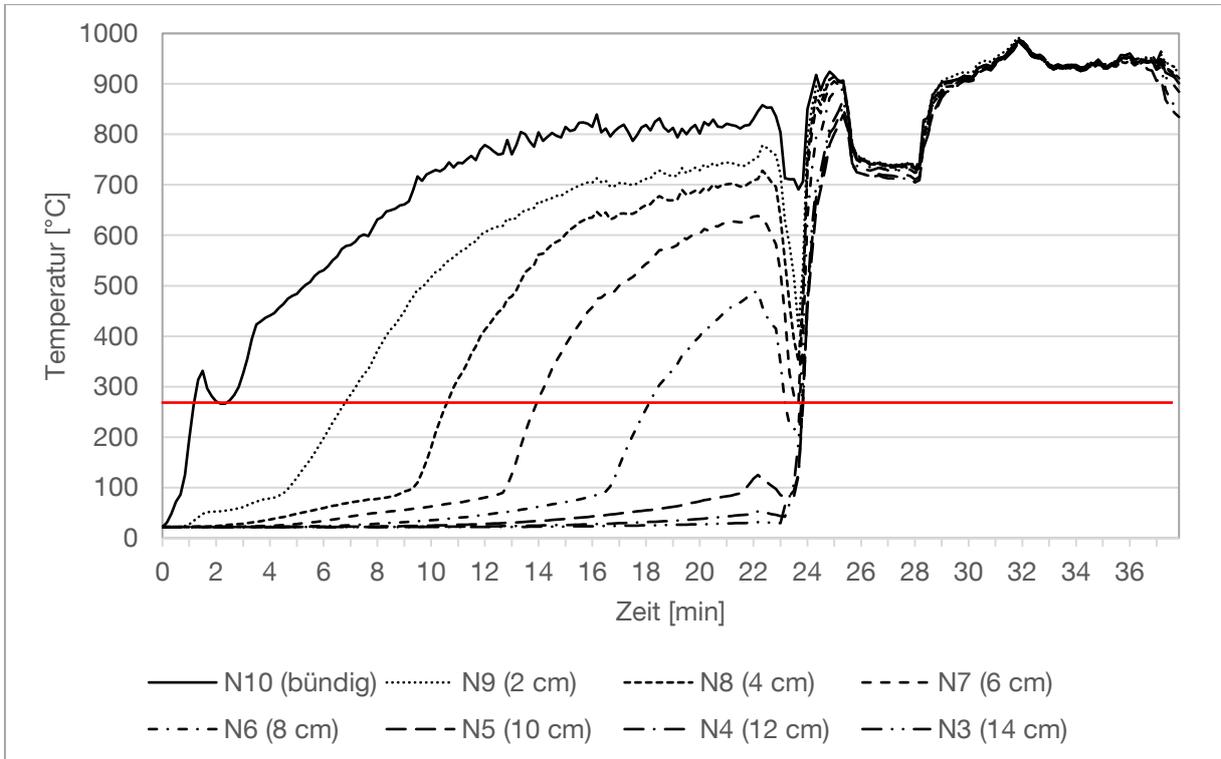


Abbildung 174: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

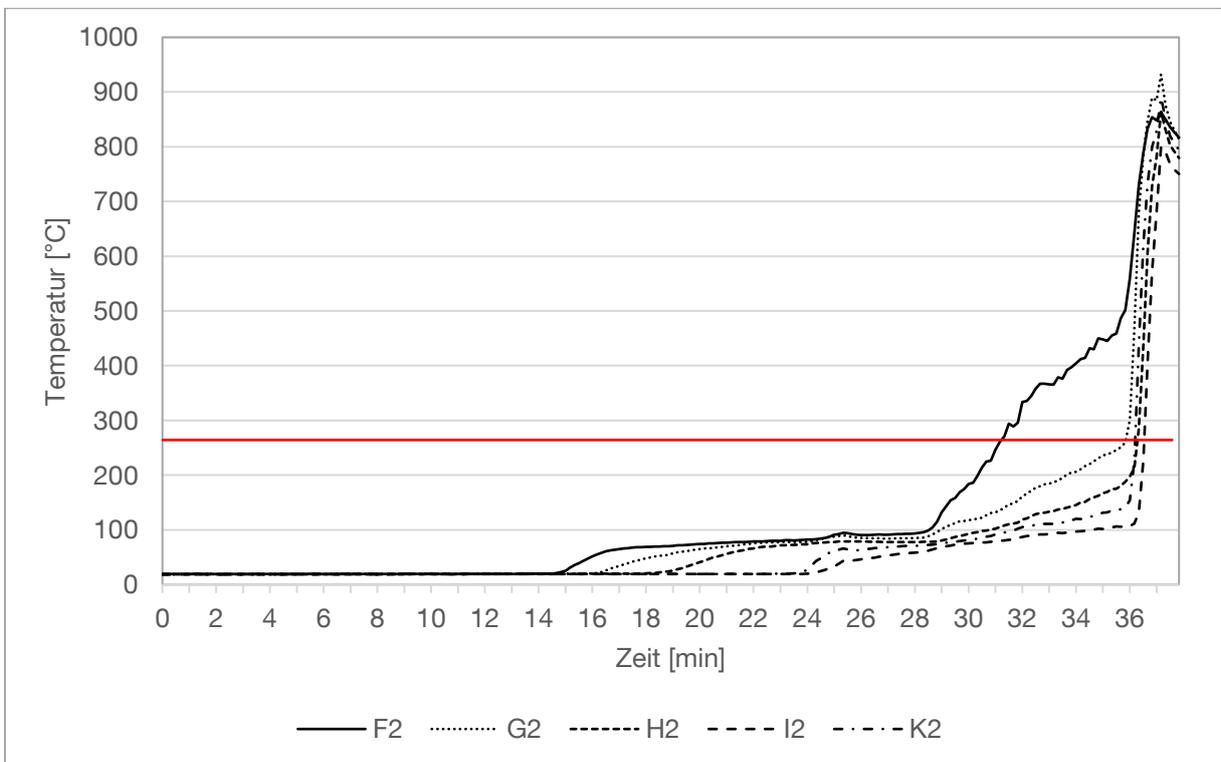


Abbildung 175: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (240 mm Steico geschützt durch Hasendraht) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

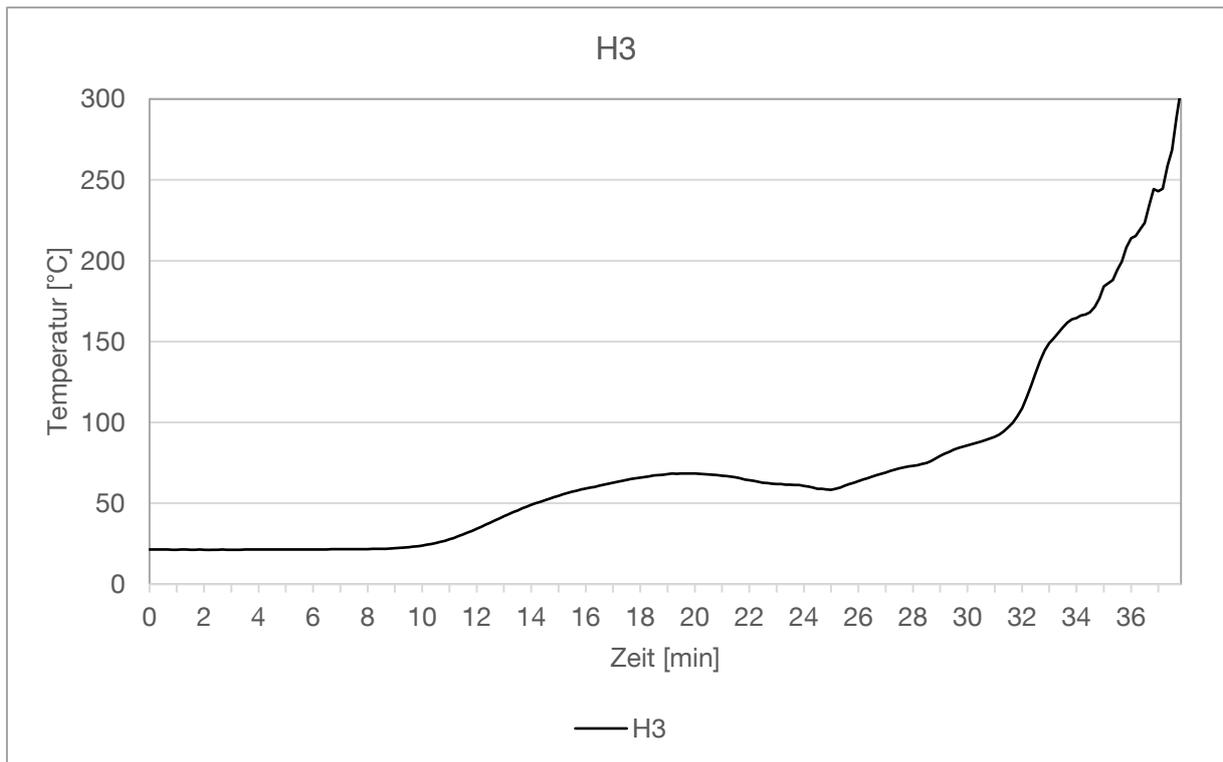


Abbildung 176: Temperaturverlauf in einer Tiefe von ca 120 mm in der Holzweichfaserplatte in der Decke im Gefach 2

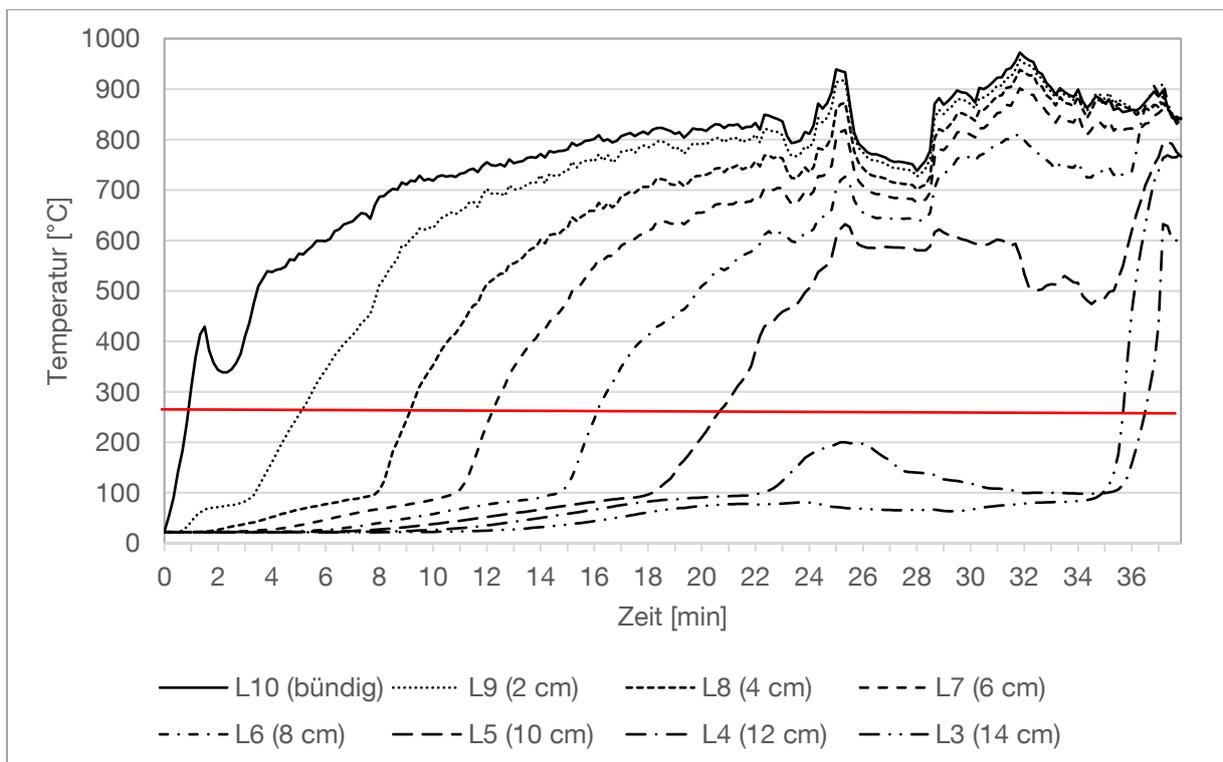


Abbildung 177 Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

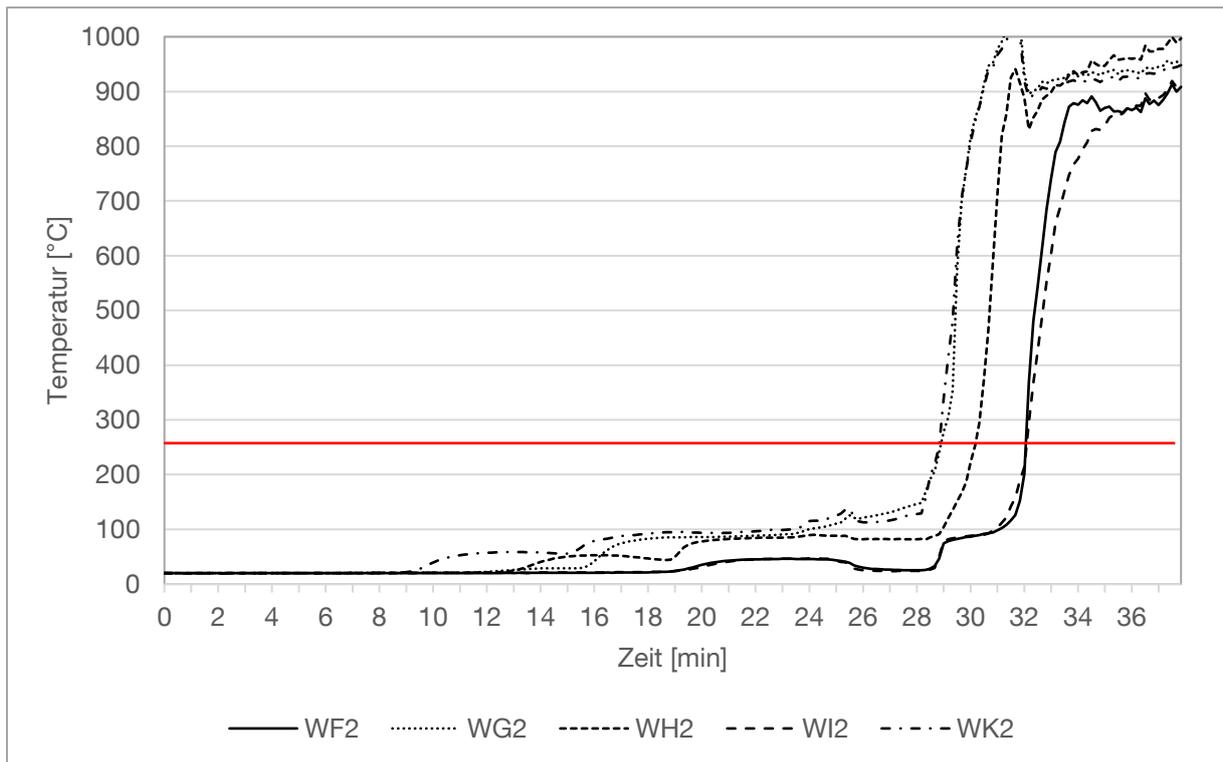


Abbildung 178: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (240 mm Steico geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

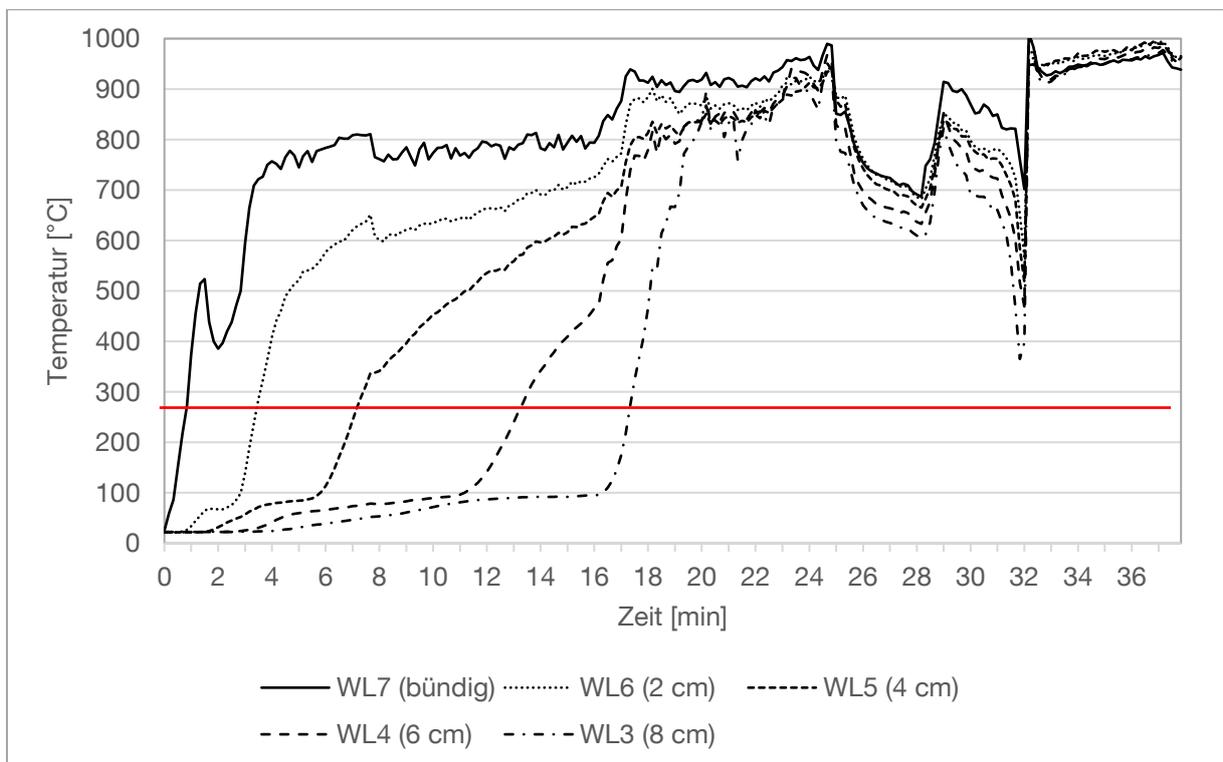


Abbildung 179: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

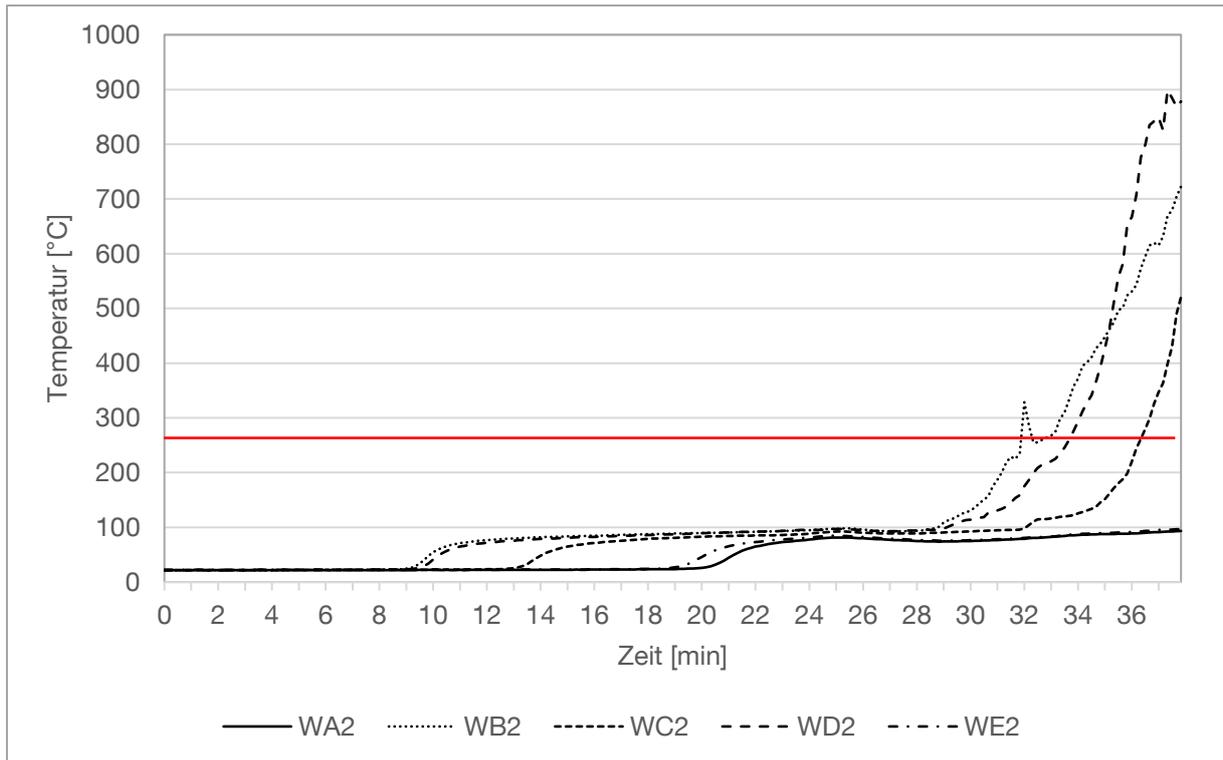


Abbildung 180: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (240 mm Steico geschützt durch Lattung) und Protect-Platte (60 mm Steico Typ M) in der Wand im Gefach 2

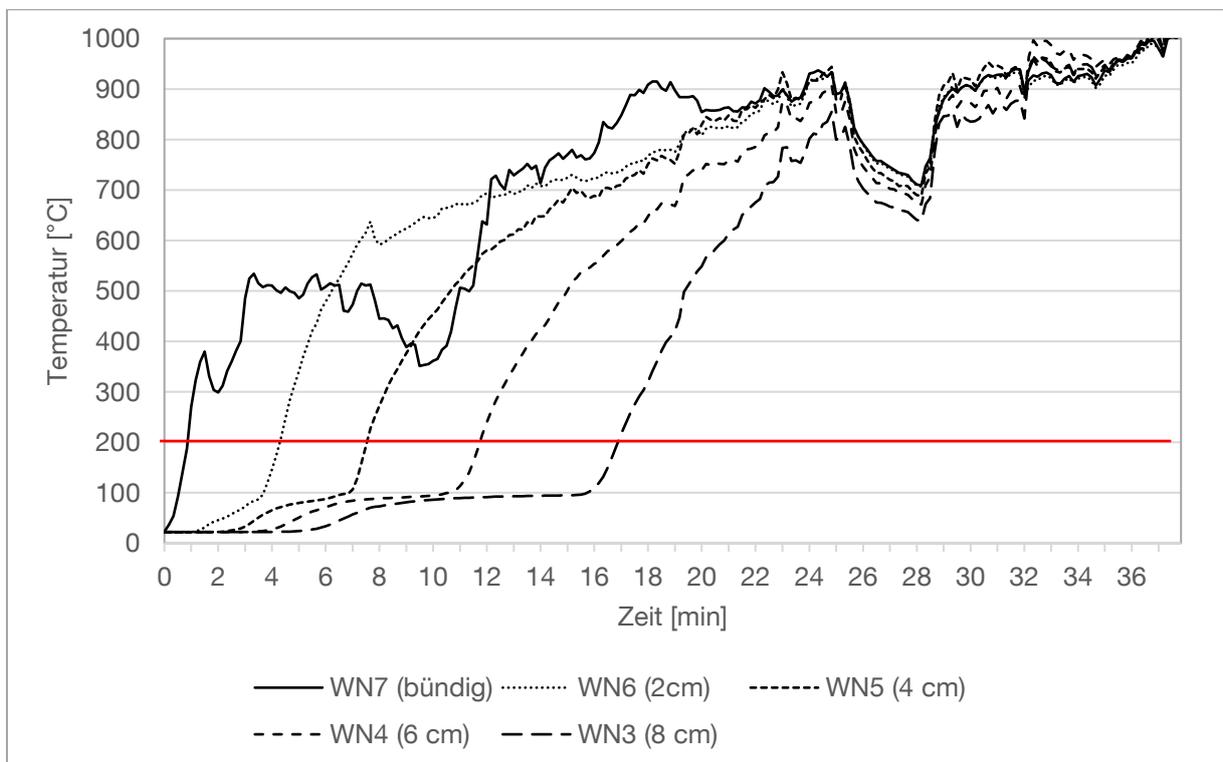


Abbildung 181: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1	Lattung	23. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Dämmung
Decke 2	Hasendraht	30. Minute	T > 270°C, 4 Minuten später starkes Durchhängen der Dämmung
Wand 1	Lattung	28. Minute	T > 270°C, Kippen der Dämmung und 2 Minuten später Herausfallen der Dämmung
Wand 2 Hinterlegt mit 60 mm Pro- tect	ungesichert	31. Minute	T > 270°C, da Schrumpfen der Dämmung

Aussagen für 240 mm HWF:

Versagen der Lattung nach ca. 16 Minuten. 7 Minuten später Herausfallen der Dämmung an der Decke.

Eine ganzflächige Lagesicherung der Dämmung bewirkt einen verlängerten Schutz dieser Schicht, die so lange anhält bis sich die Dämmung ganz vom Rahmen löst. (ca. 30. Minute)

In der Wand sackt die Dämmung nach 28 bis 30 Minuten und bewirkt ein Kippen an der Wand oben. Dies führt zu einer Entzündung der dahinterliegenden Schicht. Eine Holzweichfaserdämmung, die mit einer 60 mm Protect-Platte hinterlegt ist, fällt im Gegensatz zur gesicherten Dämmung, die mit einer Spanplatte hinterlegt ca. 3 Minuten später ab.

**Prüfkörper 5**

<b>Zeit [min:s]</b>	<b>Beobachtungen während der Prüfung</b>
01:02	Braunfärbung erst Decke
01:25	Flammen Dämmung
01:52	Schwarzfärbung Ständer
02:20	Risse Wand links mitte
03:02	deutliches Verkürzen am Ständer
03:20	erste deutliche Risse Ständer
03:55	Gefach 2 rh deutliches Bauchen, Spannplatte sichtbar
04:02	Herausfallen hinten Gefach 1 Decke
04:14	Herausfallen hinten Gefach 2 Decke
07:47	Herausfallen Decke vorne
08:25	Wand 1 herausgefallen oben, Kippen Wand 2
10:30	Abdecken Decke
12:02	Herausbrechen der Decke
12:41	Zurückziehen Protect Typ M Wand 1 von Ständer
13:28	Versagen Lattung, Herausfallen Dämmung
14:02	Versagen Lattung Wand 2 Dämmung raus, - Versagen Lattung Decke 2 Dämmung raus hinten
14:40	Versagen Lattung Decke 1, Dämmung raus hinten
16:20	Versagen Lattung Decke 2, Dämmung raus vorne
21:25	Durchbruch Decke
	Abbruch



Abbildung 182: Prüfkörper V1 vor dem Versuch



Abbildung 183: Schwarzfärbung der Holzweichfaserdämmung (1. Minute)



Abbildung 184: Durchzündung der Decke (1. Minute)



Abbildung 185: Herausfallen der Decke 1 und starkes Schrumpfen der Holzwolledämmung (2. Minute)



Abbildung 186: Entzündung der Spanplatte im oberen Teil des Gefaches 1 der Wand nach Rückzug der Dämmung (5. Minute)



Abbildung 187: Herausfallen der Dämmung aus Gefach1 der Wand (6. Minute)



Abbildung 188: Entzünden der Spanplatte, da Rückzug der Dämmung vom Rahmen an der Wand im Gefach 2 (8. Minute)



Abbildung 189: Entzündung des Rahmens an der Decke im Gefach 2 (8. Minute)

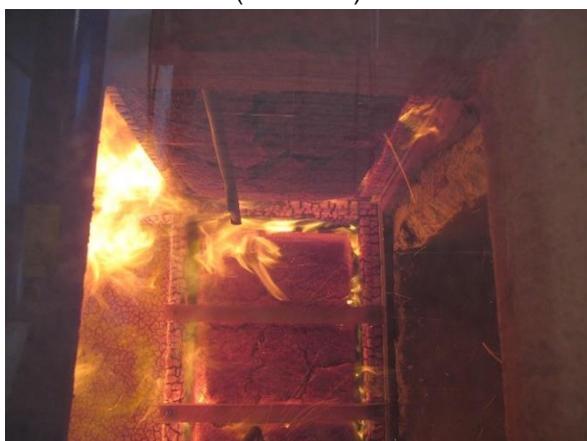


Abbildung 190: Kippen der Dämmung im oberen Bereich des Gefaches 2 der Wand (11. Minute)



Abbildung 191: starkes Durchhängen der Dämmung im Gefach 2 der Decke und Durchzünden hinter der Dämmung (13. Minute)



Abbildung 192: Decke nach Versuchsende



Abbildung 193: Versuchskörper Decke nach Versuchsende

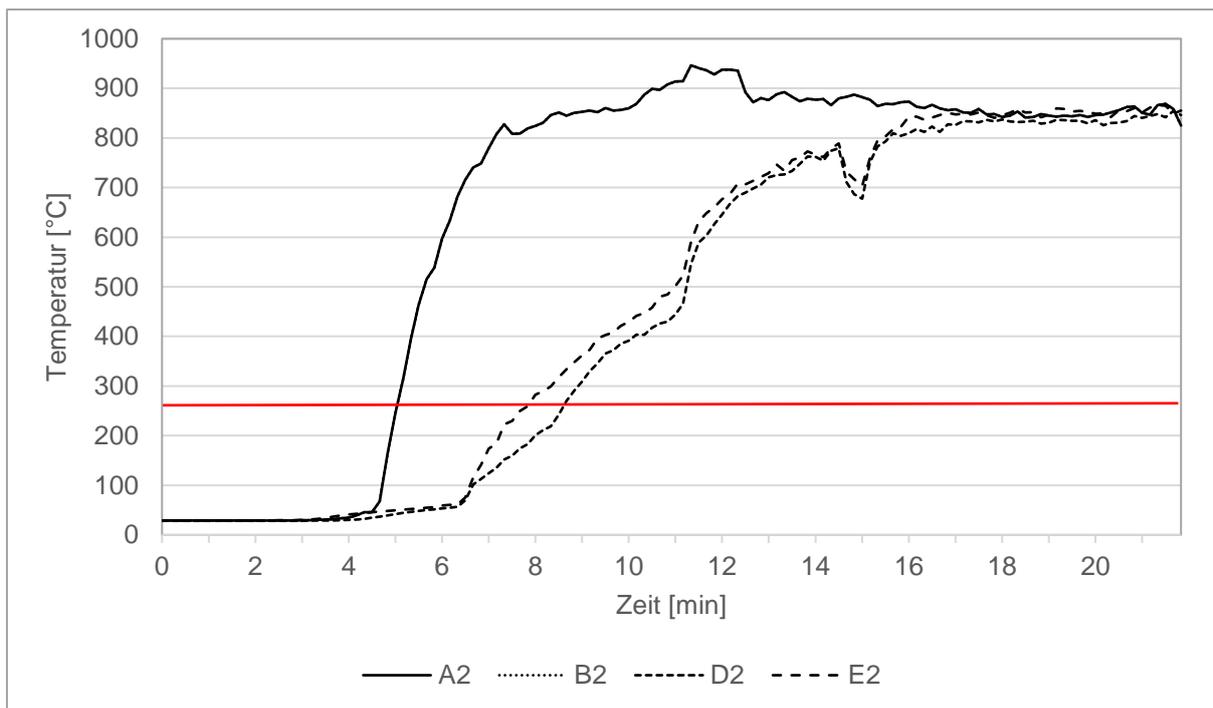


Abbildung 194: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (60 mm Steico geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

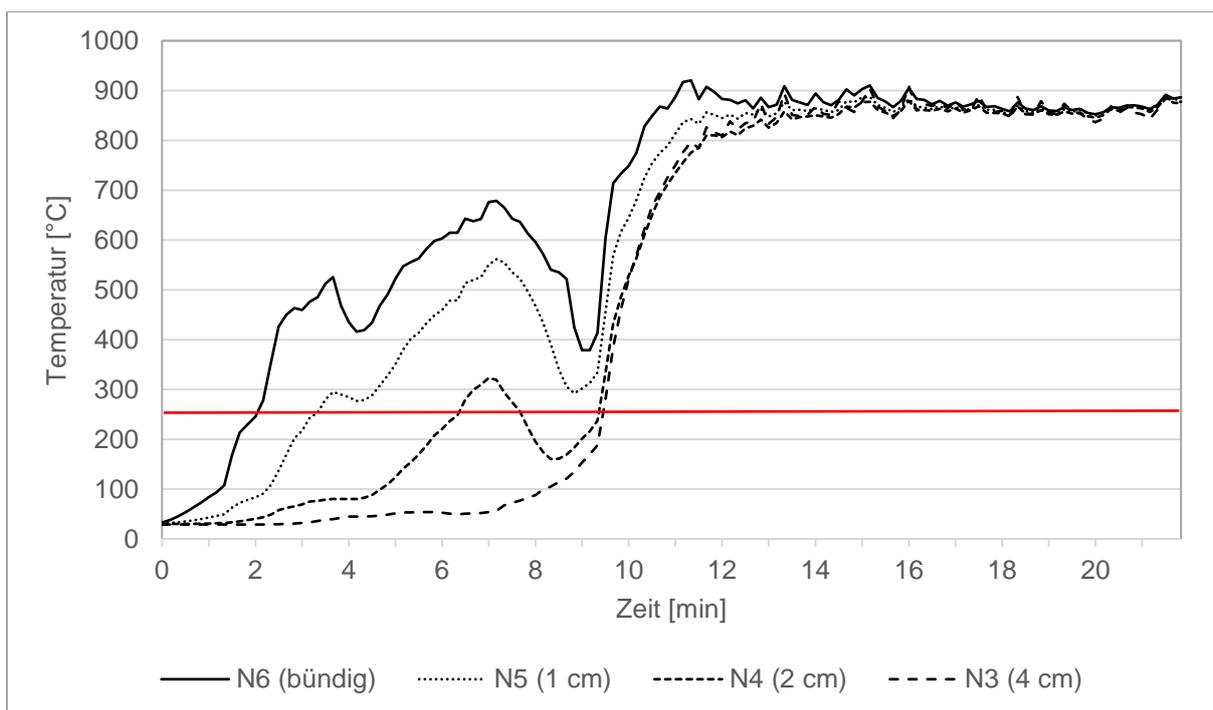


Abbildung 195: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 10-20 mm

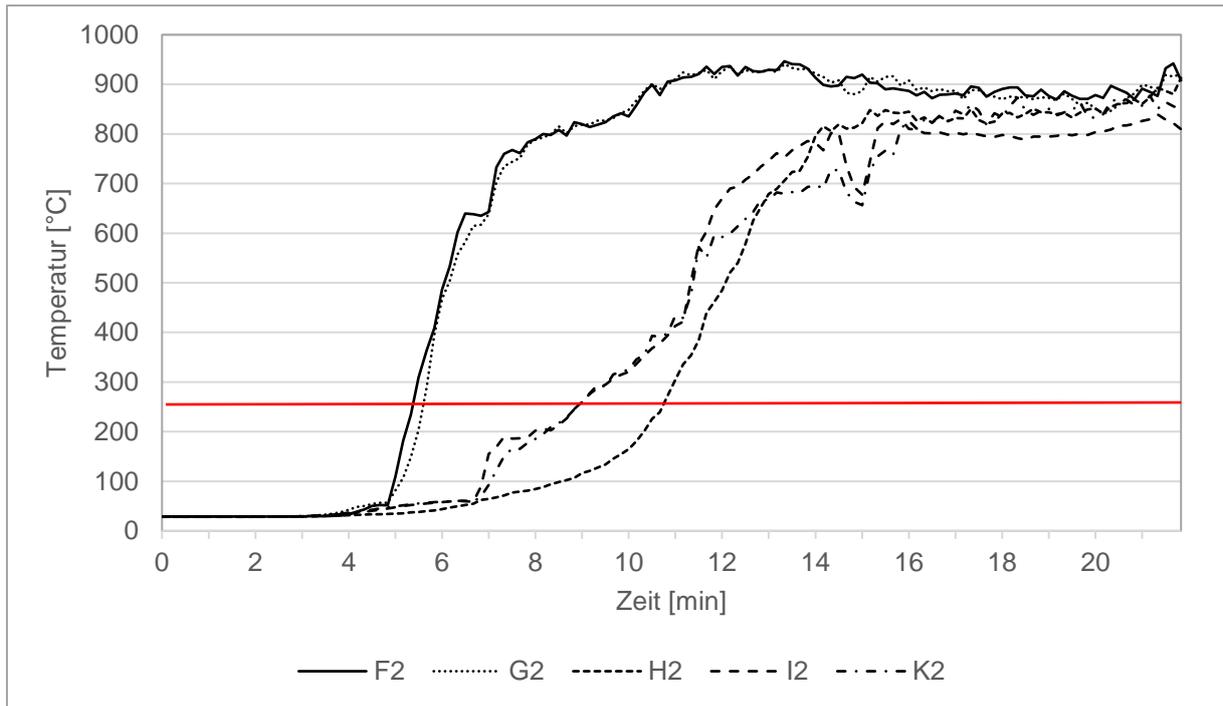


Abbildung 196: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (60 mm Steico geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

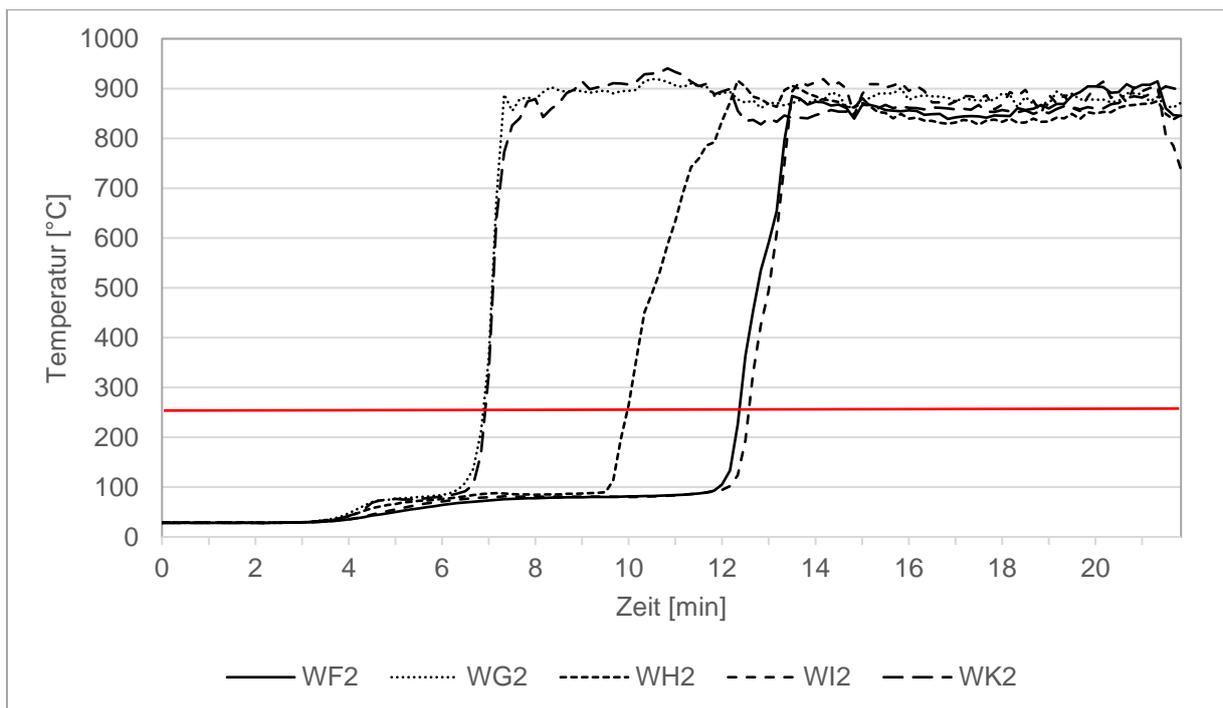


Abbildung 197: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (60 mm Steico geschützt durch Lattung) und Protect-Platte (60 mm Steico Typ M dry) in der Wand im Gefach 1

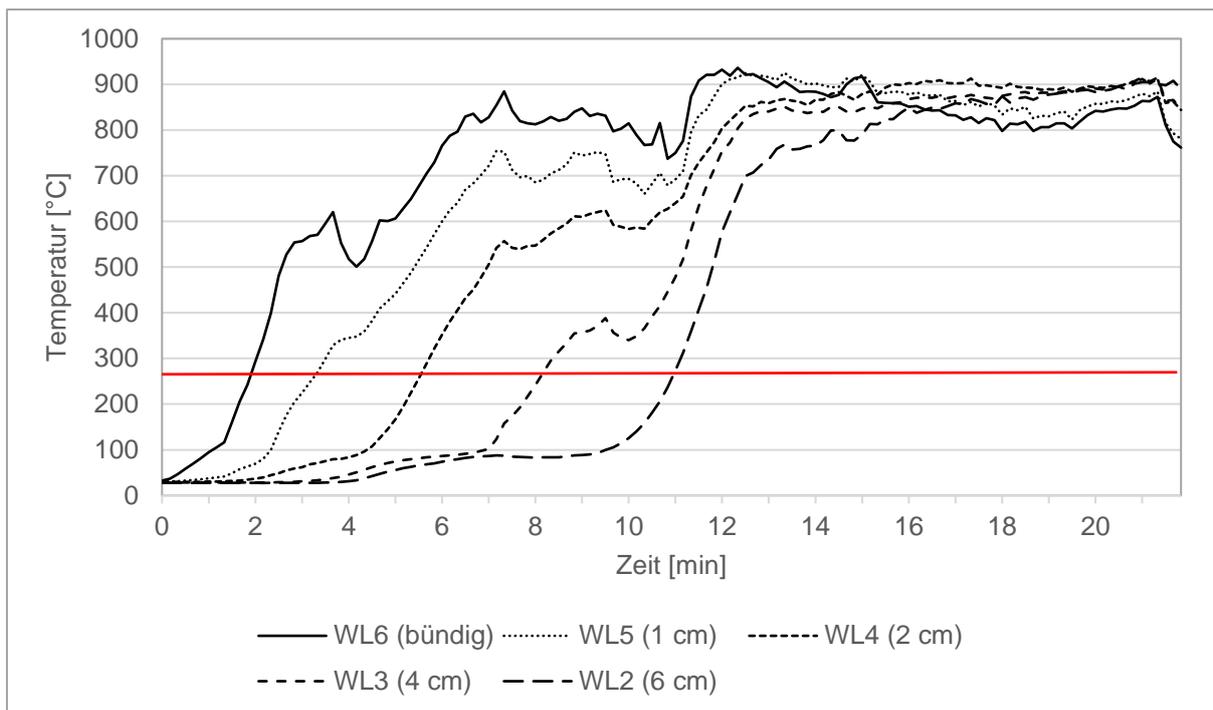


Abbildung 198: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 10-20 mm

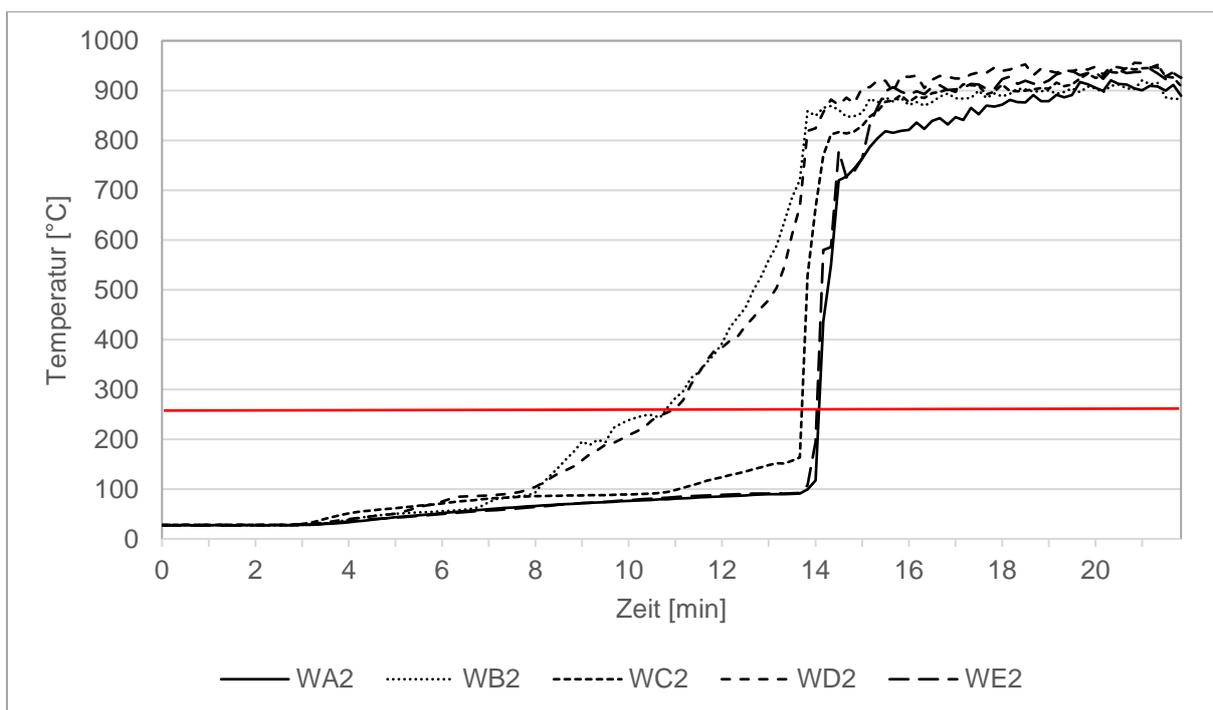


Abbildung 199: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (60 mm Steico geschützt durch Lattung) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

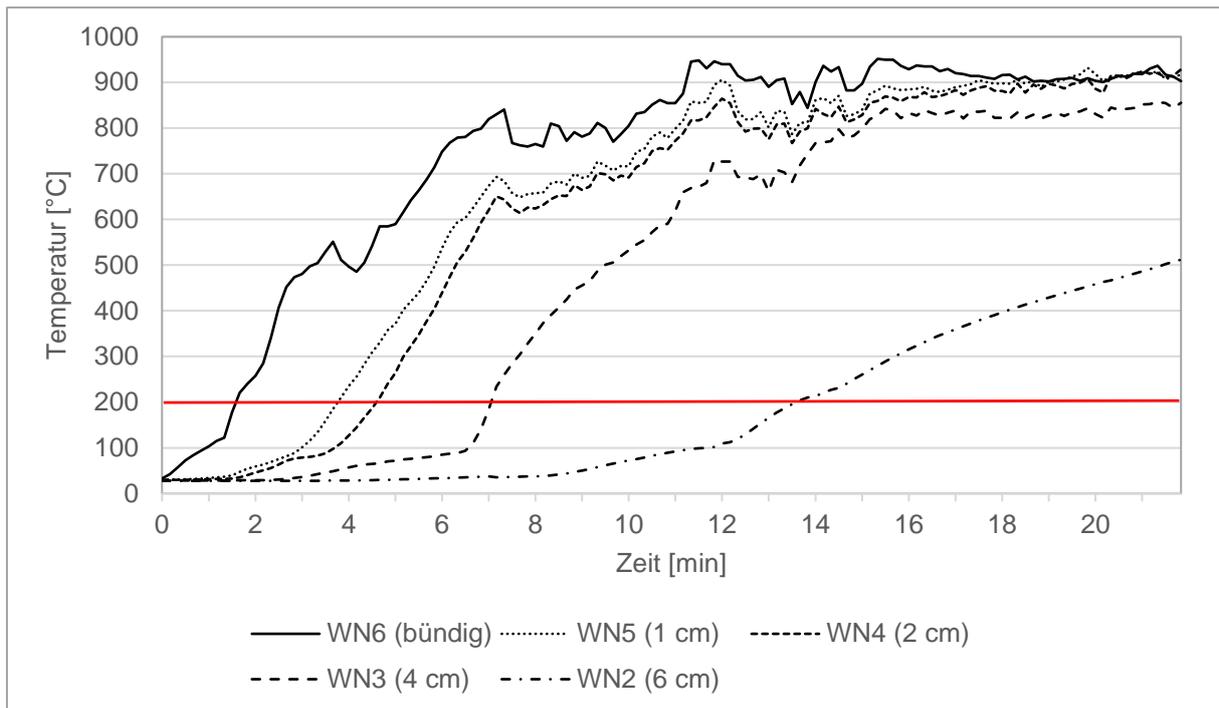


Abbildung 200: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 10-20 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1	Lattung	5. Minute	T > 270°C, Herausfallen von Teilen der Dämmung
Decke 2	Lattung	5. Minute	T > 270°C, Herausfallen von Teilen der Dämmung
Wand 1 Hinterlegt mit 60 mm Protect dry	Lattung	7. Minute	T > 270°C, Kippen der Dämmung und ca. 2 Minuten später Herausfallen der Dämmung
Wand 2	Lattung	10. Minute	T > 270°C, Kippen der Dämmung und ca. 2 Minuten später Herausfallen der Dämmung

Aussagen für 60 mm HWF:

Herausfallen der Dämmung trotz Schutz durch Lattung nach 5 Minuten an der Decke.

In der Wand sackt die Dämmung nach ca. 10 Minuten und bewirkt ein Kippen an der Wand oben. Dies führt zu einer Entzündung der dahinterliegenden Schicht. Eine Holzweichfaserdämmung, die mit einer 60 mm Protect-Platte Typ m dry hinterlegt ist, fällt im Gegensatz zur Dämmung, die mit einer Spanplatte hinterlegt ca. 3 Minuten vorher ab.

**Prüfkörper 6**

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
01:35	Durchzündung Decken
03:15	Öffnen Fuge D2 ca. 0,5cm
03:51	erste Risse (Glühend) D1 und D2
06:05	D1 größere Risse, D2 feinere Risse
08:26	W2 ro kleine Risse
11:44	W1 erste Risse vom Rand der GKB her, Querriss Wand 2
12:47	Fuge D2 ca 1,5cm
15:40	D1 Wölbung der Dämmung in der Mitte, D2 Fuge ca. 2cm
17:23	Durchreißen Wand 2
18:07	Herausbrennen aus Fugen und Risse in Platte 2
20:00	Mitbrand Ständer Decke, Abfallen W2 GK-Platte im unteren Bereich, deutlicher Brandbeitrag Dämmung W2
22:00	Abfallen GK Platte W2 komplett, Dämmung bereits deutlich von Ständer zurückgezogen, jedoch noch nicht ganz bis zur Spannplatte
24:19	nach vorne Kippen Dämmung
25:00	Herausfallen Dämmung W2 => Abdecken Gefach
26:44	deutlicher Rückzug D1 Dämmung vom Ständer, D2 etwas weniger, Fuge D2 ca. 5-7cm
28:30	Starke Strömung im Ofen
29:40	Platte reißt durch, Querrisse => Wand in sich verzogen
40:40	Bruch hinter Gipskarton (L), Risse $\leq 5$ cm
43:49	Bauchen Gipskarton
53:10	Gipskartonplatte mit Dämmung herausgefallen W1
55:00	Abbruch Brenner aus



Abbildung 201: Prüfkörper zu Prüfbeginn



Abbildung 202: Durchzündung der Decke (2. Minute)



Abbildung 203: Fugen in den Protect-Platten an der Decke öffnen sich (6. Minute)



Abbildung 204: Zünden der Fuge in der Protect-Plate (11. Minute)



Abbildung 205: Riss in GKB der Wand Gefach 2 (13. Minute)



Abbildung 206: vergrößerter Riss in der Wand Gefach 2 (16. Minute)



Abbildung 207: Holzwolle hinter Gipsplatte brennt (18. Minute)



Abbildung 208: Gipsplatte an der Wand Gefach 2 zum Teil abgefallen (20. Minute)



Abbildung 209: Brennen Holzweichfaser und der dahinterliegenden Spanplatte in der Wand Gefach 2 (23. Minute)



Abbildung 210: Herausfallen der Holzweichfaserdämmung in der Wand Gefach 2 (26. Minute)



Abbildung 211: Risse in GKP in der Wand Gefach 1 (35. Minute)



Abbildung 212: Brennen des Rahmen hinter GKP Wand Gefach 1 (44. Minute)



Abbildung 213: Rückzug der Protect-Platten vom Rahmen in der Decke (45. Minute)



Abbildung 214: vergrößerter Riss in GKP Wand Gefach 1 (51. Minute)



Abbildung 215: Durchbrand Decke (54. Minute)



Abbildung 216: Abfall Gipsplatte Wand Gefach 1 (54. Minute)



Abbildung 217: Versuchskörper nach Versuchsende



Abbildung 218: Wand nach Versuchsende



Abbildung 219: Decke nach Versuchsende

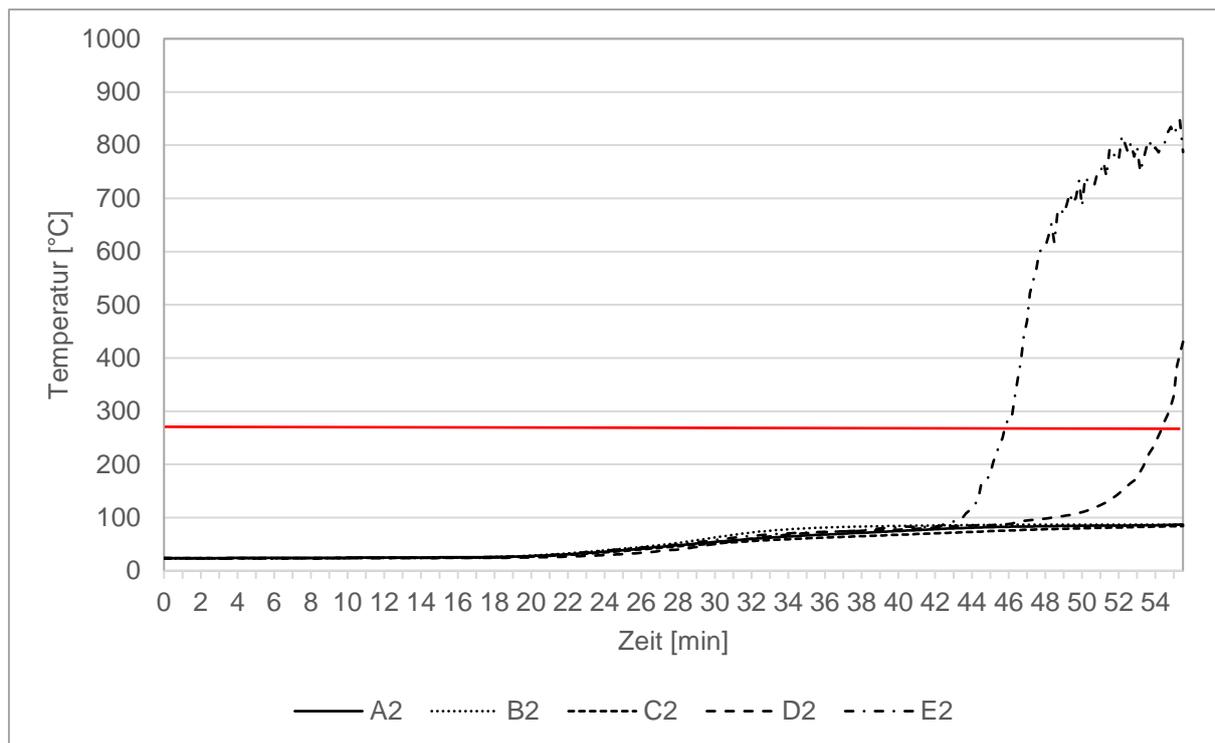


Abbildung 220: Temperaturverlauf zwischen Protect Typ M dry (100 mm Steico) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1 (Fuge im Bereich der Messstelle E und D)

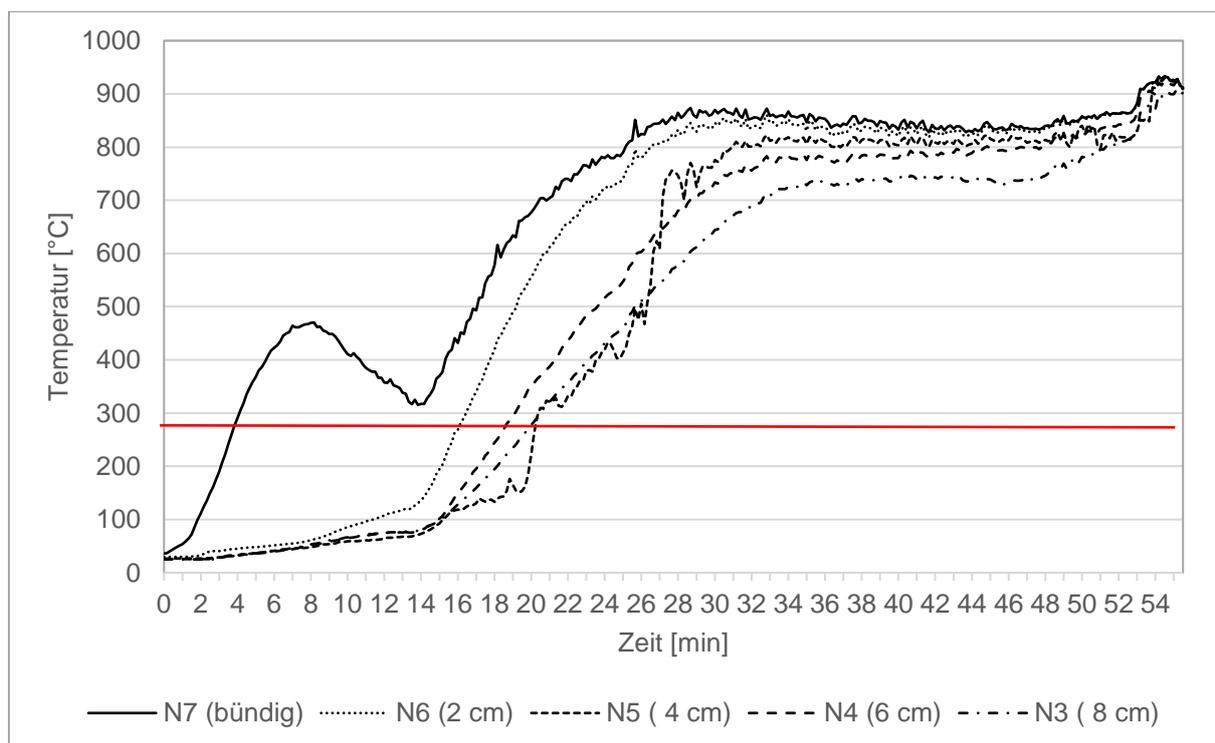


Abbildung 221: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

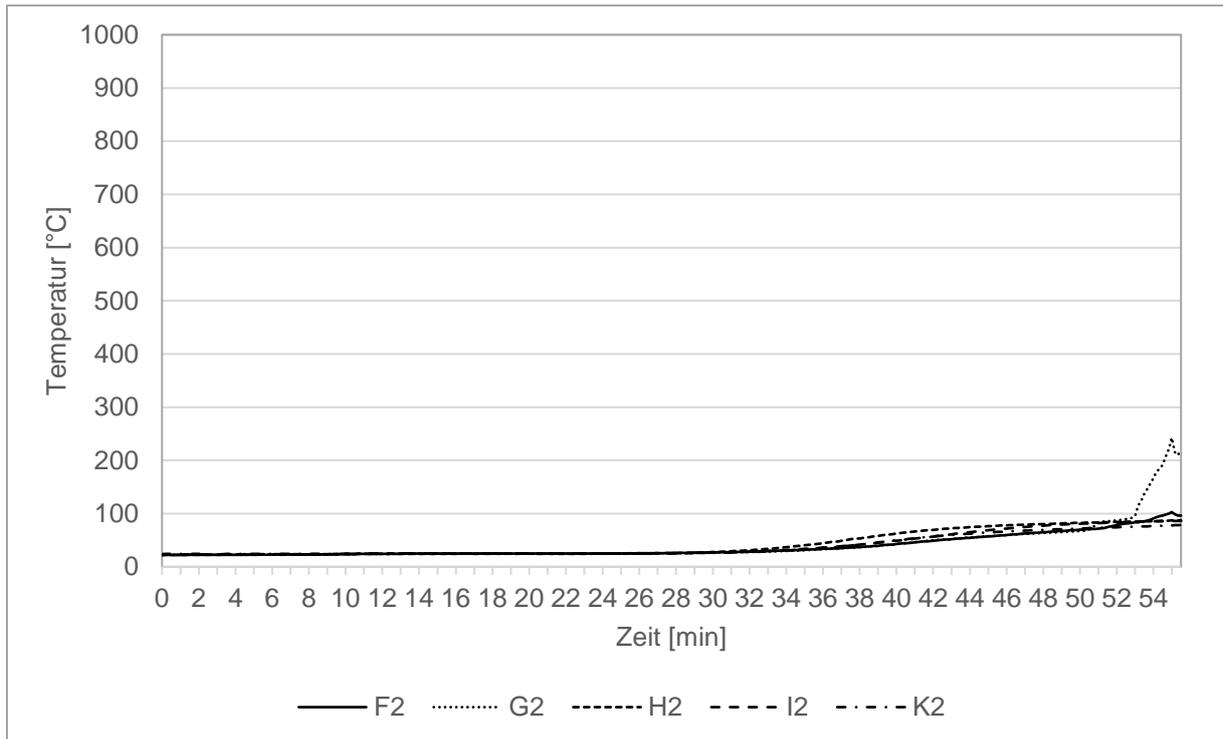


Abbildung 222: Temperaturverlauf zwischen Protect Typ M (100 mm Steico) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2 (Fuge im Bereich der Messstelle F und G)

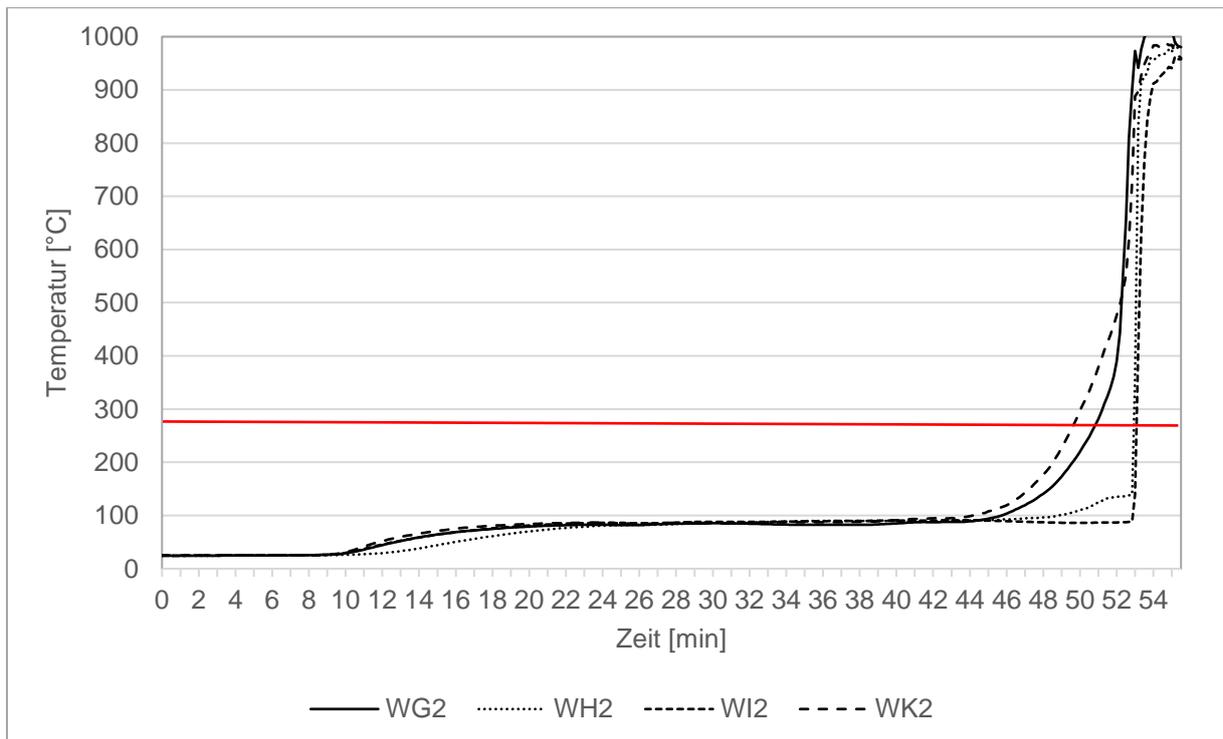


Abbildung 223: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico geschützt durch 18 mm GKP) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

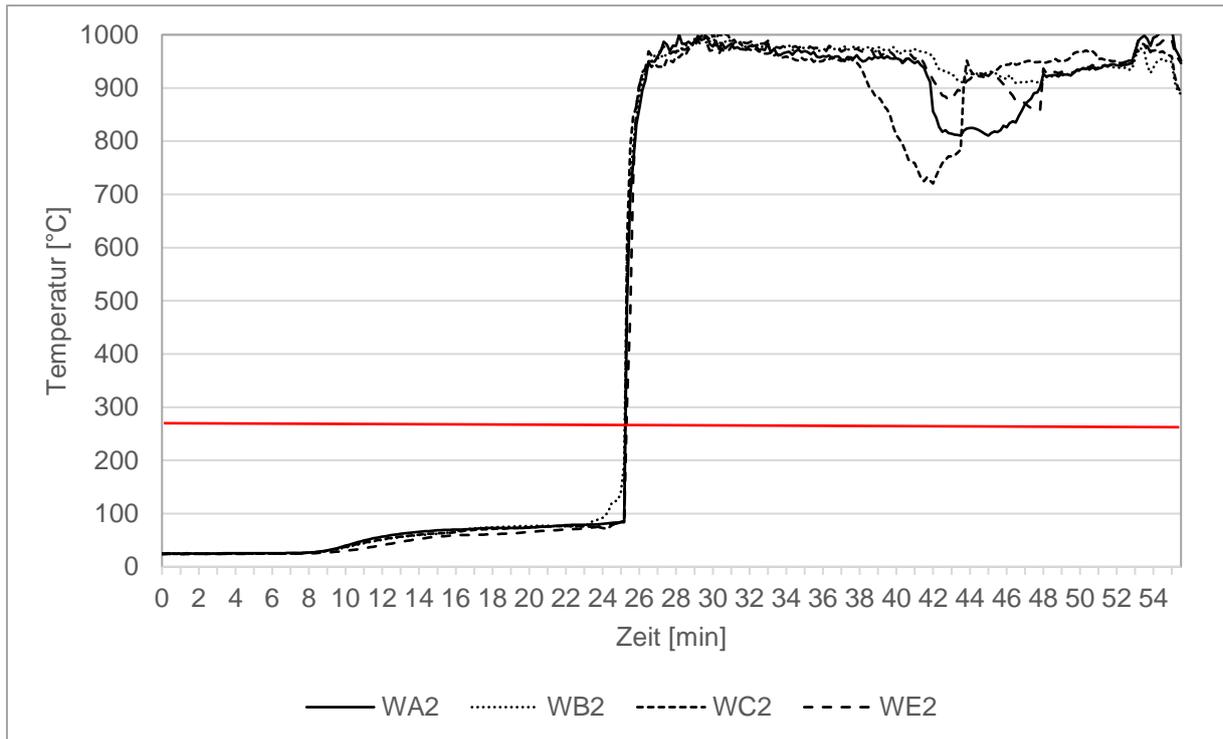


Abbildung 224: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico geschützt durch 12,5 mm GKB) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

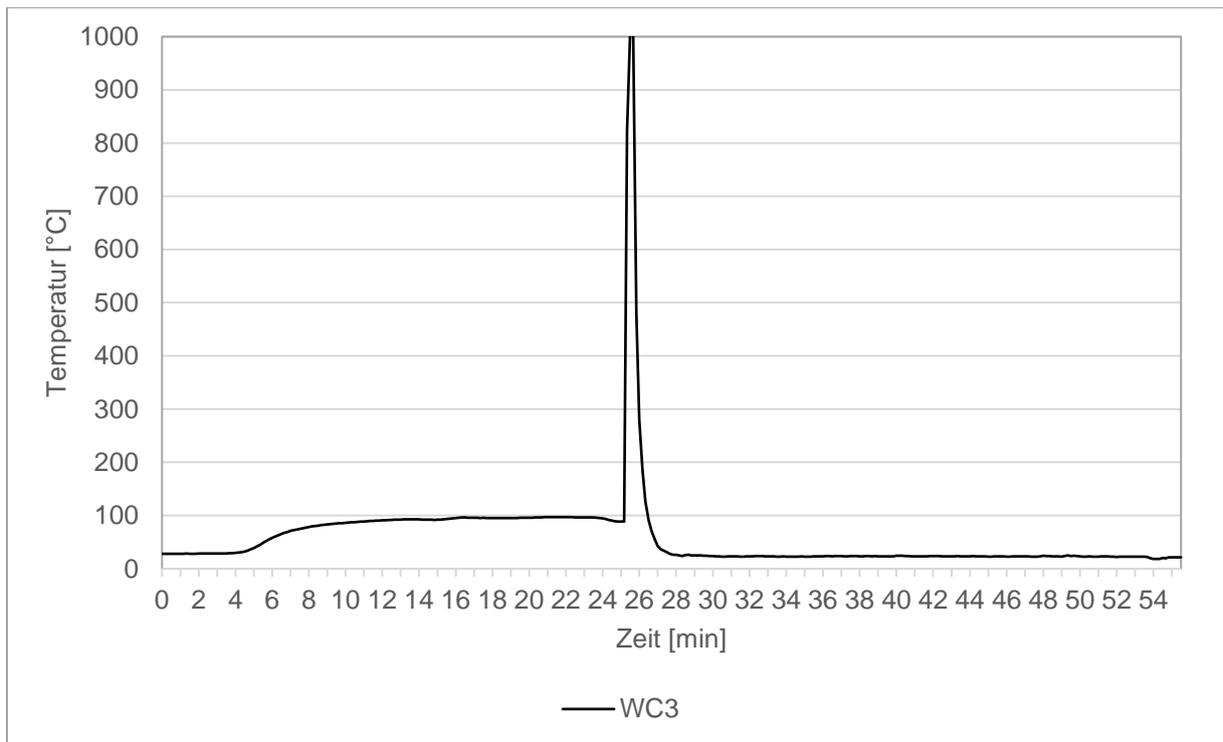


Abbildung 225: Temperaturverlauf auf halber Höhe der Holzweichfaserdämmung

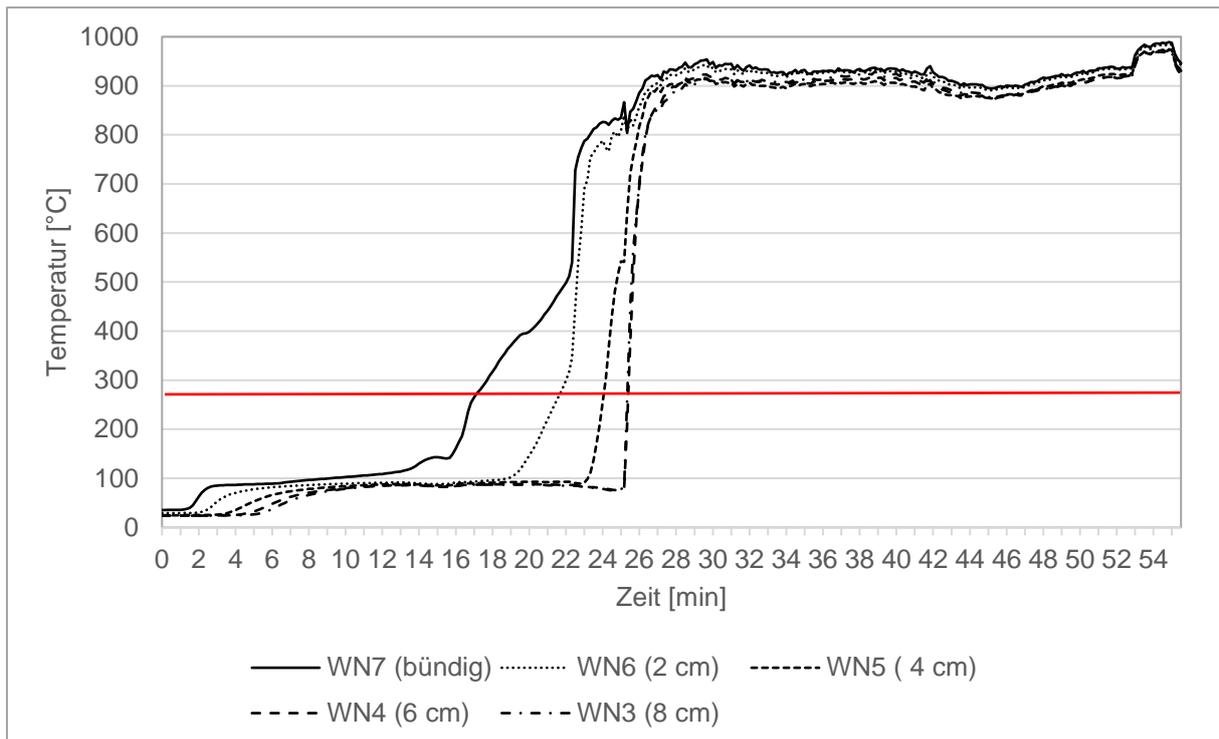


Abbildung 226: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1 Protect-Platte Typ M dry	-	Fuge 44. Minute Rand 20. Minute	$T > 270^{\circ}\text{C}$ ,
Decke 2 Protect-Platte Typ M	-	Fuge 55. Minute Rand ca.20. Minute	$T > 270^{\circ}\text{C}$ ,
Wand 1 120 mm HWF	Geschützt durch 18 mm GKP	49. Minute	$T > 270^{\circ}\text{C}$ , Herausfallen der Dämmung
Wand 2 120 mm HWF	Geschützt durch 12,5 mm GKB	25. Minute	$T > 270^{\circ}\text{C}$ , Herausfallen der Dämmung

Aussagen für 100 mm Protect-Platten:

Starkes Zusammenziehen der Platten bewirkt einen Brand der dahinter liegenden Schicht nach ca. 20 Minuten.

Aussagen für 120 mm Holzfaserplatte, geschützt durch Gipsplatte:

Herausfallen/Versagen der HWF ca. 3-5 Minuten nach Abfallen der 12,5 mm GKB. Bei Verwendung einer 18 mm GKF Versagt die HWF vor dem Abfallender Gipskartonfeuerschutzplatte.

**Prüfkörper 7**

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
00:00	Start
01:00	Entzündung Decke Gefach 1
01:15	Entzündung Decke Gefach 2
01:50	Schwarzfärbung Gipsplatten Wand
02:30	Aufreißen der Protectplatten an der Decke
03:00	Fuge Decke Gefach 2 von lh nach rh weitet sich
05:00	Gips Wand blättert ab, feinere vertikale Risse im Gefach 2 Decke, Risse wie "kochende" Erde im Gefach 1
07:43	Oberflächenrisse im Gipskarton
08:00	Protect Platte entzündet, Gefach 2 10 sec später als Gefach 1
09:30	Fuge ca 2 cm in Decke Gefach 2
11:30	Risse in Gipskartonwand Größer
14:30	Gipsplatte wölbt sich (Wind)
18:00	Tiefe Risse in Gipskarton Gefach 1 Wand
18:30	Durchzündung Gefach 1 und Gefach 2 Wand
25:30	Gipsplatte Wand Gefach 1 zum Teil abgefallen im oberen Bereich, Gipsfuge zwischen den beiden Gefachen ändert sich
28:30	Zweiter Teil der Gipsplatte Wand Gefach 1 ist abgefallen
30:00	Gipsplatte Wand Gefach 2 abgefallen
34:55	Nut-Feder Verbindung öffnet sich W2 Im s. Foto
36:21	W2 Beplankung sichtbar
39:00	Fuge Wand Gefach 2 in Protect geöffnet
45:00	Dämmung löst sich von Ständer im Gefach 2 Wand
47:30	Oberer Teil Protect Wand Gefach 2 rausgefallen
47:38	Weiche Dämmung Gefach 2 Wand herausgefallen im oberen Teil
50:00	Brenner aus, damit ETK eingehalten, Stecker WC3 und WH3 raus, da Gipsplatte darauf
52:00	Decke Gefach 1 und 2 fällt herunter
53:00	Decke fällt runter
54:00	Brenner ganz aus
58:00	W1 Steico dry t lo und mo abgefallen
59:41	Flex W1 lo und lm zusammengezogen, Ständer links frei
01:02:07	Abbrechen, Brenner bereits aus, Wand links Abbruchkriterium im Mittel



Abbildung 227: Decke entzündet sich (1. Minute)



Abbildung 228: Schwarzfärbung der Gipsplatte (3. Minute)



Abbildung 229: Rissbildung in den Gipsplatten der Wand (8. Minute)



Abbildung 230: Öffnen der Fuge in den Protect-Platten der Decke hier Gefach 2 (9. Minute)



Abbildung 231: Entzündung hinter den Rissen der Gipsplatten an den Wänden (19. Minute)



Abbildung 232: Abfallen von Teilen der Gipsplatte in der Wand Gefach 1 (28. Minute)



Abbildung 233: Abfallen des oberen Teiles der Gipsplatte an der Wand des Gefachs 2 (35. Minute)



Abbildung 234: Abfallen der unteren Teile der Gipsplatten und große Fuge in der Protect Typ H dry Platte (40. Minute)



Abbildung 235: Herausfallen der Holzweichfaserdämmung aus der Wand Gefach 2 (52. Minute)



Abbildung 236: Reste des Versuchskörpers nach Versuchsabbruch

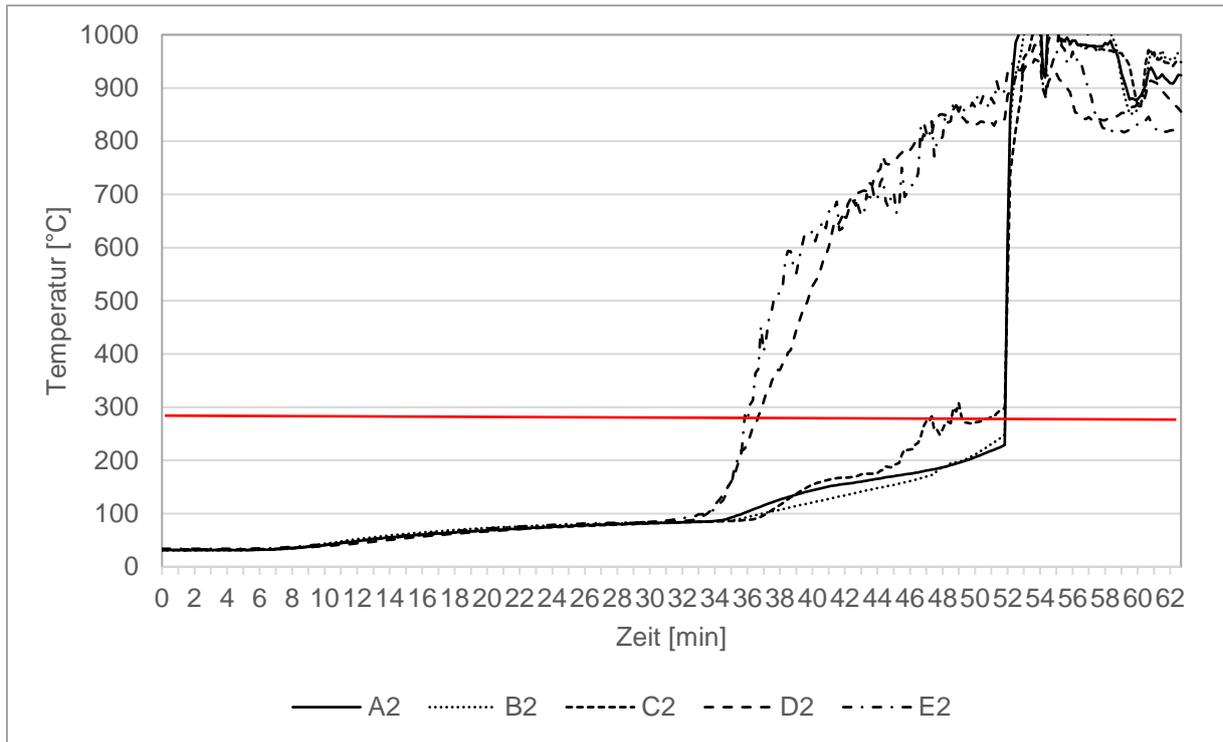


Abbildung 237: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (60 mm Steico Typ M dry) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

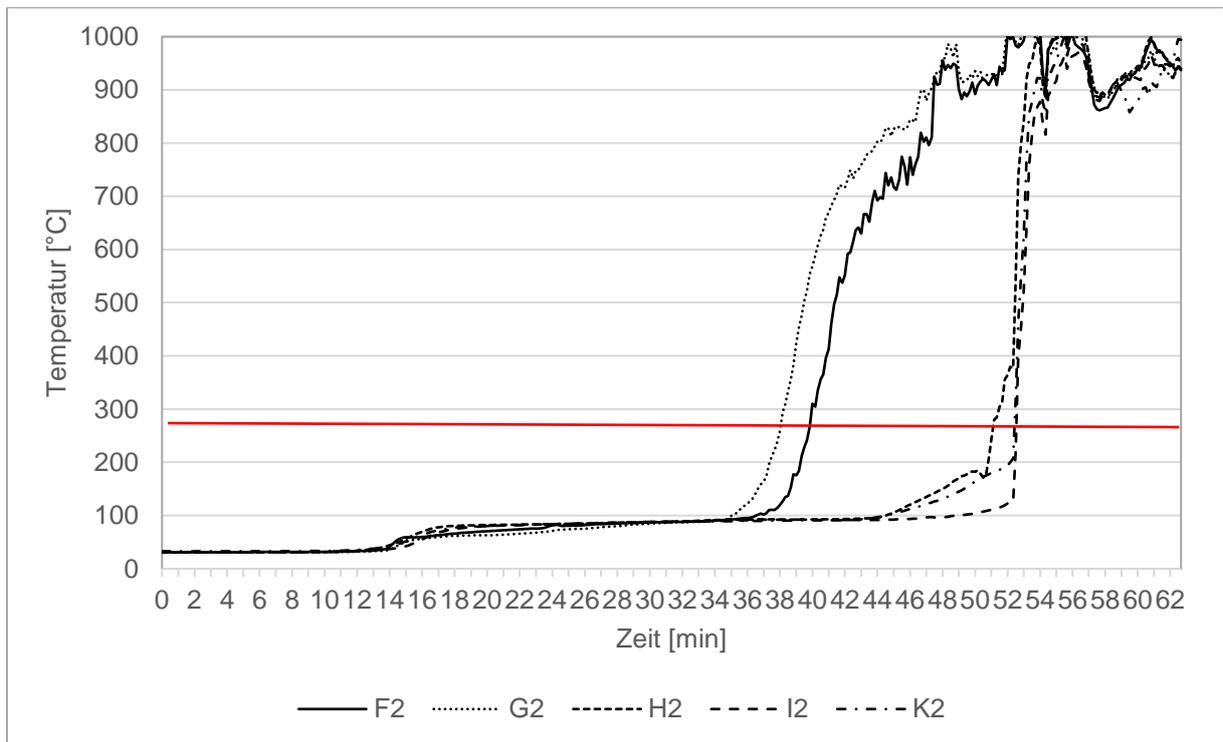


Abbildung 238: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (60 mm Steico Typ M) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

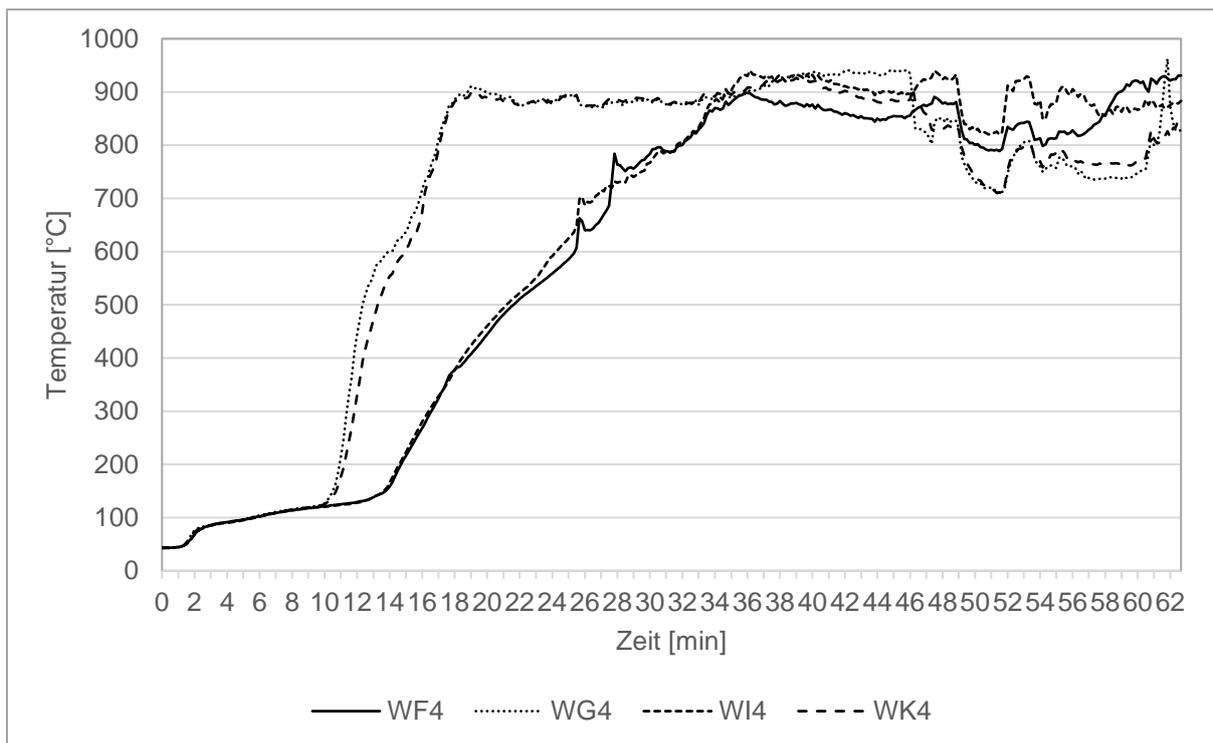


Abbildung 239: Temperaturverlauf zwischen Gipskartonplatte (12,5 mm GKB Typ A) und Protect-Platte (60 mm Steico Protect Typ M) in der Wand im Gefach 1

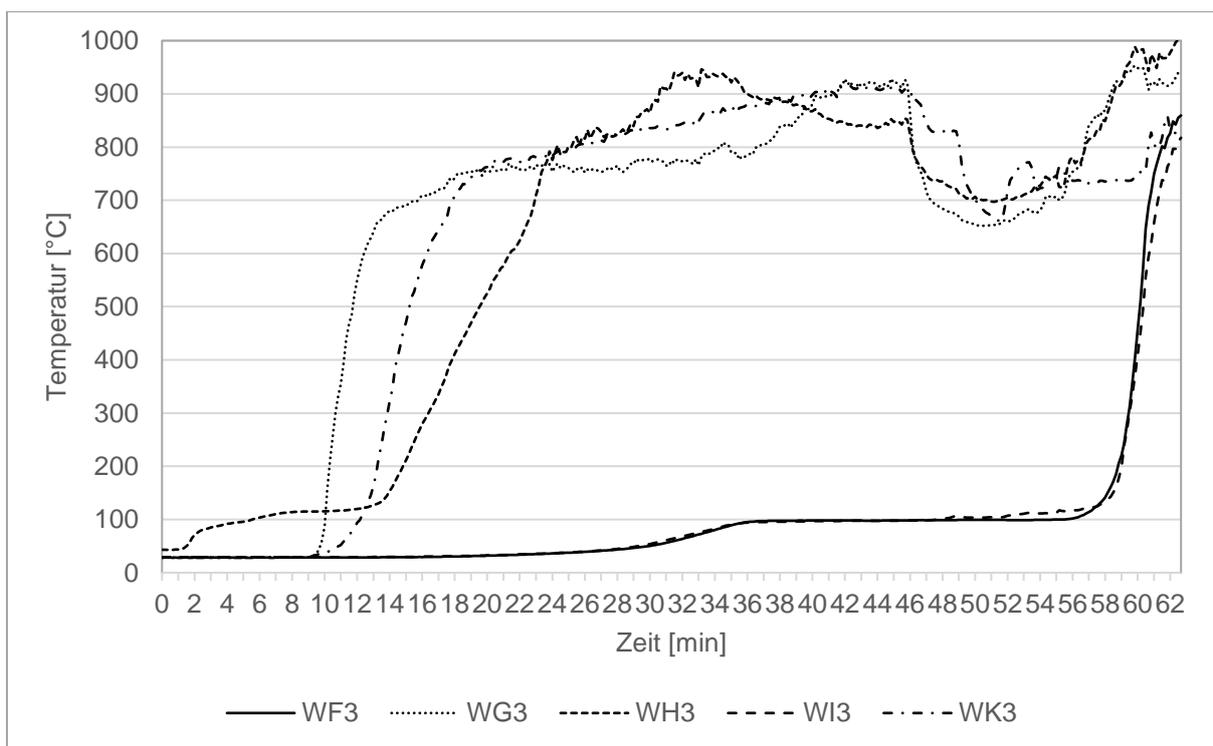


Abbildung 240: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (60 mm Steico Typ M) und Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 1

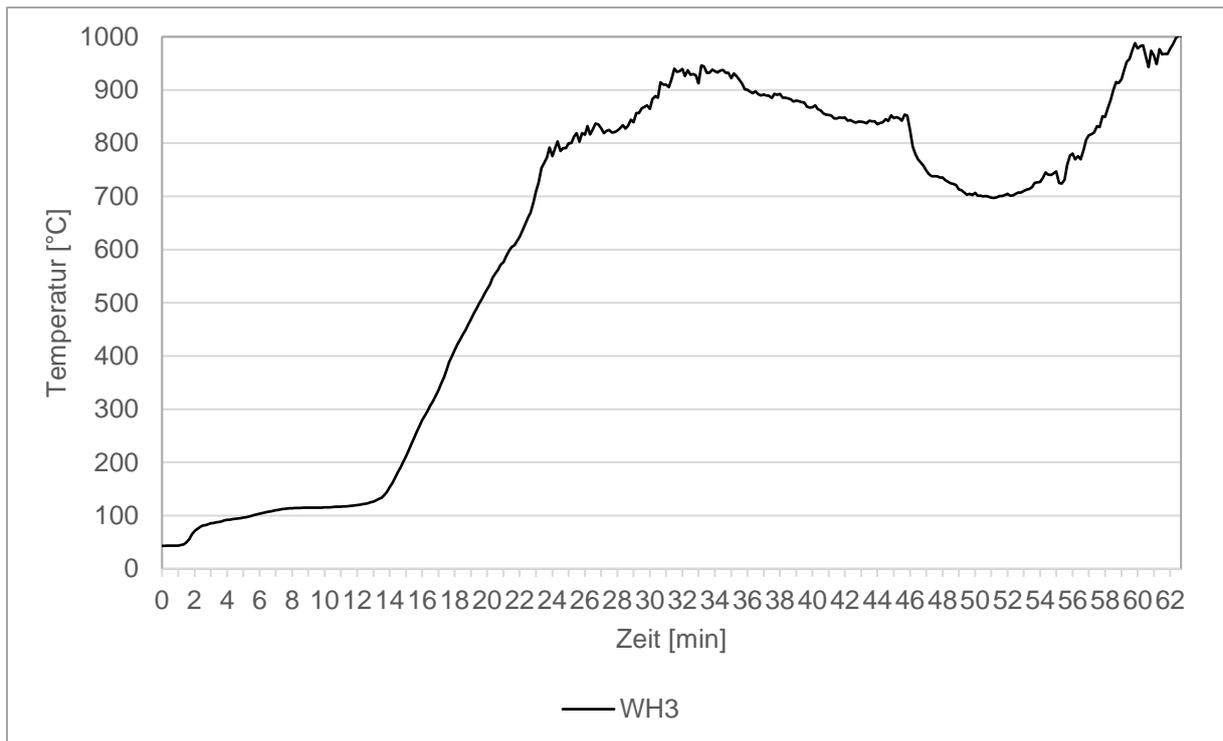


Abbildung 241: Temperaturverlauf auf halber Höhe (Tiefe von 60 mm) der Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 1

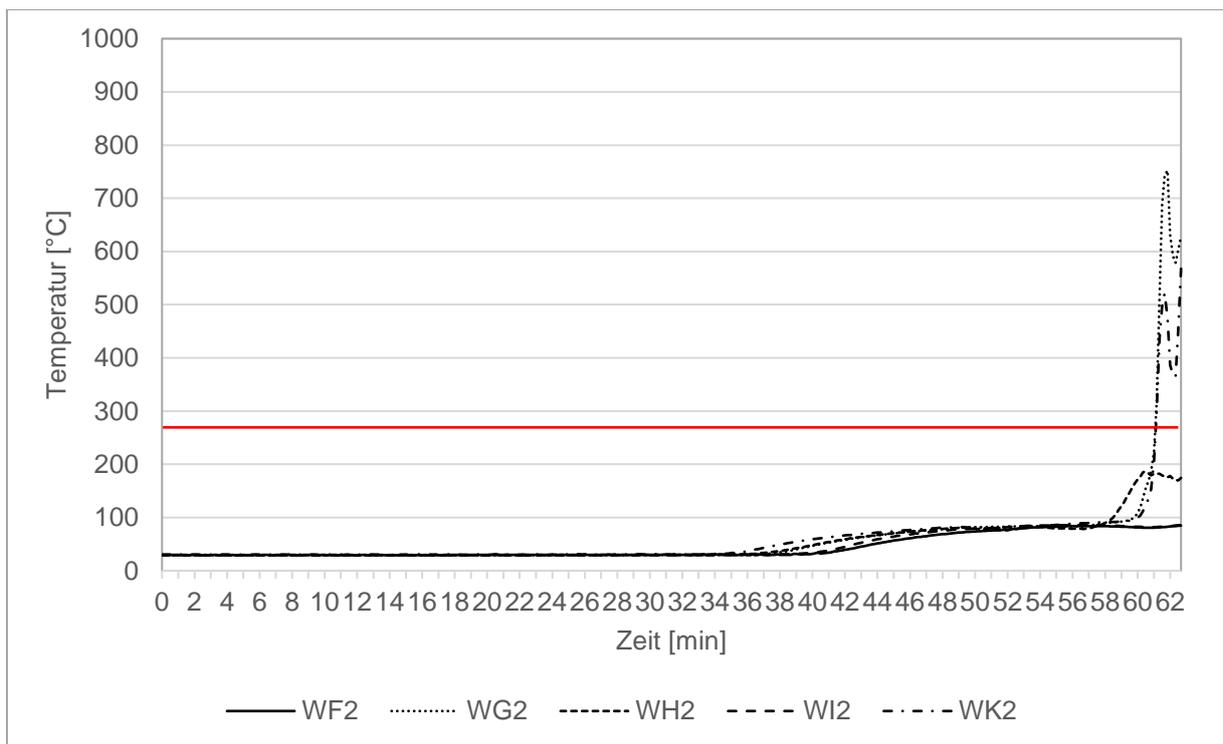


Abbildung 242: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

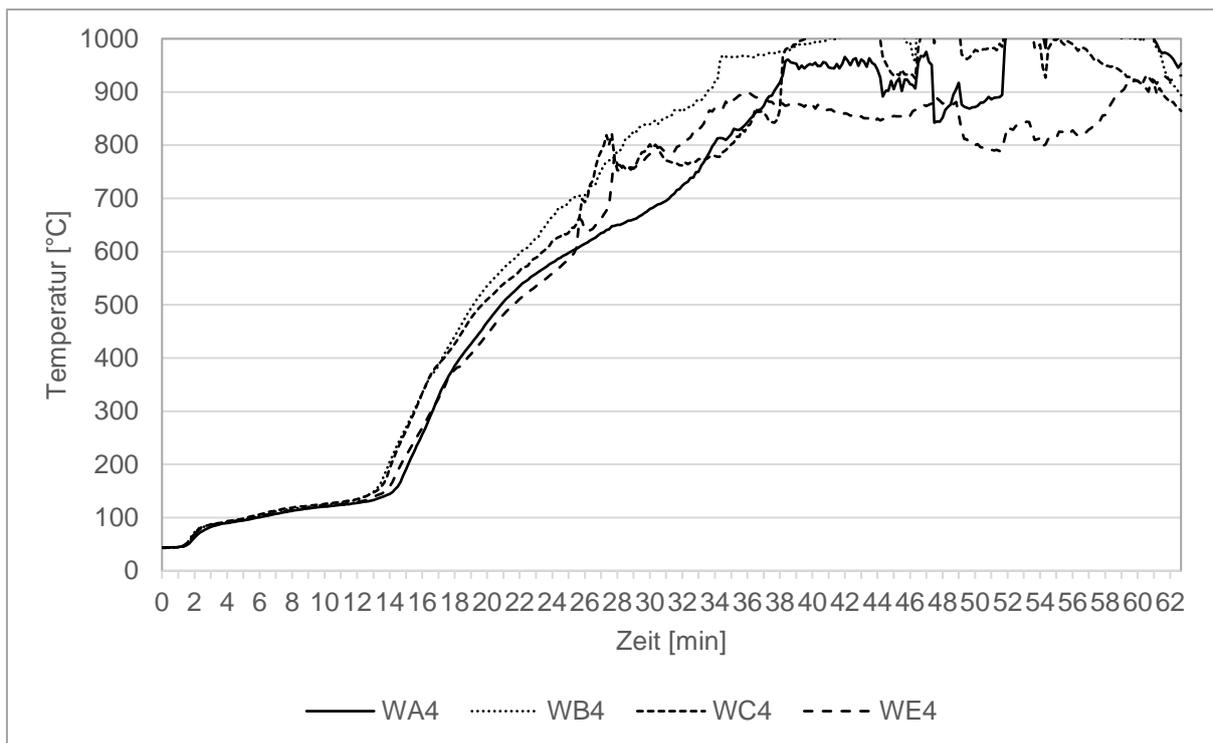


Abbildung 243: Temperaturverlauf zwischen Gipskartonplatte (12,5 mm GKB Typ A) und Protect-Platte (60 mm Steico Typ H dry) in der Wand im Gefach 2

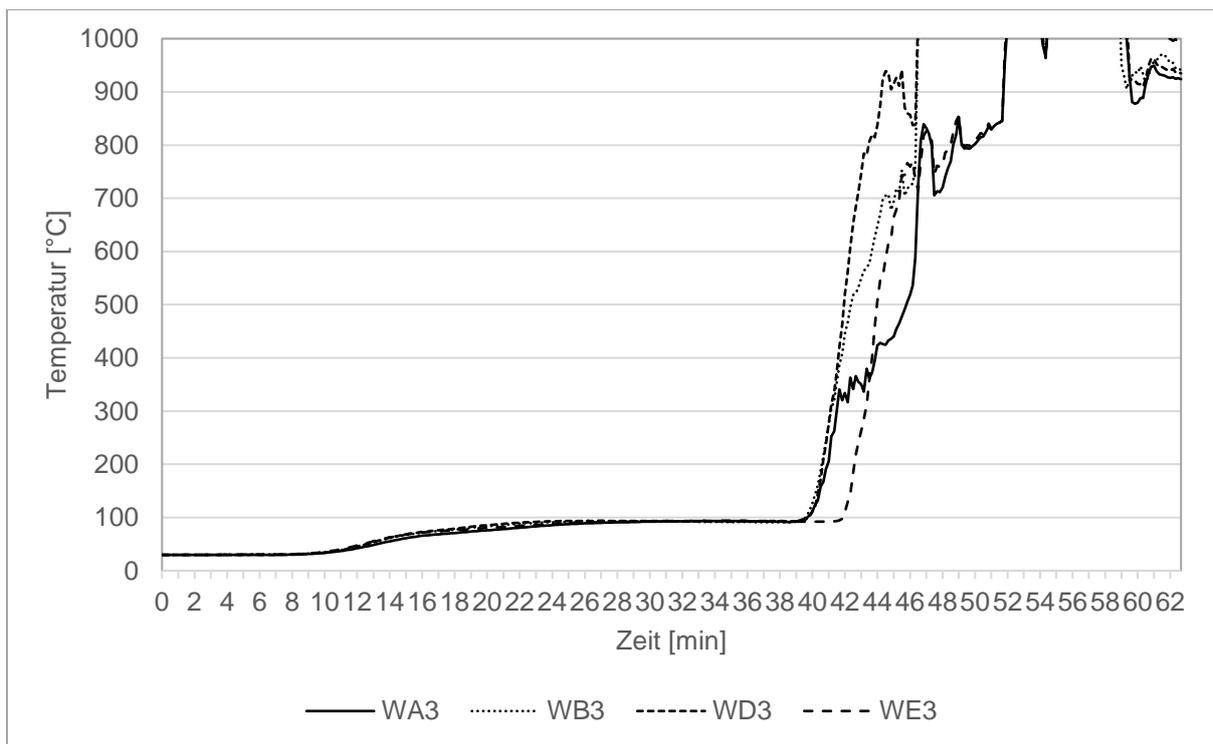


Abbildung 244: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (60 mm Steico Typ H dry) und Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 2

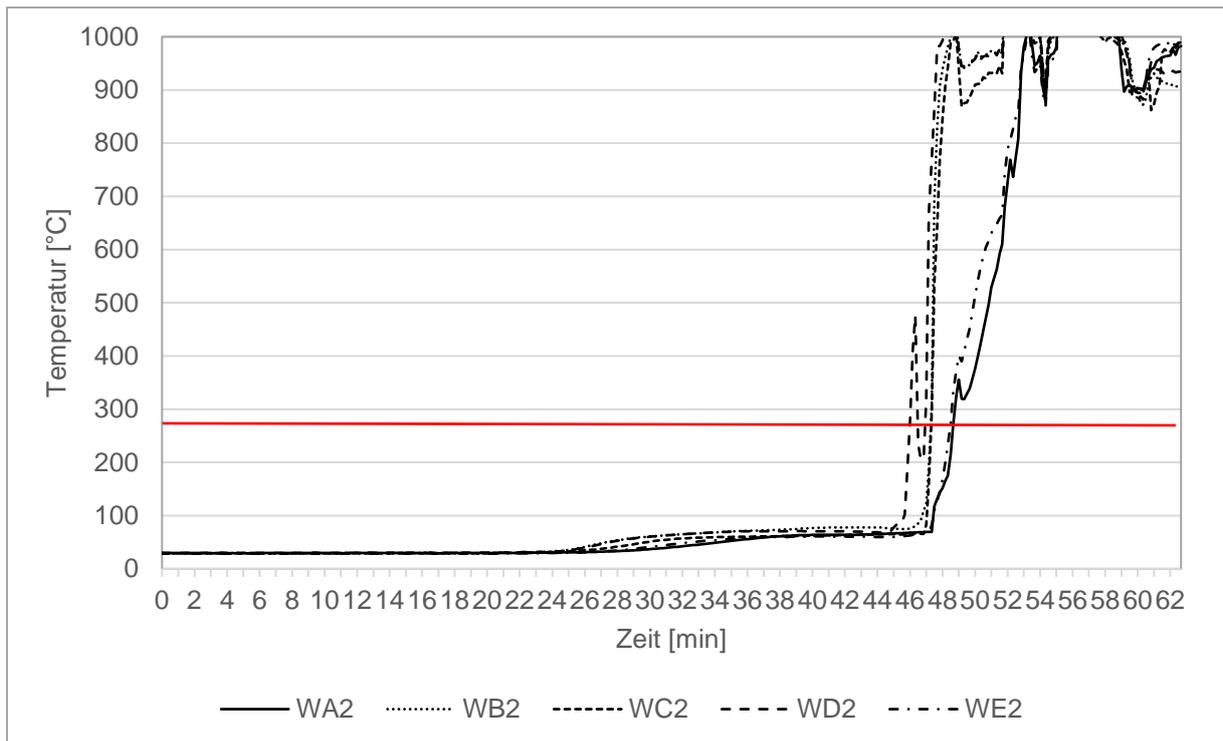


Abbildung 245: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

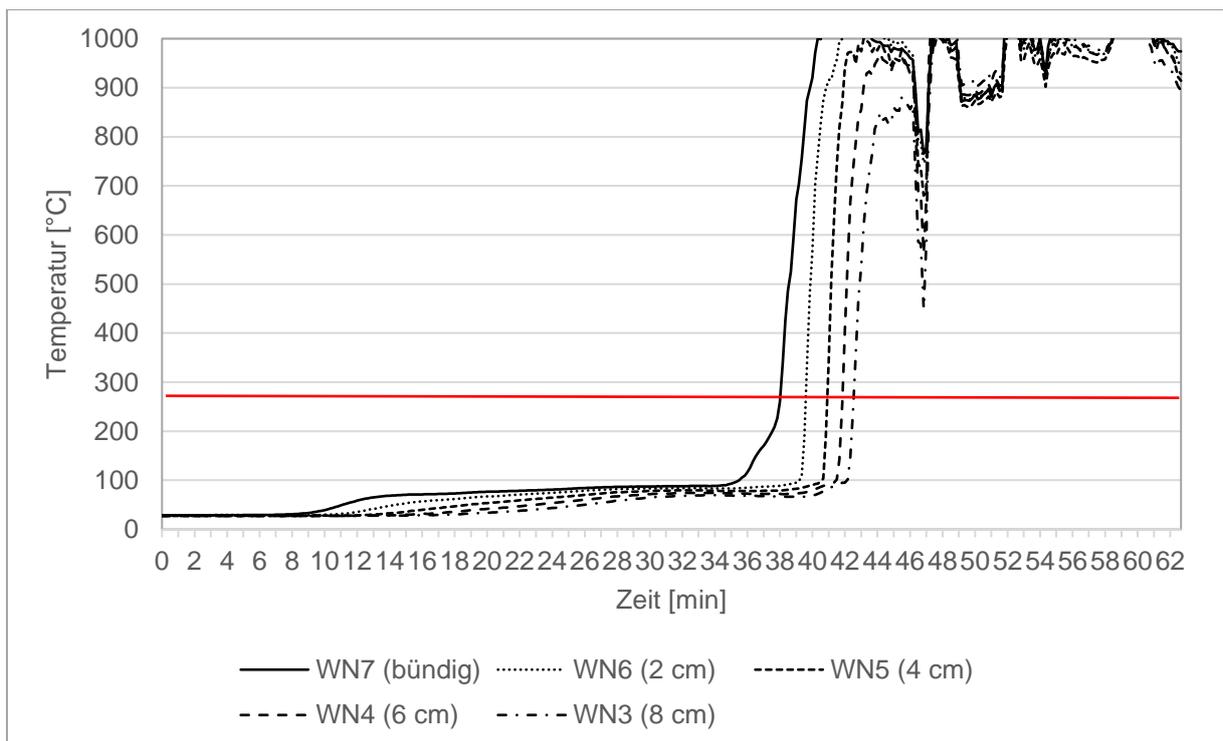


Abbildung 246: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1 60 mm Protect Typ M dry	ungesichert	35. Minute (Nut-Feder)	T > 270°C
		52. Minute	T > 270°C
Decke 2 60 mm Protect Typ M	ungesichert	37. Minute (Nut-Feder)	T > 270°C
		52. Minute	T > 270°C
Wand 1 120 mm Steico Flex	geschützt durch 60 mm Protect Typ M + 12,5 mm GKB Typ	60. Minute	T > 270°C Abfallen der Protect-Platte in 58. Minute, Flex-Matte hat sich vom Ständer zurückgezogen Gipsplatte fällt nach ca. 25 Minuten ab
Wand 2 120 mm Steico Flex	geschützt durch 60 mm Protect Typ M dry + 12,5 mm GKB Typ A	46. Minute	T > 270°C Abfallen der Protect-Platte in 46. Minute (in ca. 35. Minute öffnet sich die Nut-Feder-Verbindung), Flex-Matte fällt ebenfalls in 46. Minute ab Gipsplatte fällt nach ca. 30 Minuten ab.

Aussagen für 60 mm Protect-Platten:

Im Bereich der Nut-Feder-Verbindung versagt die Platte bereits nach 35-37 Minuten. In der Fläche wird das Ende der Schutzzeit erst nach 52 Minuten erreicht.

Aussagen für 120 mm Holzweichfaserplatte, geschützt durch 60 mm Protect-Platte und Gipsplatte:

Sofern eine Nut-Feder-Verbindung in der Protect-Platte vorliegt, versagt die Platte ca. 14 Minuten vor einer Platte ohne Stoß. Das Ende des Schutzkriteriums der dahinterliegenden 120 mm dicken Holzweichfaserplatte tritt maximal 2 Minuten nach dem Abfallen der Protect-Platten ein.

## Prüfkörper 8

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
01:06	Entzündung Zellulose, W1 im Spalt oben => Mitbrennen Ständer
04:21	Bauchen Hasendraht Decke aber Zellulose nicht
04:48	erstes Abfallen W1 Rand oben
05:44	große Risse W1
08:17	W1 Rähm dann komplett freiliegend
10:02	Weißfärbung Zellulose
10:46	W2 und D2 deutlich kleinere Risse als W1 und D1, Ih andere Dämmung oder wegen Brenner, Folie verblieb lang und Hasendraht auf W2 und D2 blieb deutlich länger
12:28	Spalt W1 ca. 10cm
14:24	D1 noch Eigenspannung und Klemmwirkung => noch nicht im Hasendraht
15:22	Herausfallen W1 oberer Teil, Beplanken von unten
17:06	W2, keine Belastung Hasendraht => Keine Bauchung
17:50	Teilweise bröckeln D1 => Stücke ca. 20x20
19:25	Bauchen W2 (Stärker oben als unten)
20:39	D1 hängt voll in Lattung, D2 hängt noch nicht in Hasendraht
22:05	unterer Bereich W1 steht nach wie vor gut
22:48	Teilweise Versagen Lattung Decke
26:48	Weiches Abfallen D1 von Brocken und Lattungsteilen lu => D1 Zellulose hängt unter Eigenspannung
30:22	längs mittig aufbrechen D1 => langsames Herausfallen=> noch gehalten von Lattenresten am Rand
31:30	Versagen D1 => Dämmung raus => Abdecken D1
32:00	Brenner aus, Vollbrand im Ofen
34:00	W2 und D2 noch nicht in Hasendraht
35:00	Durchbrand am Ständer Wand hinten => WC3 kurz raus um abzusichern
38:09	Wand 1 Dämmung unterer Teil steckt noch
38:49	tiefe Risse ca. 10 cm in W2 und D2 aber noch Eigenspannung => nicht im Hasendraht
40:33	langsames Herausfallen D2 vorne
43:29	Risse in D2 und W2 werden deutlich tiefer und weiter, jetzt deutlich schnellere Entwicklung
44:22	erstes Auflegen auf Hasendraht D2 vorne
45:00	Sichtbarer Mitbrand Ständer => Rückzug Zellulose Wand 2
48:00	Versagen Decke Kriterium aber Dämmung noch unter Eigenspannung
51:00	Mantelthermoelement WC3 raus und wieder rein wegen Durchbrand, Decke 2 vielleicht auch Thermoelemente kaputt => Ständer ziemlich durchgebrannt
01:02:07	Decke liegt teilweise im Hasendraht
01:06:00	deutlicher Rückzug vom Ständer W2 rundum Absinken, leichte Ablagerung von Stücken im Hasendraht
01:07:23	Ofen: Brand hinter Dämmung
01:08:00	D2 liegt voll im Hasendraht
01:14:00	deutliches Knacken im Holz
01:15:00	Abbrechen durch Brenner aus



Abbildung 247: Prüfkörper zu Prüfbeginn



Abbildung 248: Abschmelzen der Dampfbremse und Brennen des Rahmens der Wand (Gefach 1) im Bereich der Fuge durch schlechte Verdichtung der Zellulose beim Einblasen (1. Minute)



Abbildung 249: Bauchen des Hasendrahtes an der Decke im Gefach 2 (4. Minute)



Abbildung 250: Kein weiteres Brennen der Fuge im Gefach 1 der Wand (7. Minute)



Abbildung 251: Bauchen des Hasendrahtes im Gefach 2 der Wand (10. Minute)



Abbildung 252: Weiteres Zusammensacken der Dämmung und erneutes Brennen der dahinterliegenden Spanplatte in der Wand Gefach 1 (12. Minute)



Abbildung 253: Dämmung in der Wand (Gefach 1) zum Teil herausgefallen, Spanplatte dahinter brennt (15. Minute)



Abbildung 254: Lattung an der Decke (Gefach 1) nahezu abgebrannt (22. Minute)



Abbildung 255: Zellulose an der Decke (Gefach 1) bröckelt und glimmt (29. Minute)



Abbildung 256: Durchzündung, da die Zellulose in der Decke (Gefach 1) herausgefallen ist (33. Minute)



Abbildung 257: Brennen der Zellulose an der Wand (Gefach 1) (60. Minute)



Abbildung 258: Zellulose löst sich vom Ständer an der Wand (Gefach 2) (55. Minute)



Abbildung 259: Brennen am oberen Rahmen der Wand (Gefach 2) (63. Minute)



Abbildung 260: Prüfkörper nach Versuchsende

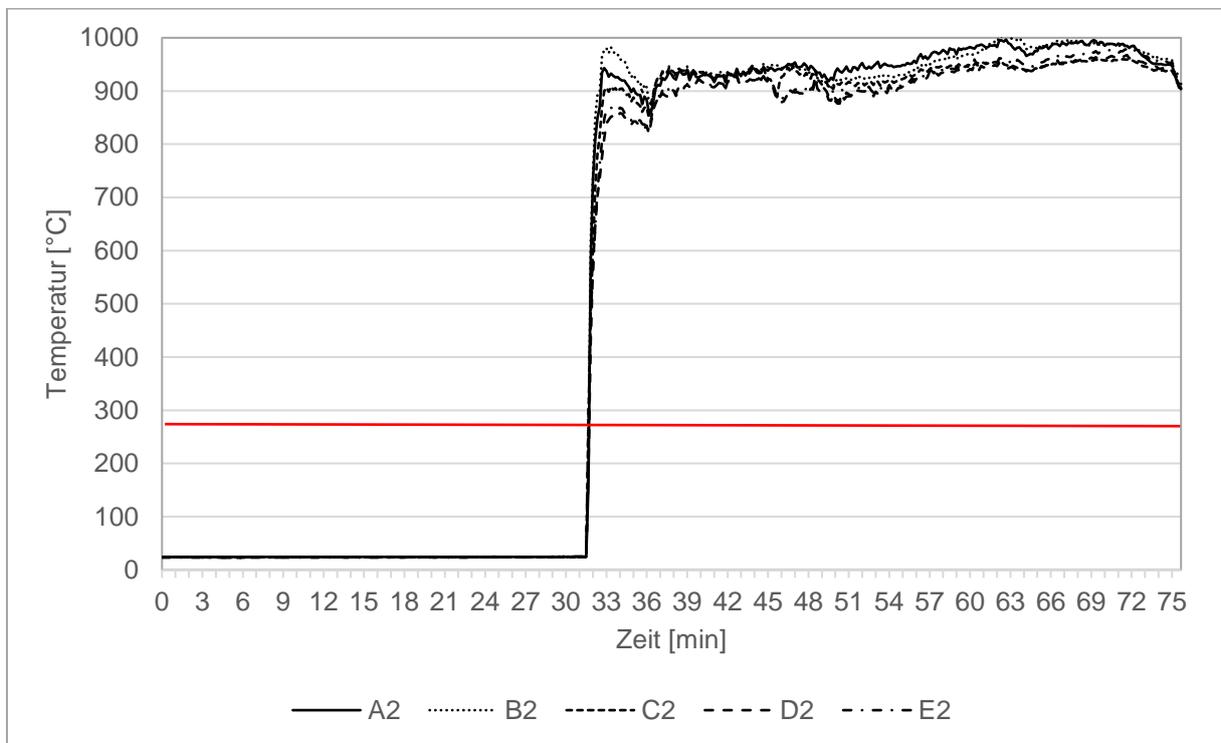


Abbildung 261: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (240 mm Steico Floc- gesichert durch Lattung) und Spanplatte in der Decke im Gefach 1

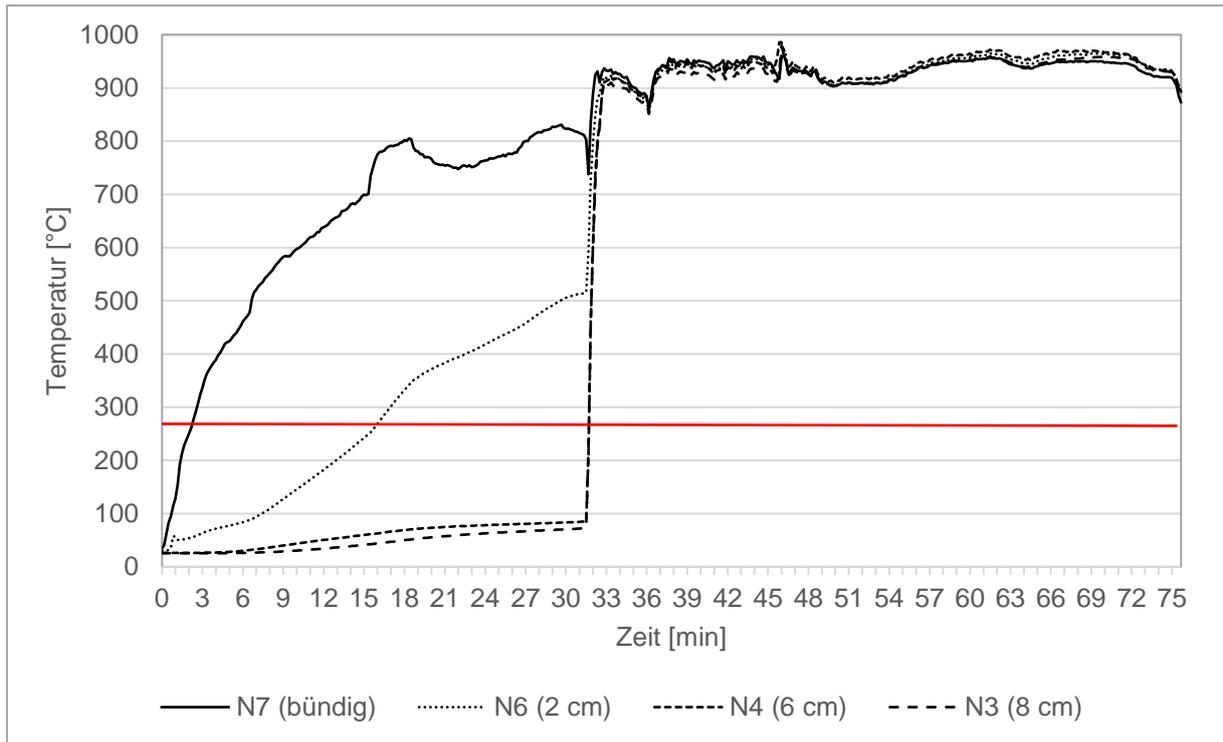


Abbildung 262: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von ca. 20 mm

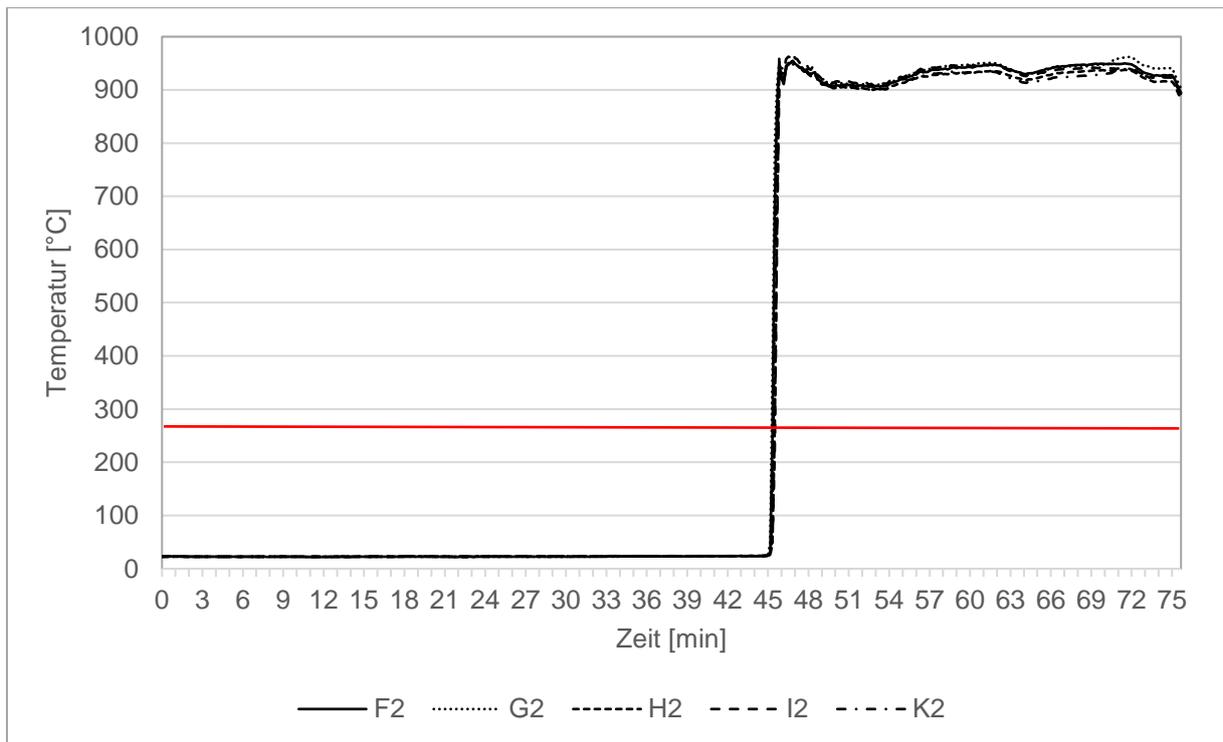


Abbildung 263: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (240 mm Isocell Zell- gesichert durch Hasendraht) und Spanplatte in der Decke im Gefach 2

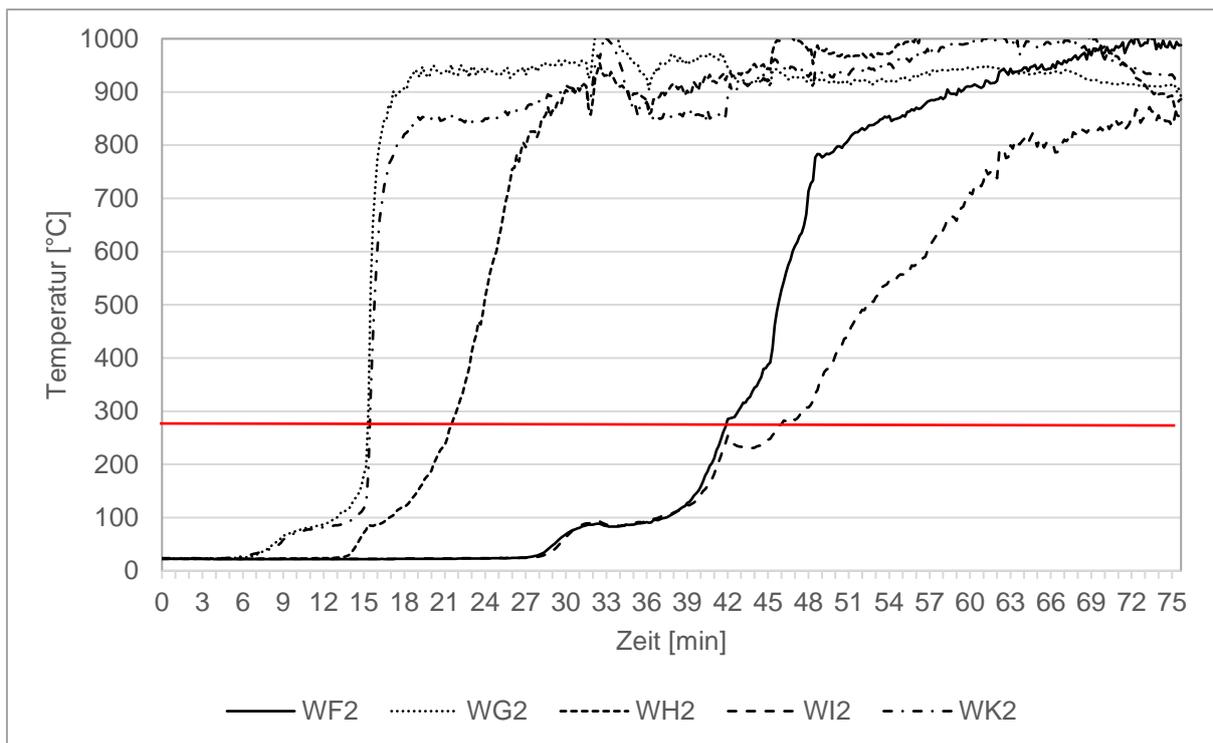


Abbildung 264: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (240 mm Steico Floc) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

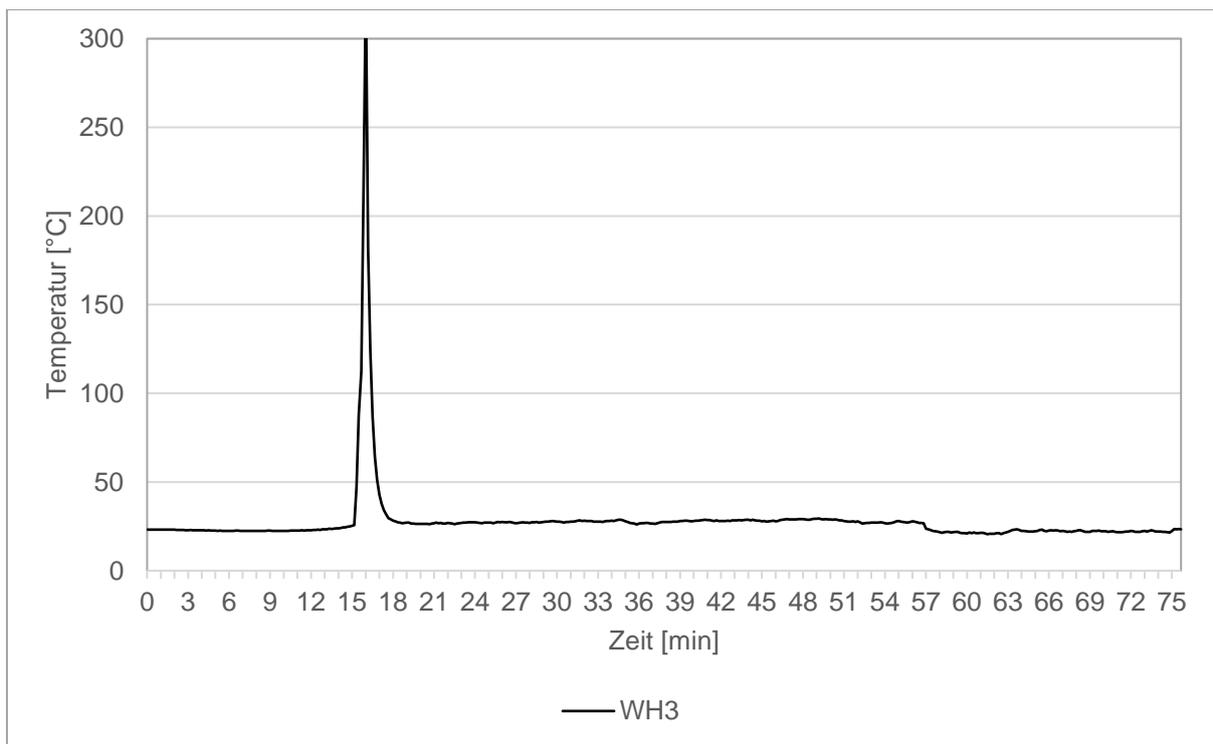


Abbildung 265: Temperaturverlauf auf mittlerer Höhe in der Zellulose (120 mm) in der Wand im Gefach 1

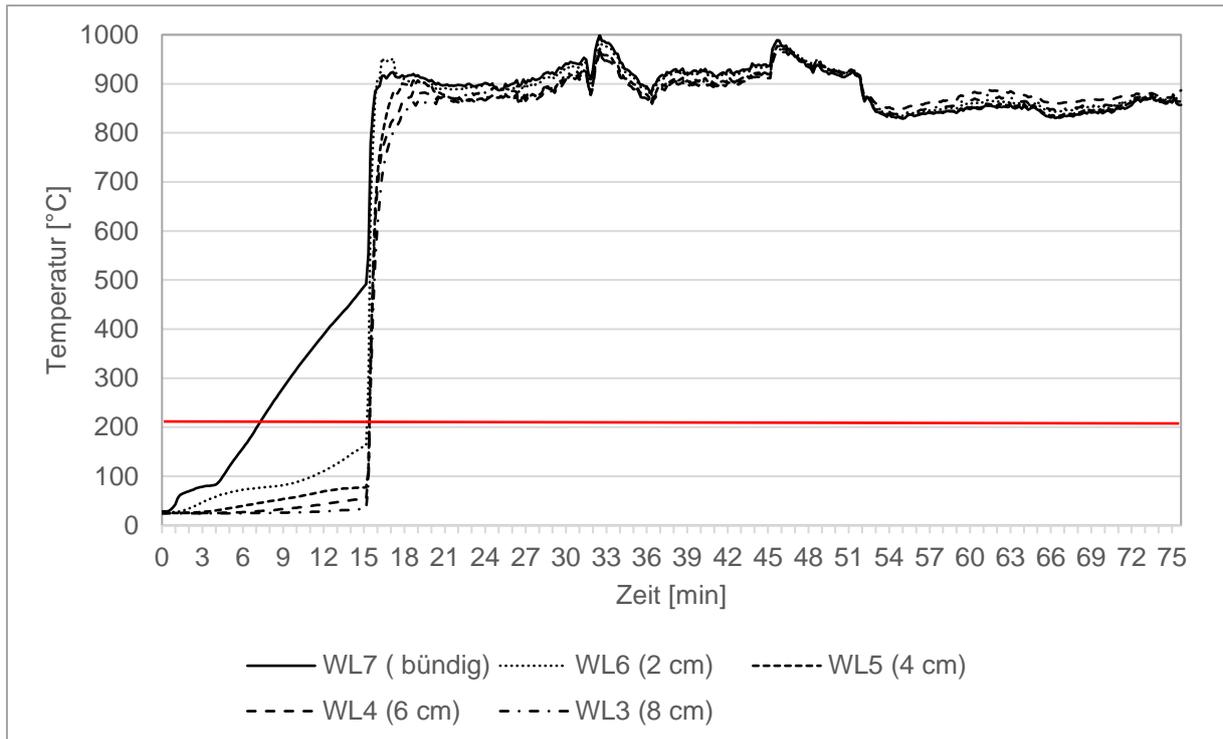


Abbildung 266: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von ca. 20 mm

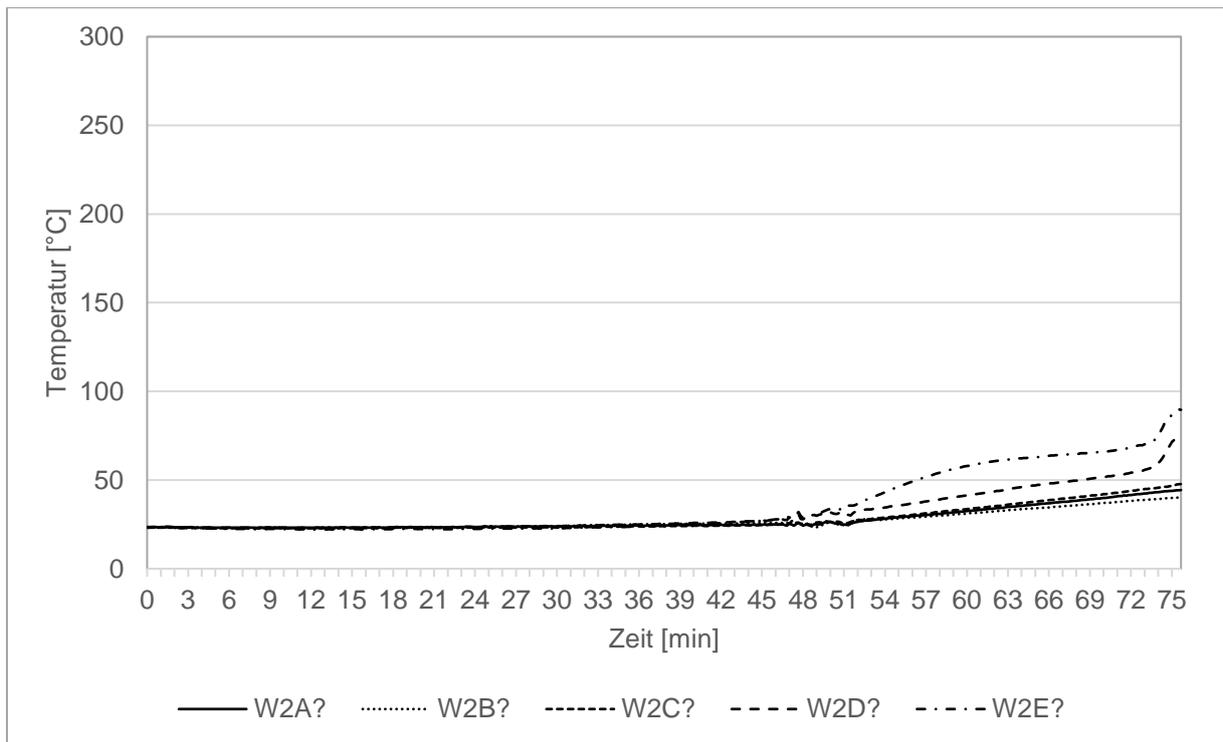


Abbildung 267: Temperaturverlauf zwischen Zellulose (240 mm Isocell Zell - gesichert durch Hasendraht) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

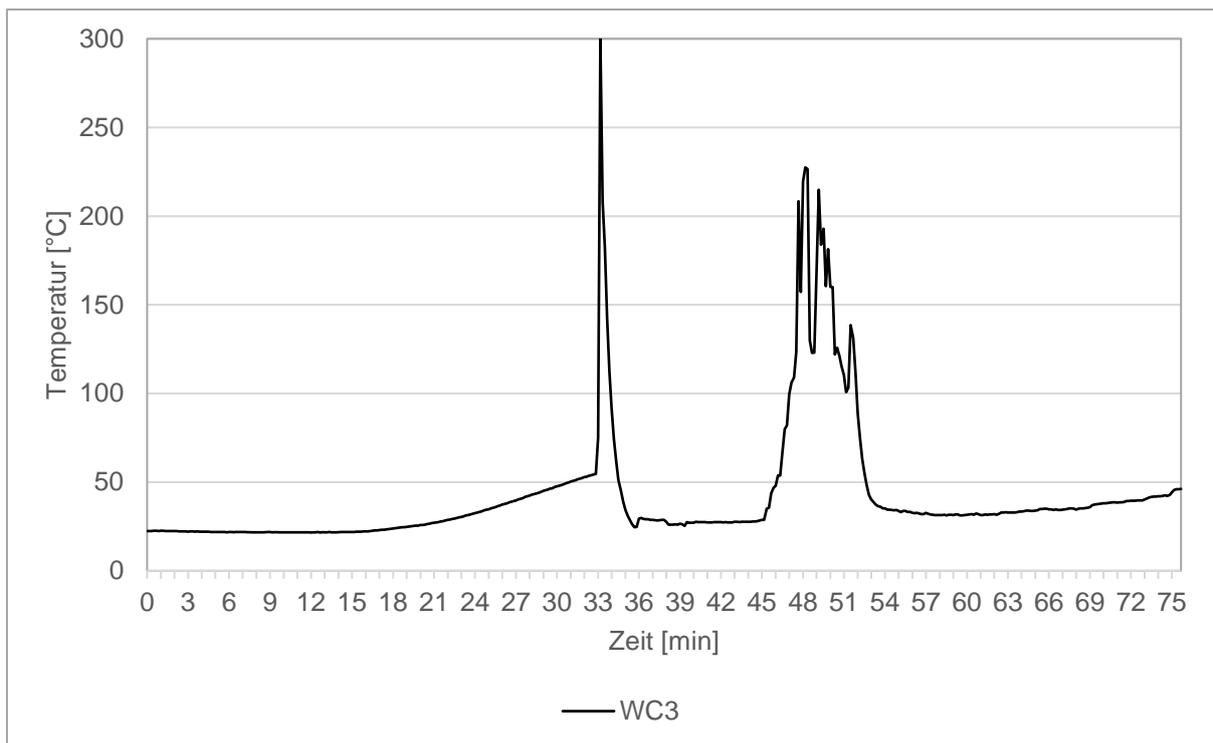


Abbildung 268: Temperaturverlauf auf mittlerer Höhe in der Zellulose (120 mm) in der Wand im Gefach 1

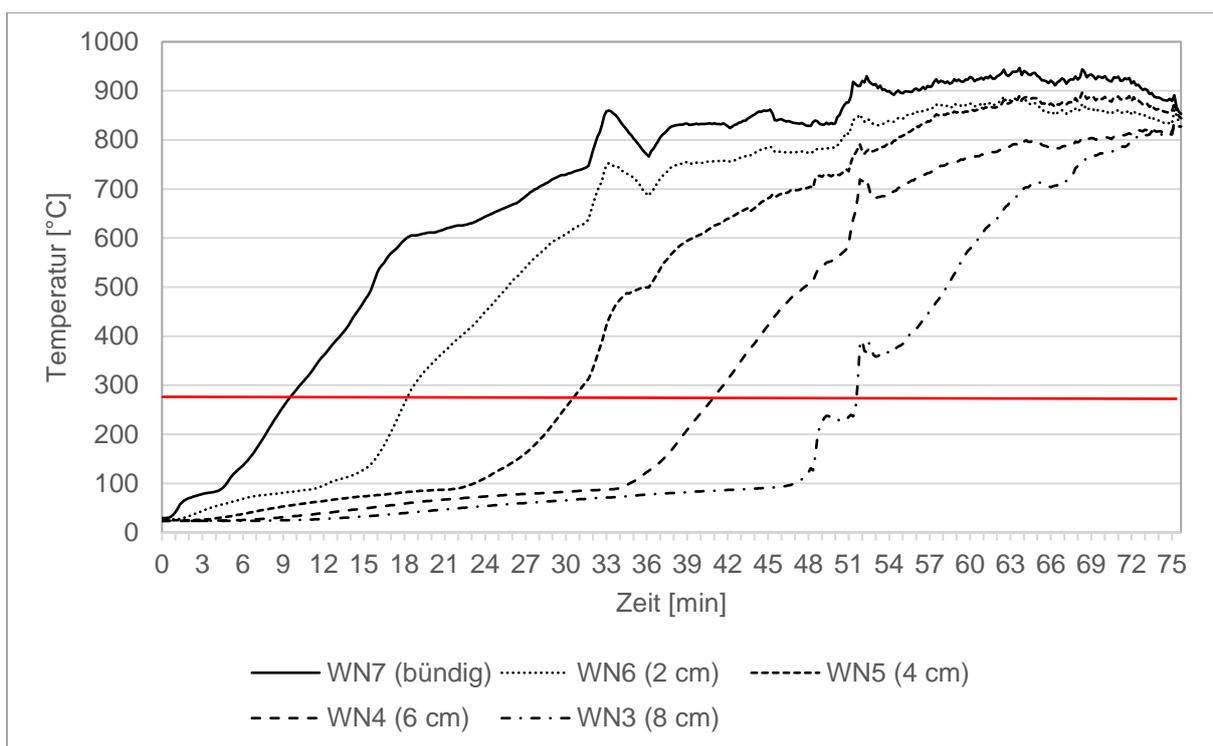


Abbildung 269: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von ca. 20 mm

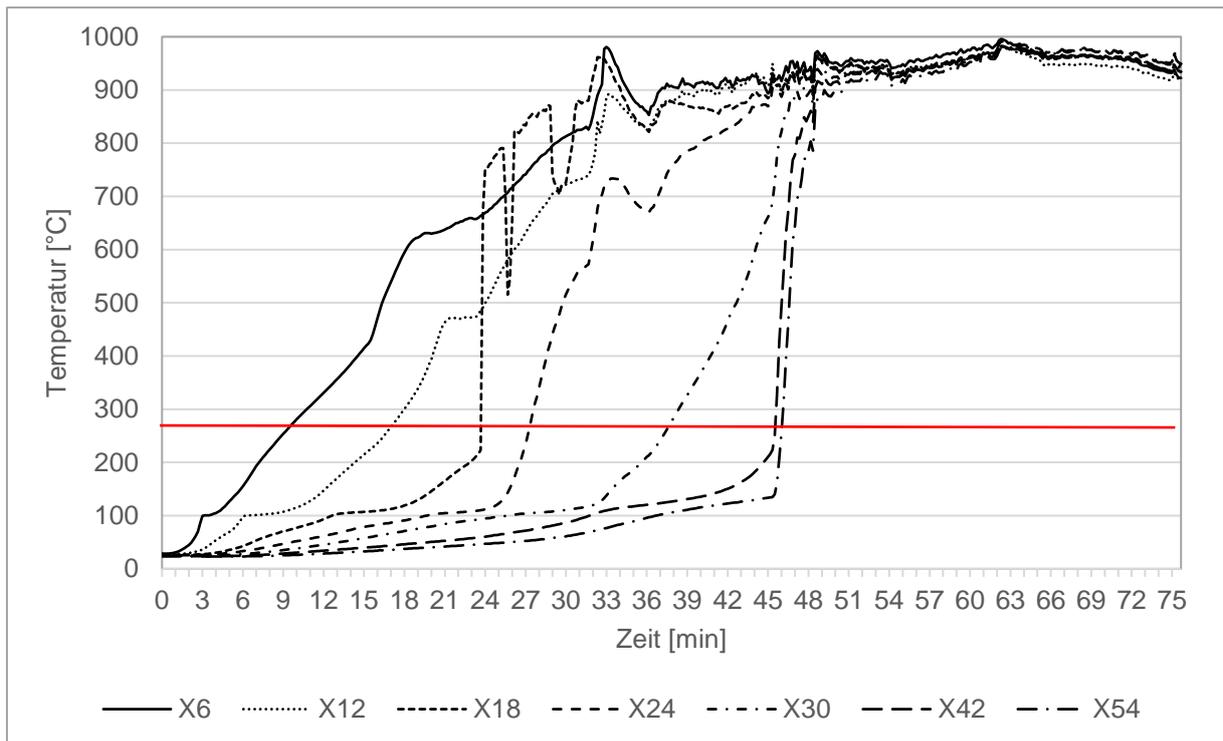


Abbildung 270: Temperaturverlauf am Mittelholz der Wand dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 6 mm

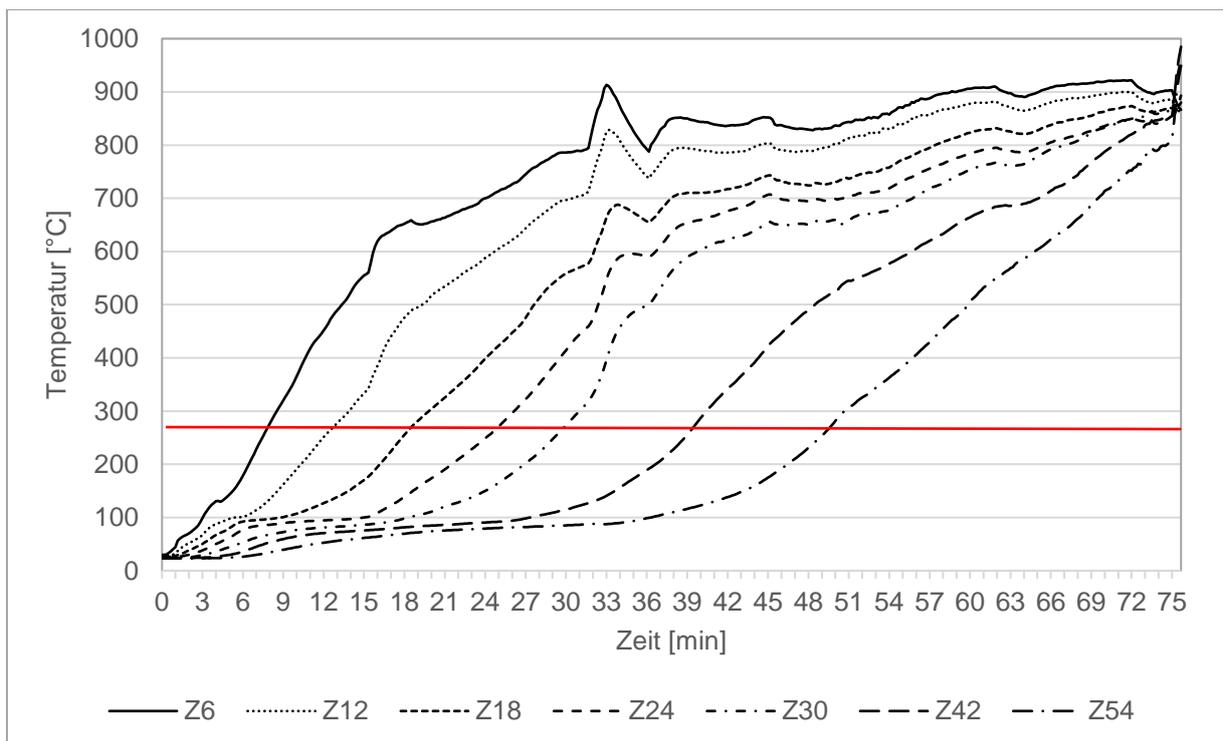


Abbildung 271: Temperaturverlauf im Mittelholz der Wand zwischen dem Gefach 1 und dem Gefach 2, Messstellen im Abstand von 6 mm

Element	Sicherung	Versagenszeit	Bemerkung
Decke 1 240 mm Steico Floc	Lattung	32. Minute	T > 270°C, Herausfallen der Zellulose
Decke 2 240 mm Iso- cell Zell	Hasendraht	46. Minute	T > 270°C, Zellulose hängt im Hasendraht
Wand 1 240 mm Steico Floc	ungesichert	15. Minute im oberen Teil des Gefaches, da schlecht eingebesen, 42. Minute im unteren Teil des Gefaches	T > 270°C, da zum Teil Herausfallen der Zellulose
Wand 2 240 mm Iso- cell Zell	Hasendraht	> 55. Minute	Teilweises Lösen der Zellulose vom Rahmen

Aussagen für 240 mm Zellulose:

Herausfallen der Zellulose an der Decke nach ca. 32 Minuten (ca. 10 Minuten nach Abbrand der Lattung). Bei einer ganzflächigen Sicherung durch Hasendraht verbleibt die Zellulose weitere 12 Minuten länger im Gefach.

Zellulose verbleibt in der Wand bei ganzflächiger Lagesicherung über 60 Minuten im Gefach.

## Prüfkörper 9

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
00:00	Brennerstart
02:00	Schwarzfärbung Gipsplatte
02:30	Abblättern Gips an Decke und Wand G1
02:45	Schwarzfärbung Decke G2 (3. Schicht)
06:30	Kohleschicht Decke G2 erkennbar
09:10	feine Risse in Gipskarton in Wand und Decke
11:30	Abplatzen von Holzoberfläche Decke G2 Im
12:00	Bauchige Risse GKB beide Wände Mitte
17:45	Flammen schlagen durch Riss in Wand G2 Mitte (Dämmung brennt mit), Decke G2 brennt sichtbar mit, Fuge Decke G2 deutlich sichtbar lo-ro
20:00	Fuge Wand zwischen Gipskartonplatte offen
22:30	Decke beginnt sich in G2 langsam aufzulösen in der Mitte
22:50	Decke G2 Mitte abgefallen, Dämmung darunter brennt mit
24:30	Gipsfaser Decke G1 wölbt sich da Sollfuge zum Abfallen
24:50	Dämmung Decke G2 fast frei/Massivholzplatte zum großen Teil abgefallen
25:30	Gipsplatte G1 abgefallen im oberen Bereich Fuge W1 zum Rähm sichtbar
27:30	zwischen Protect und Ständer
29:00	Risse in GKF Decke G1
31:00	Gipsplatte Wand G2 löst sich oben, Gipsplatte Wand G1 Mitte abgefallen
32:00	Gipsfaserplatte Decke G1 abgefallen im oberen Bereich
33:00	Holzfaser Decke G2 baucht
35:00	Decke G2 abgedeckt mit Mineralwolle und Gipsfaser
36:00	Fuge in Wand G1 weit offen (Protect Platte)
39:00	Gipskarton Wand G1 vollständig weg, Protect Platte durch schrauben am Gefach gesichert am Rand und in Mitte
41:00	Dämmung Decke G2 herausgefallen
42:00	Brenner aus
44:00	Gipskarton Decke abgefallen ganz
46:00	Dämmung in Decke G1 heraus im oberen Bereich
53:00	Dämmung in Decke G1 ganz heraus
54:00	Protect in Wand G1 im oberen Bereich abgefallen => Dämmung dahinter brennt mit
57:00	Weißes Netz über Protect Wand G1, weißer Staub über Protect Wand G2
01:06:00	Gipsplatte auf Wand G1
01:09:00	Abbruch Versuch, da Decke Absturzgefährdet



Abbildung 272: Prüfkörper zu Prüfbeginn



Abbildung 273: Schwarzfärbung der Gipskartonplatten und der Massivholzplatte (4. Minute)



Abbildung 274: Brennen der Massivholzplatte (7. Minute)



Abbildung 275: Risse in den Gipskartonplatten der Wand (12. Minute)



Abbildung 276: Großer Riss in der Gipskartonplatte der Wand des Gefaches 1 (17. Minute)

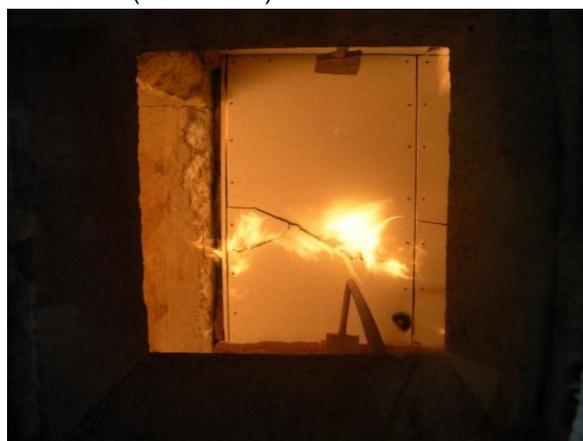


Abbildung 277: Brennen der Protect-Platte hinter der gerissenen Gipskartonplatte (18. Minute)



Abbildung 278: Abfallen der Massivholzplatte an der Decke Gefach 2 ( 25. Minute)



Abbildung 279: Abfallen eines Teiles der Gipskartonplatte an der Wand Gefach 1 (26. Minute)



Abbildung 280: Öffnen der Fuge in der Protect-Platte an der Wand im Gefach 1 (27. Minute)



Abbildung 281: Abfallen der Gipsplatte an der Wand im Gefach 2 (32. Minute)



Abbildung 282: Abfallen der Gipsplatte an der Decke im Gefach 1 (33. Minute)

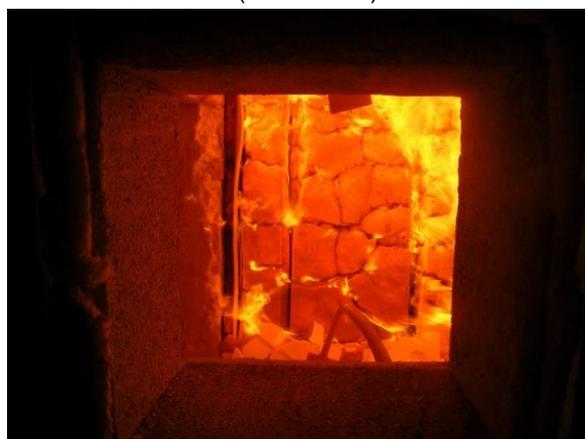


Abbildung 283: Weiteres Öffnen der Fuge in der Protect-Platte



Abbildung 284: Wand nach Versuchsende



Abbildung 285: Decke nach Versuchsende

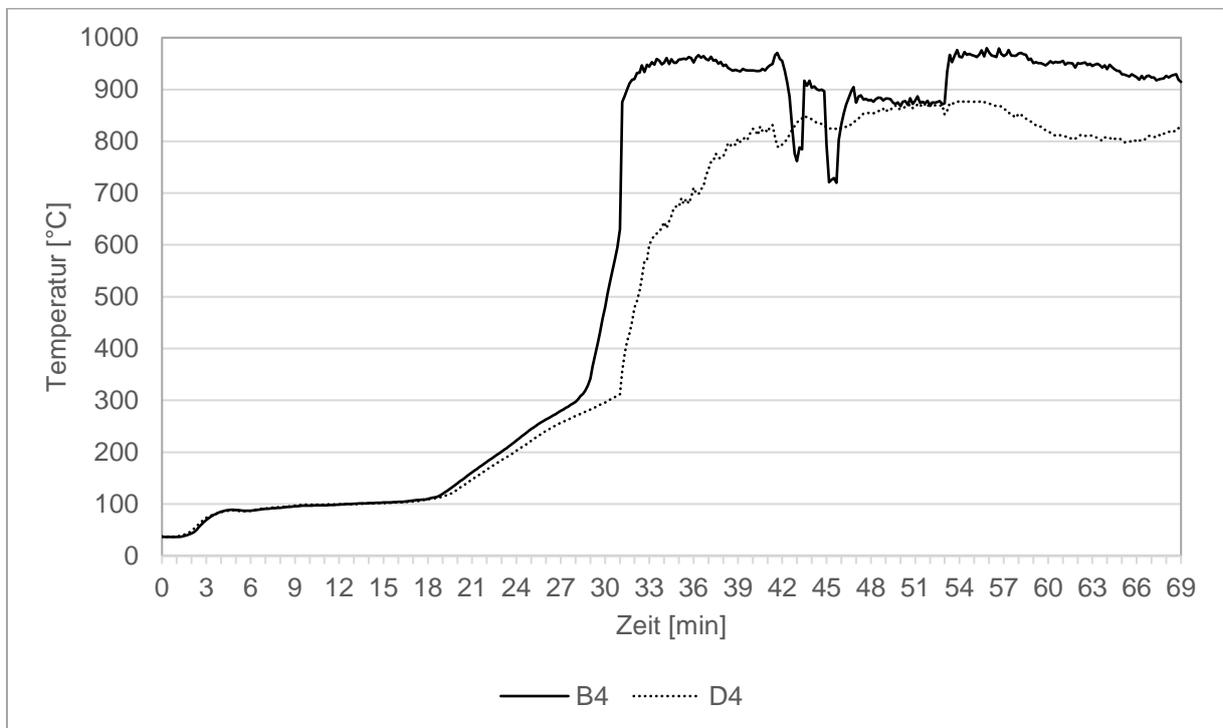


Abbildung 286: Temperaturverlauf zwischen Gipsplatte (12,5 mm GKF) und Spanplatte (19 mm) in der Decke im Gefach 1

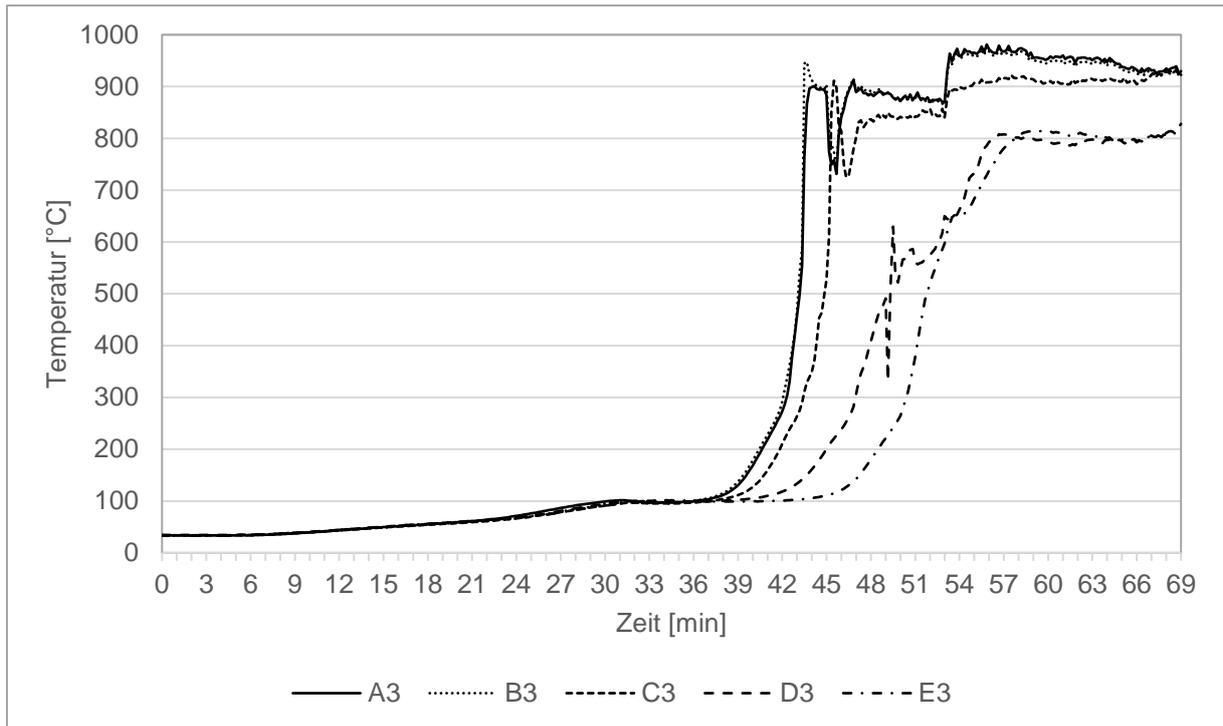


Abbildung 287: Temperaturverlauf zwischen Spanplatte (19 mm) und Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Decke im Gefach 1

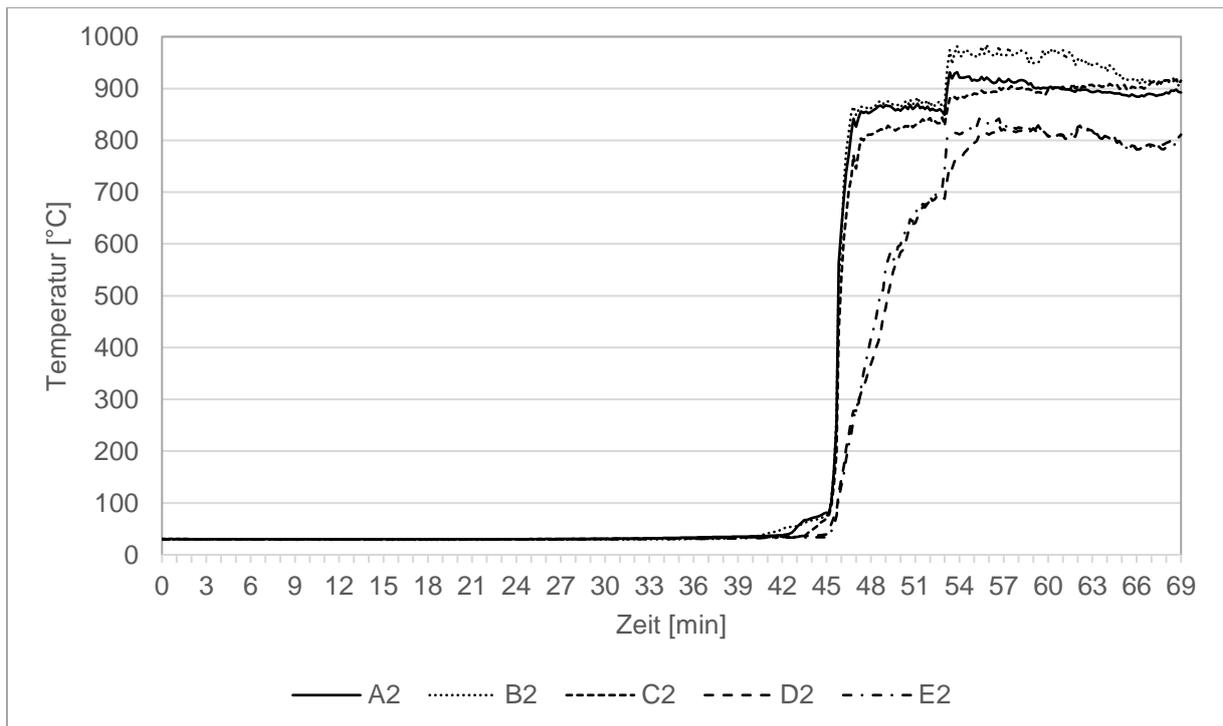


Abbildung 288: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) und Spanplatte (19 mm) in der Decke im Gefach 1

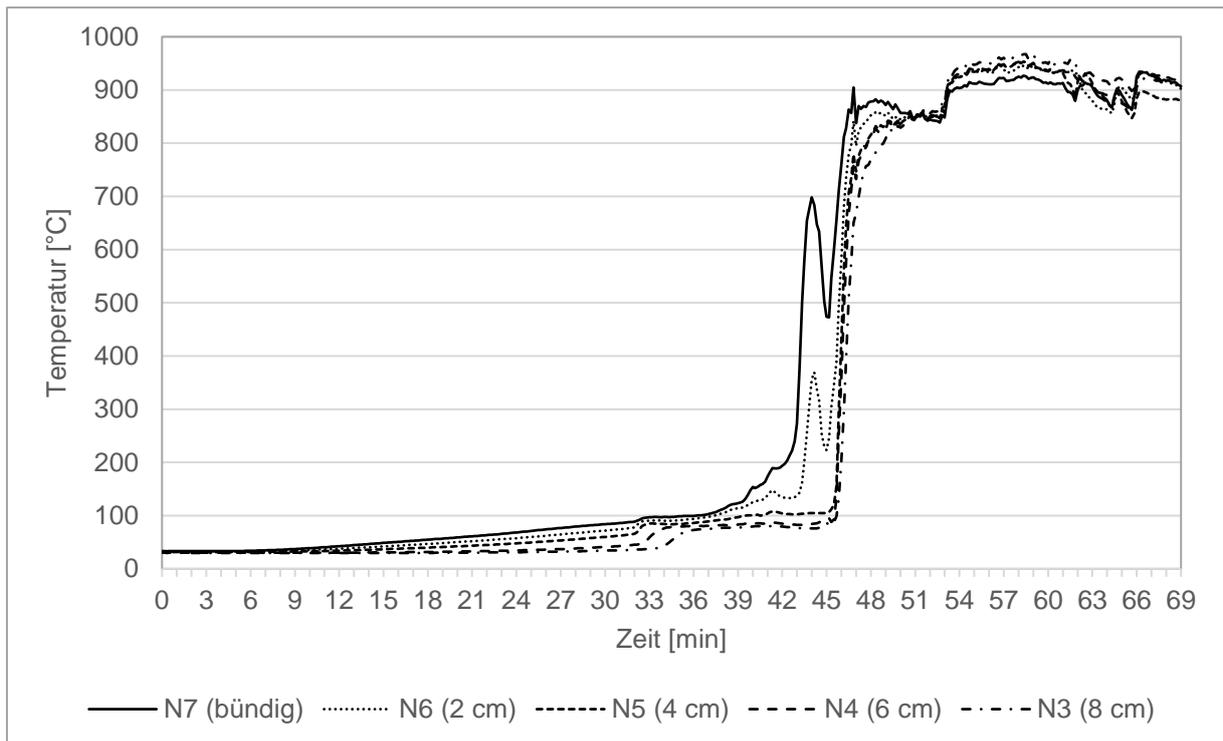


Abbildung 289: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 1 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

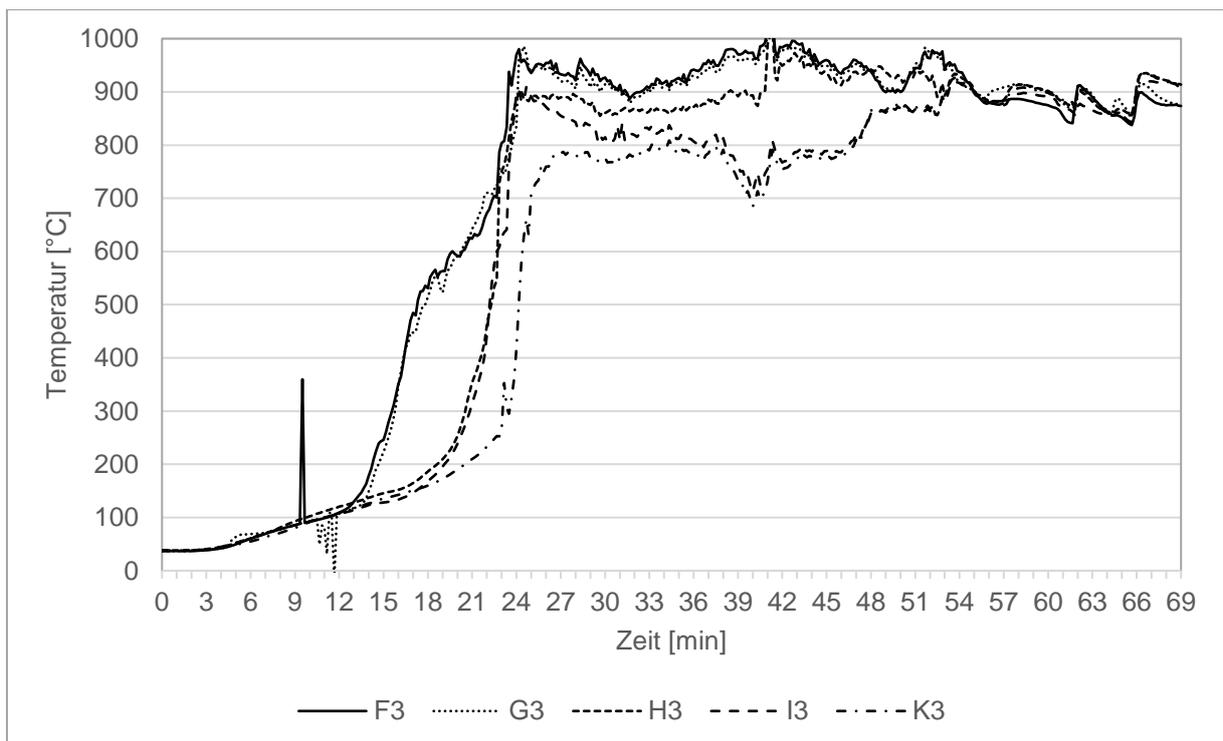


Abbildung 290: Temperaturverlauf zwischen Massivholzplatte (20 mm) Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Decke im Gefach 2

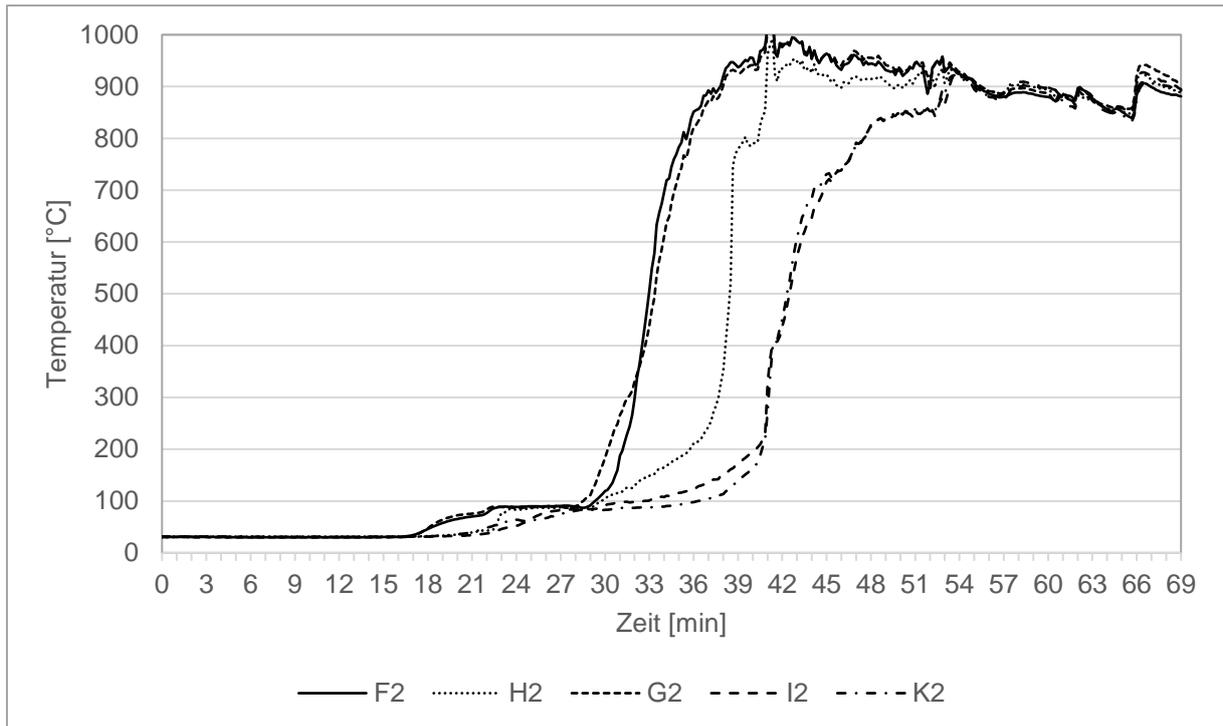


Abbildung 291: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) Spanplatte in der Decke im Gefach 2

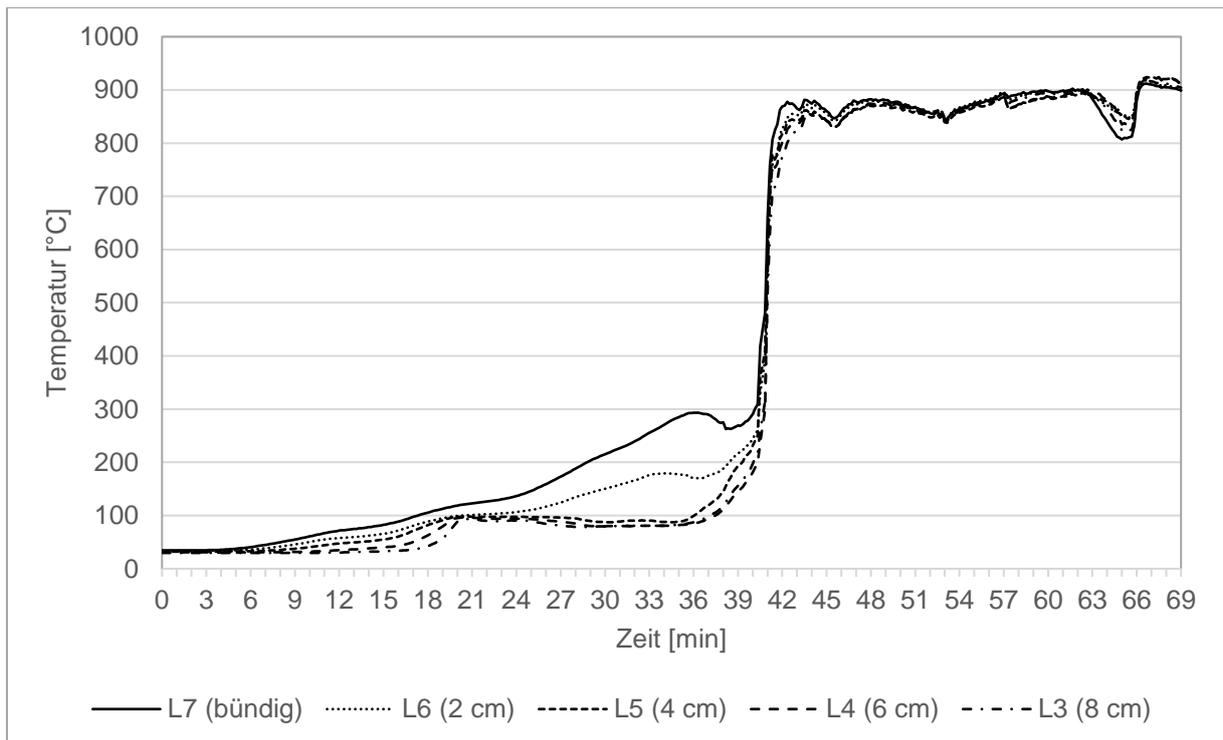


Abbildung 292: Temperaturverlauf am Mittelholz der Decke dem Gefach 2 zugewandt, Messstellen im Abstand von 20 mm

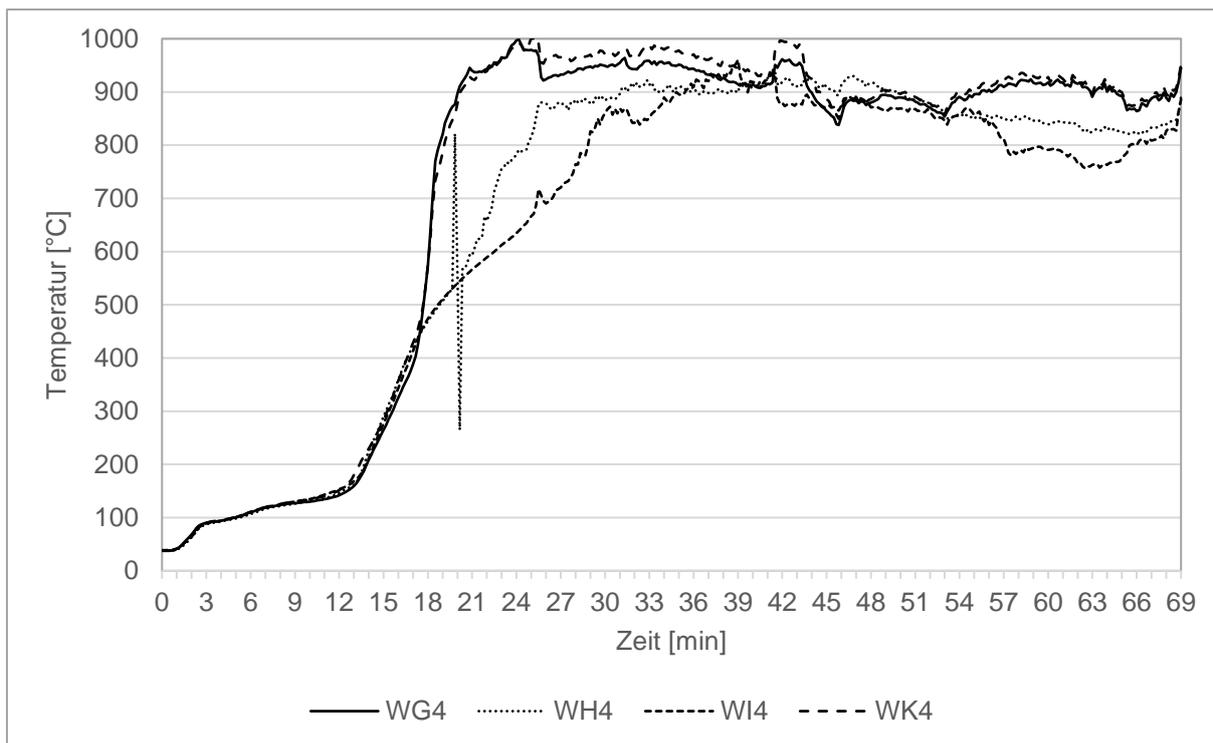


Abbildung 293: Temperaturverlauf zwischen Gipsplatte (12,5 mm Typ A) und Protect-Platte (100 mm Steico Typ M dry) in der Wand im Gefach 1

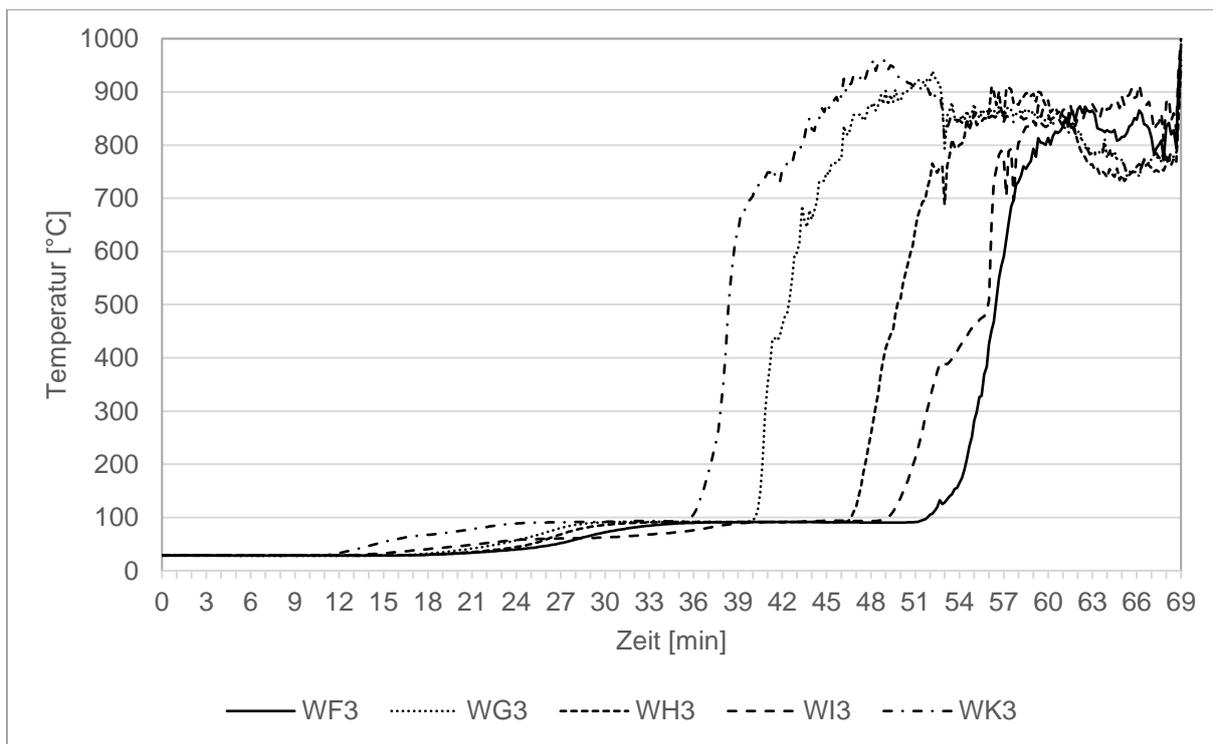


Abbildung 294: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (100 mm Steico Typ M dry) und Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 1

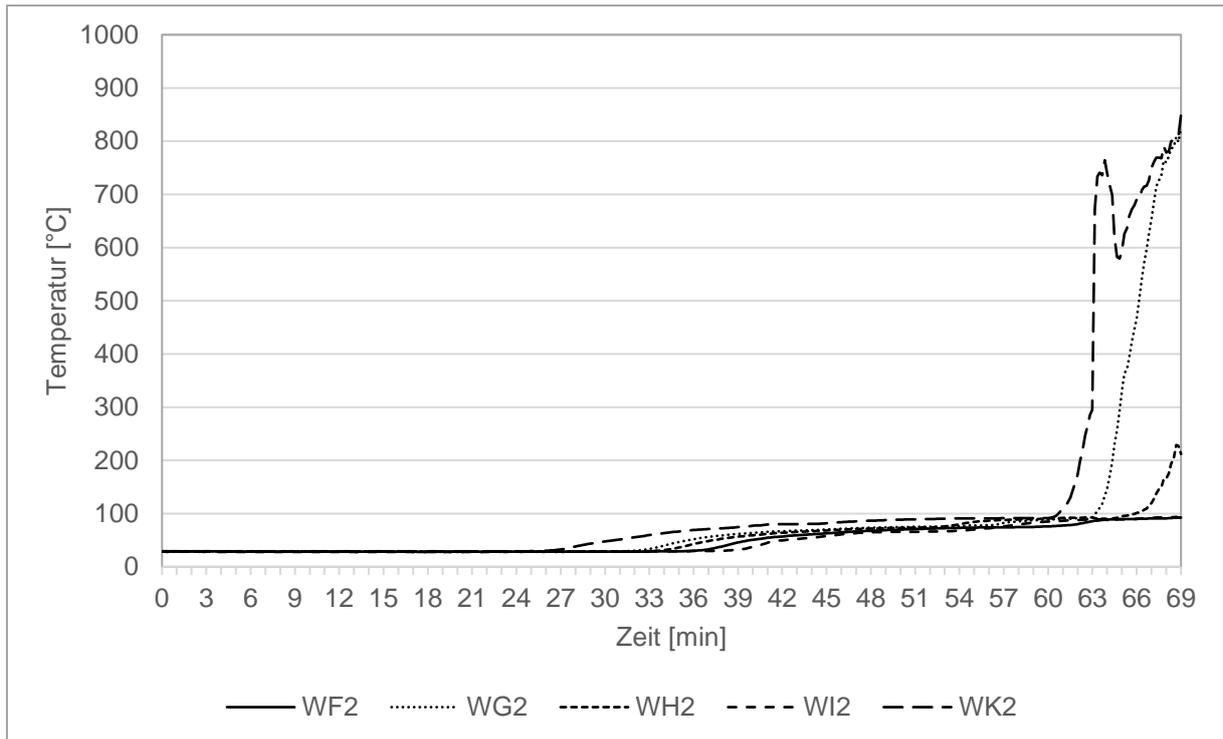


Abbildung 295: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) und Spanplatte in der Wand im Gefach 1

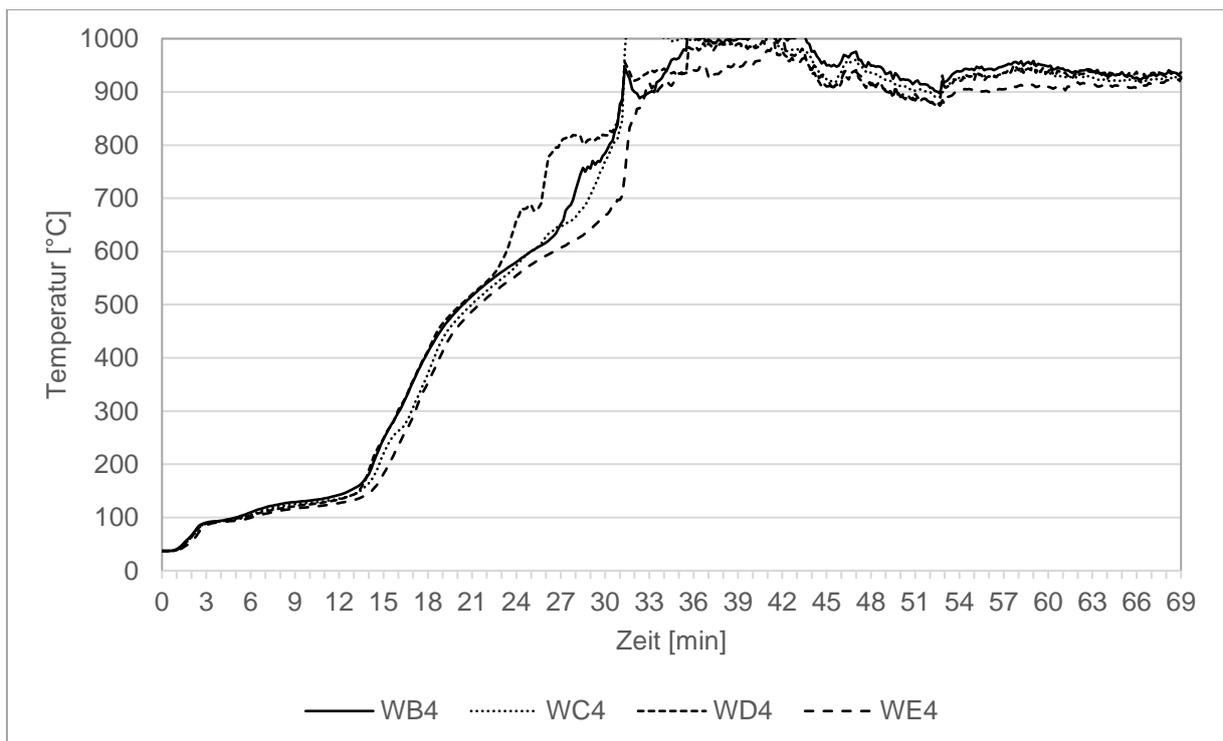


Abbildung 296: Temperaturverlauf zwischen Gipsplatte (12,5 mm Typ A) und Protect-Platte (100 mm Steico Typ M) in der Wand im Gefach 2

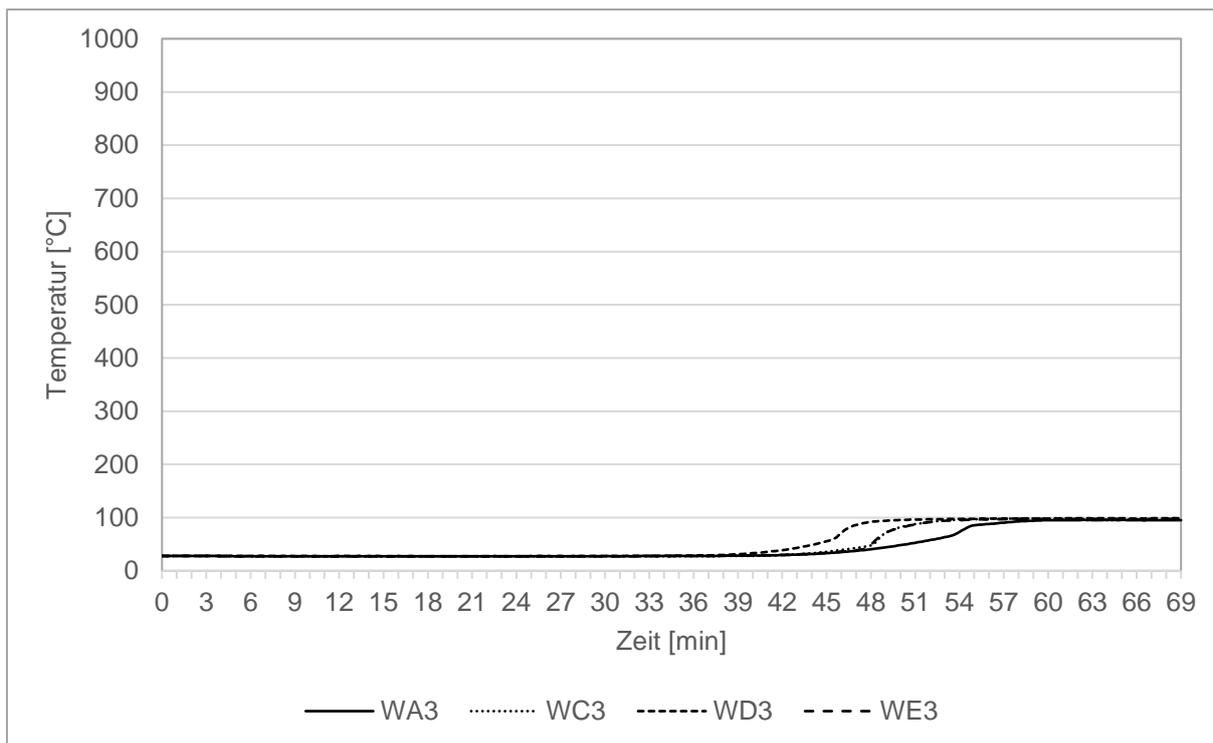


Abbildung 297: Temperaturverlauf zwischen Protect-Platte (100 mm Steico Typ M) und Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) in der Wand im Gefach 2

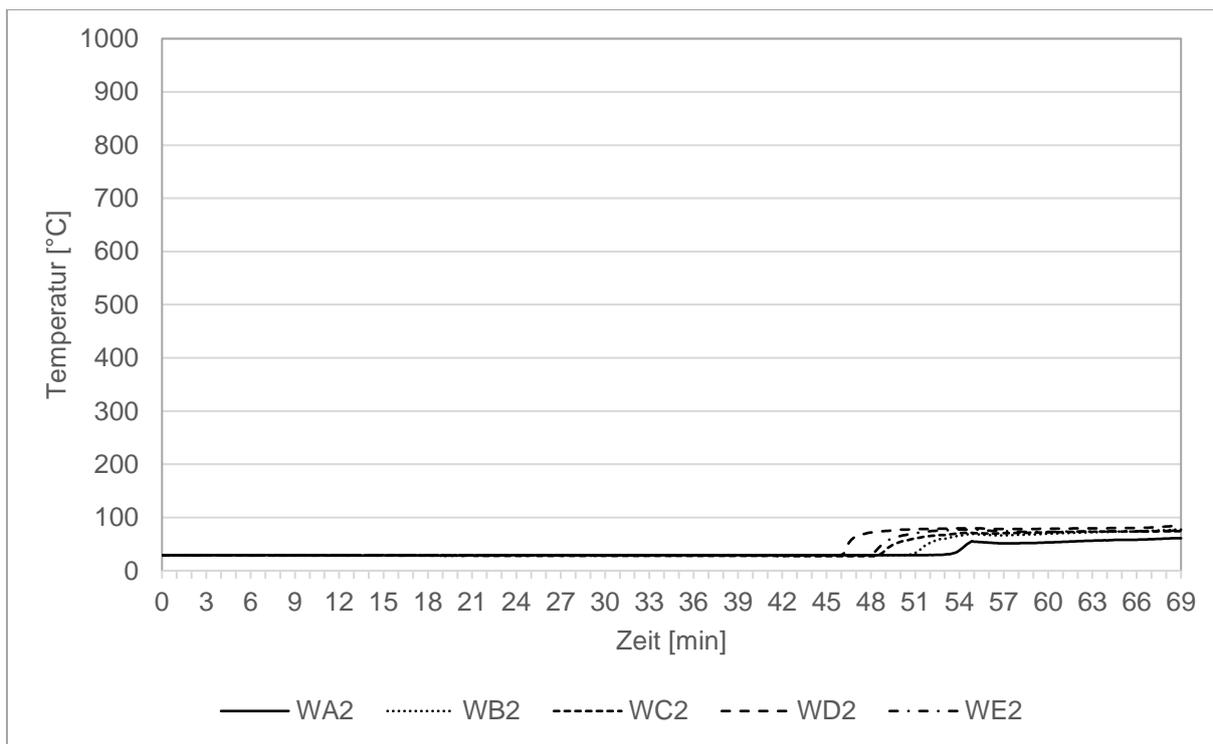


Abbildung 298: Temperaturverlauf zwischen Holzweichfaser (120 mm Steico Flex) und Spanplatte in der Wand im Gefach 2

## Anhang H Prüfprotokolle der Kleinbrandversuche für die Tragfähigkeit

### Prüfkörper 10

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
03:22	Gipskarton färbt sich schwarz
17:00	Haarrisse
19:00	Sichtbares Herausbrennen Wand G1 Mitte, Abplatzen der Spachtelung davor, sonst noch kein Herausbrennen, auch Temperatur hinter Gipsplatte noch nicht bei 100°C
23:22	Wandplatte vor => deutlicher Spalt oben zwischen festgeschraubten GK und GK-Platte
24:00	Mitbrand rundum Wand G1 und Wand G1 und Wand G2 aus Spalt oben und unten => Anfang Abplatzung von Spachtelung
31:45	Abfallen der Bepunktung, Decke => Dämmung fällt komplett heraus, Ofen aus => Eigenbrand
40:00	Abbruch durch Löschen



Abbildung 299: Prüfkörper zu Prüfbeginn



Abbildung 300: Schwarzfärbung der Gipskartonplatten (3. Minute)



Abbildung 301: Brennen in den Fugen zum Rahmen (17. Minute)



Abbildung 302: Brennen am oberen Rahmen der Wand (26. Minute)



Abbildung 303: Abfallend der GKF-Platten an Decke und Wand und der Holzweichfaser an der Decke (33. Minute)



Abbildung 304: Versuchskörper nach Versuchsende



Abbildung 305: Rest der Zellulose nach ca. 45 Minuten Versuchsdauer

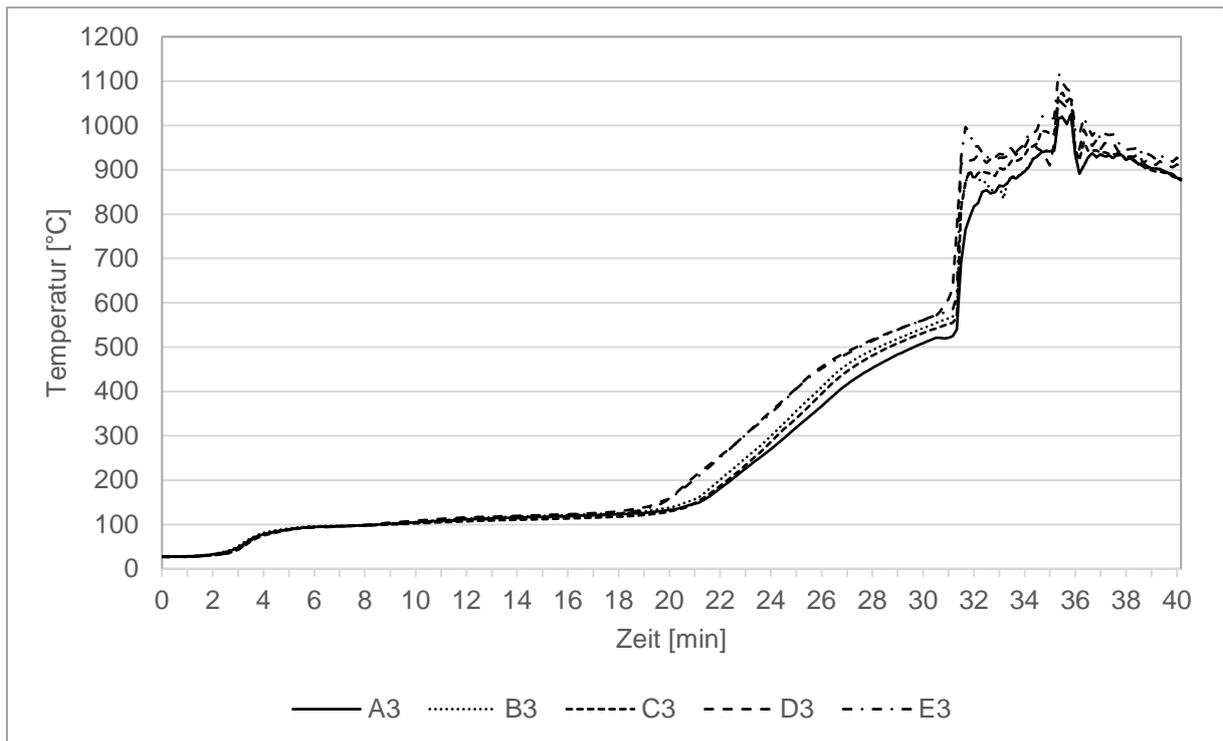


Abbildung 306: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Holzweichfaserdämmung in der Decke im Gefach 1

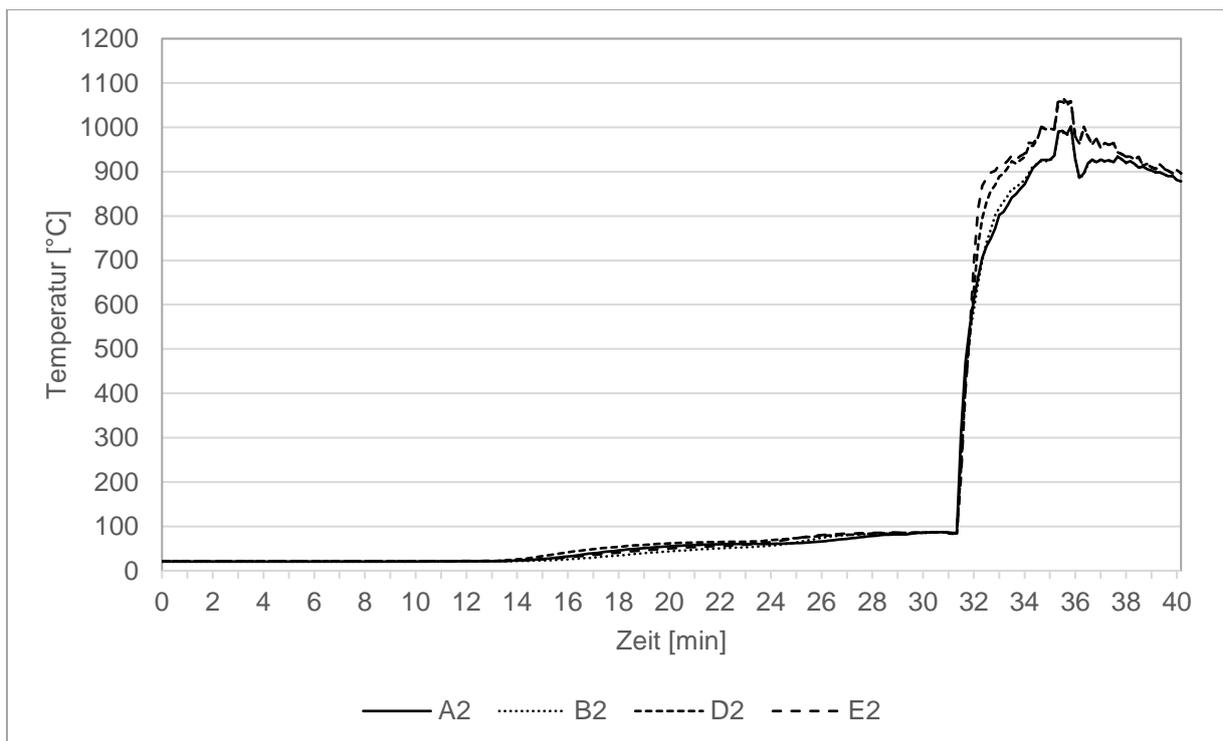


Abbildung 307: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Holzweichfaserdämmung und der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

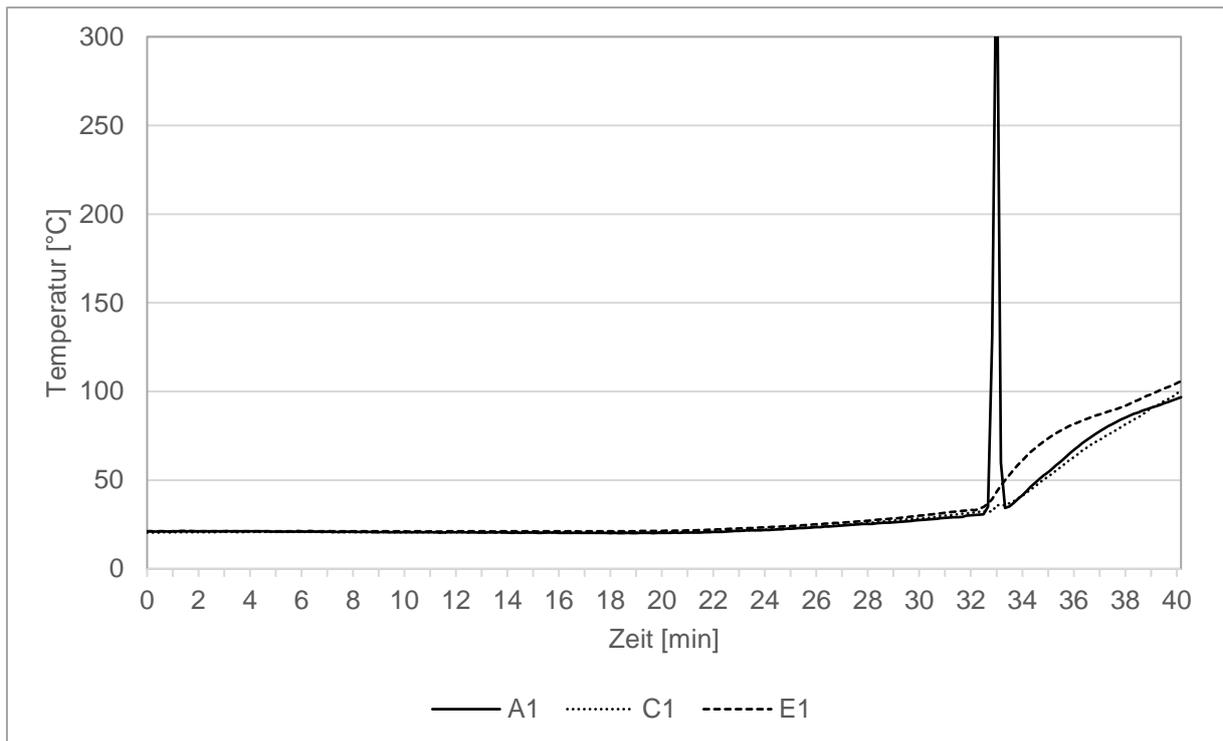


Abbildung 308: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

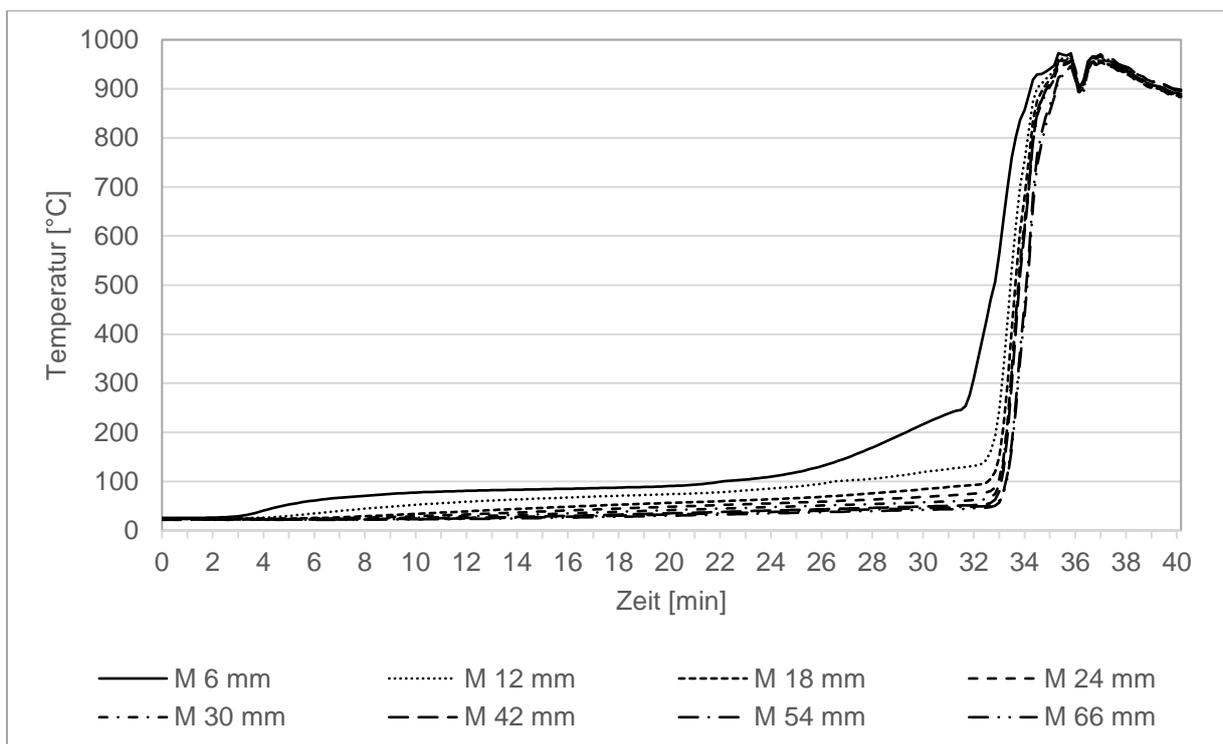


Abbildung 309: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Decke

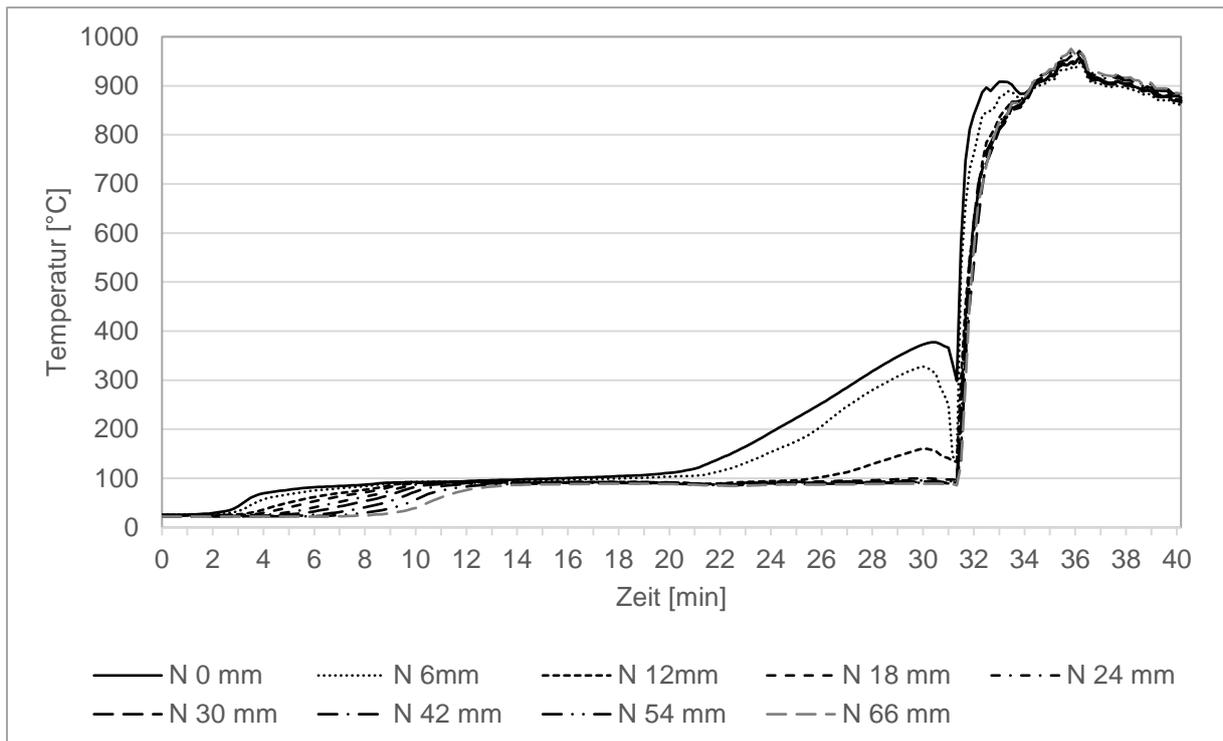


Abbildung 310: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

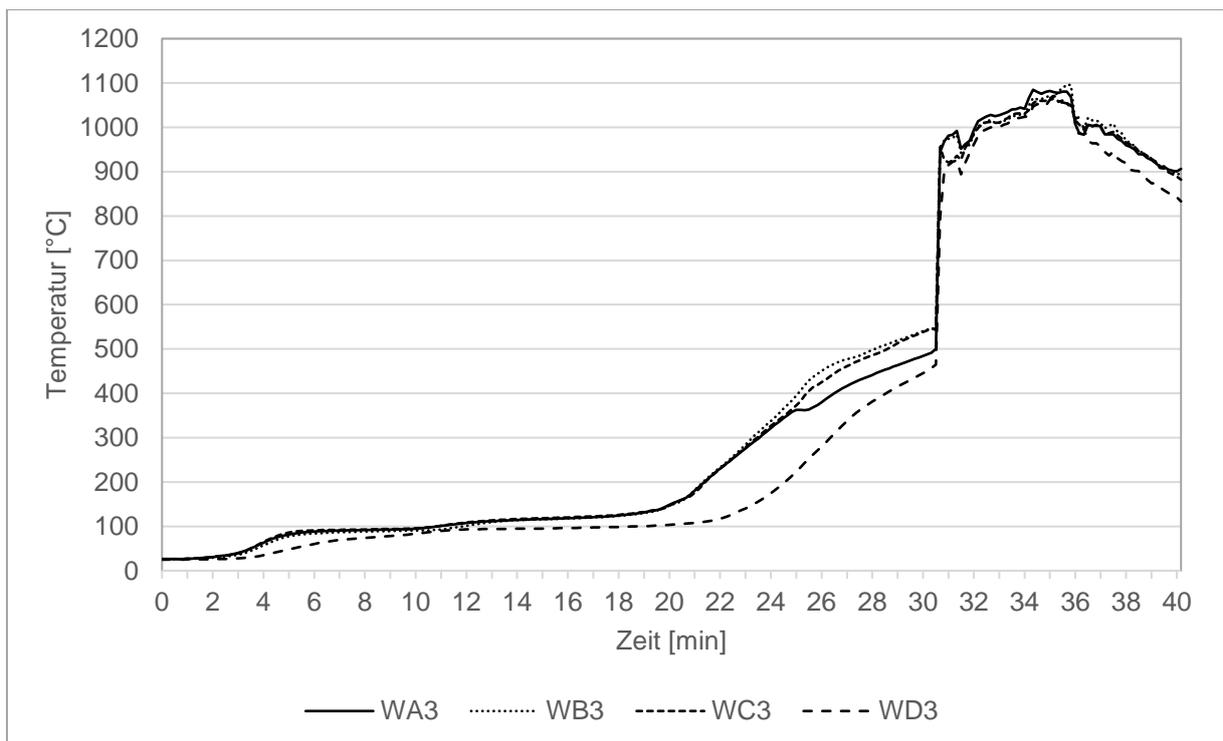


Abbildung 311: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Zellulose in der Wand im Gefach 1

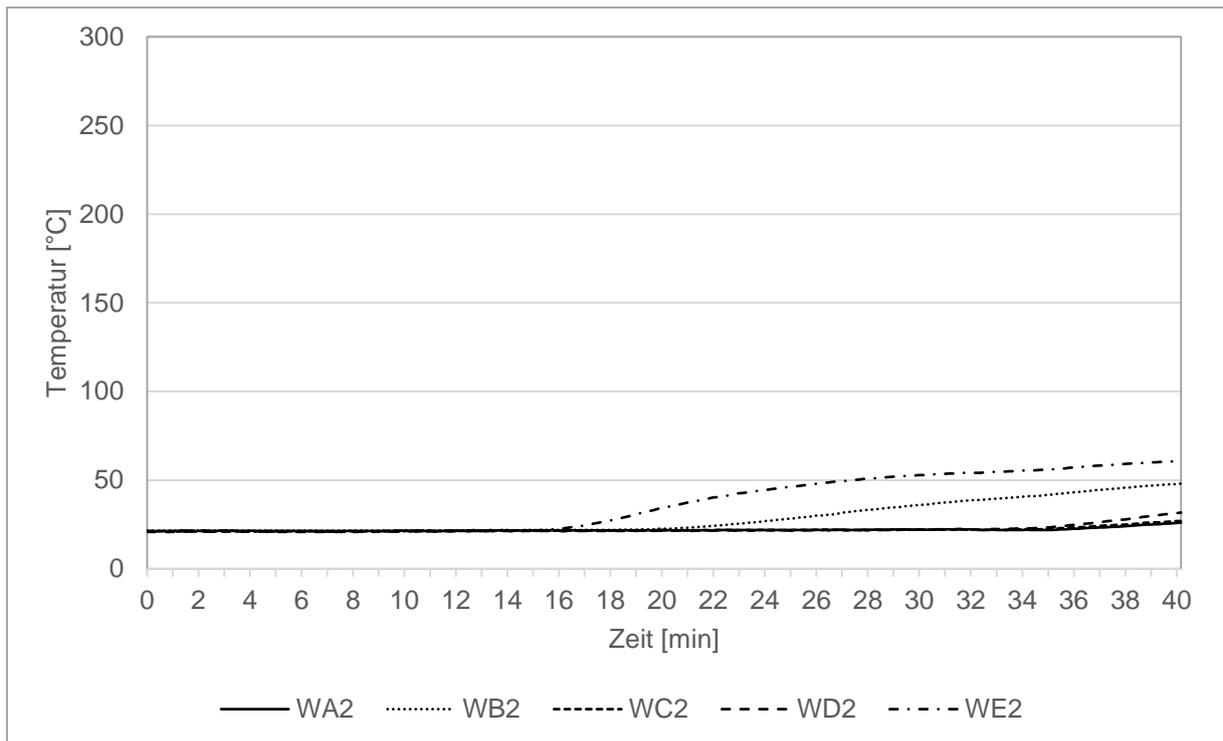


Abbildung 312: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Zellulose und der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

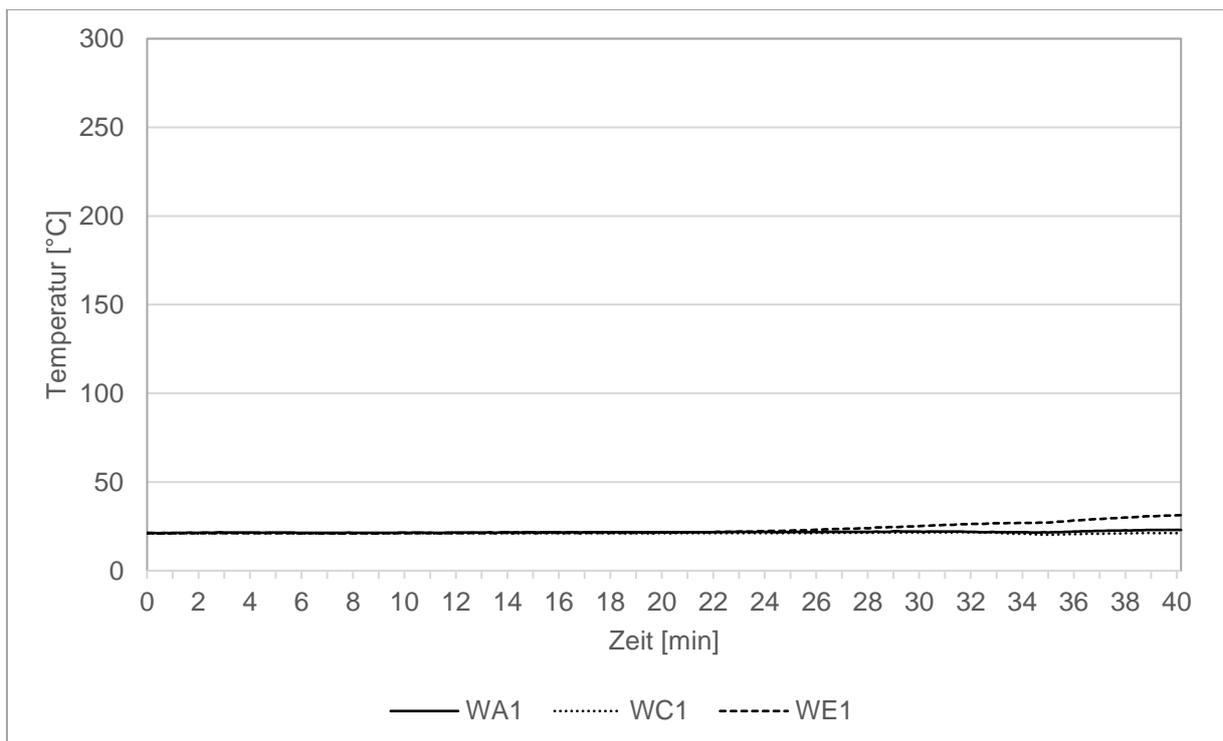


Abbildung 313: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

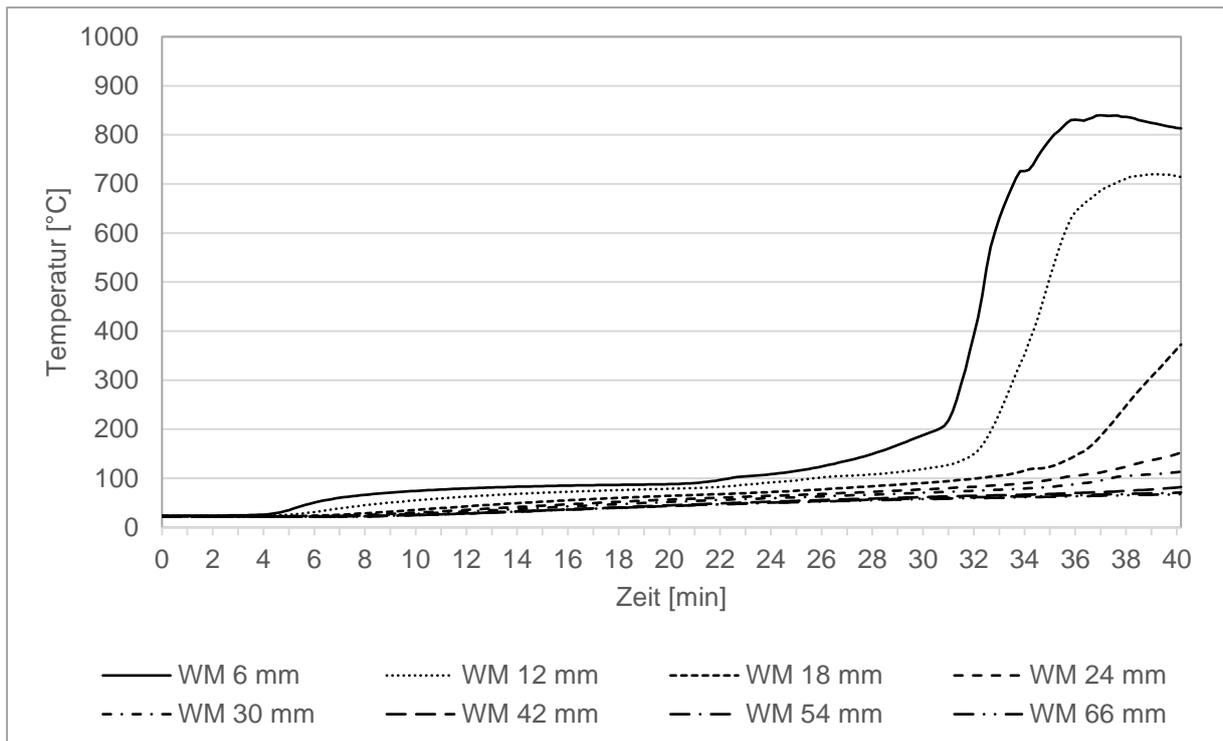


Abbildung 314: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Wand

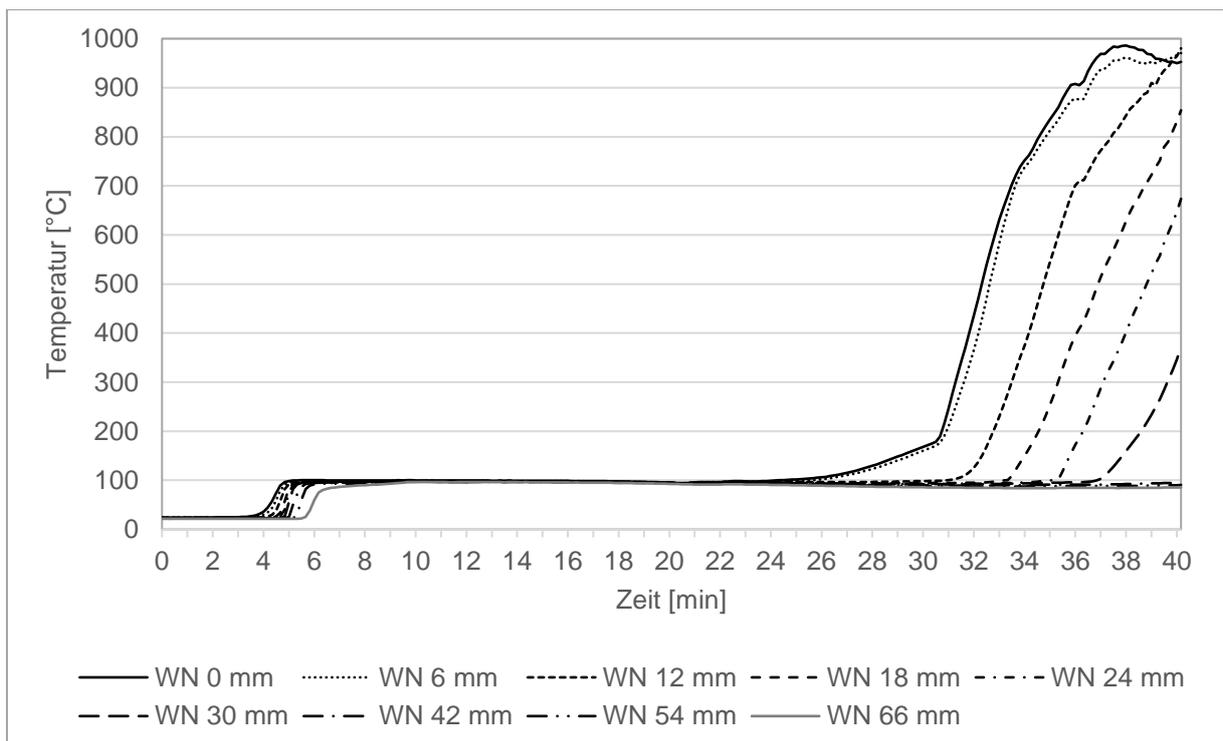


Abbildung 315: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

## Prüfkörper 11

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
13:00	Feine Haarrisse in W1 und W2 von Schrauben ausgehend
20:44	Anfängliches Versagen der Schutzplatten der Putzfugen (nach vorne Kippen W1 und W2), nicht so extremes Bauchen wie V12 am 21.09 (Einblasdichte?)
22:00	Sichtbares Durchbrennen W1 lm, W2 rm und D1 lm (D2 noch nicht)
24:00	Brennen über gesamte Fuge W1 l
26:06	Herausbrennen D2 mr
33:00	Alles fallen gelassen, Wandplatte hängt noch ... davor Holzfaser noch am mittleren Ständer aber liegt sofort im Hasendraht
37:00	Holzfasern vom Ständer zurückgezogen, Vollbrand Ständer, Decke D2 mehr als D1, Zellulose noch direkt am Ständer
42:00	Abfall der Holzweichfasermatte D1 lh, Durchzünden, Zellulose noch schön am Ständer, Holzwolle zum Teil herausgefallen, restlicher Teil hinter Hasendraht
45:00	Brenner aus
46:00	Schluss



Abbildung 316: Prüfkörper zu Prüfbeginn



Abbildung 317: Schwarzfärbung der Gipskartonplatten (2. Minute)



Abbildung 318: Brennen in den Fugen zur Wand (23. Minute)



Abbildung 319: Brennen am oberen Rahmen der Wand (28. Minute)



Abbildung 320: Abfallend der GFK-Platten an Decke und (34. Minute)



Abbildung 321: Abfallen der Holzfasermatte von Decke in Hasendraht (41 Minute)



Abbildung 322: Versuchskörper nach Versuchsende



Abbildung 323: Rest der Zellulose nach ca. 45 Minuten Versuchsdauer



Abbildung 324: Rest des Wandquerschnitts nach ca. 45 Minuten Versuchsdauer

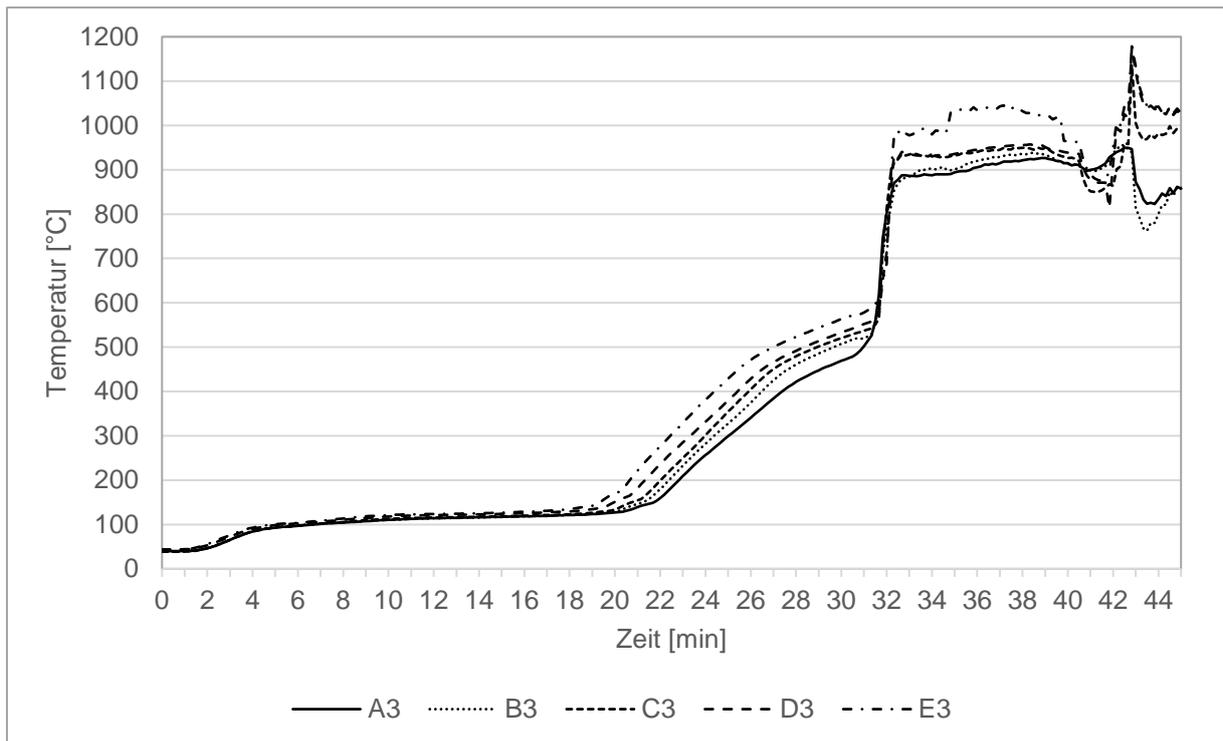


Abbildung 325: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Holzweichfaserdämmung in der Decke im Gefach 1

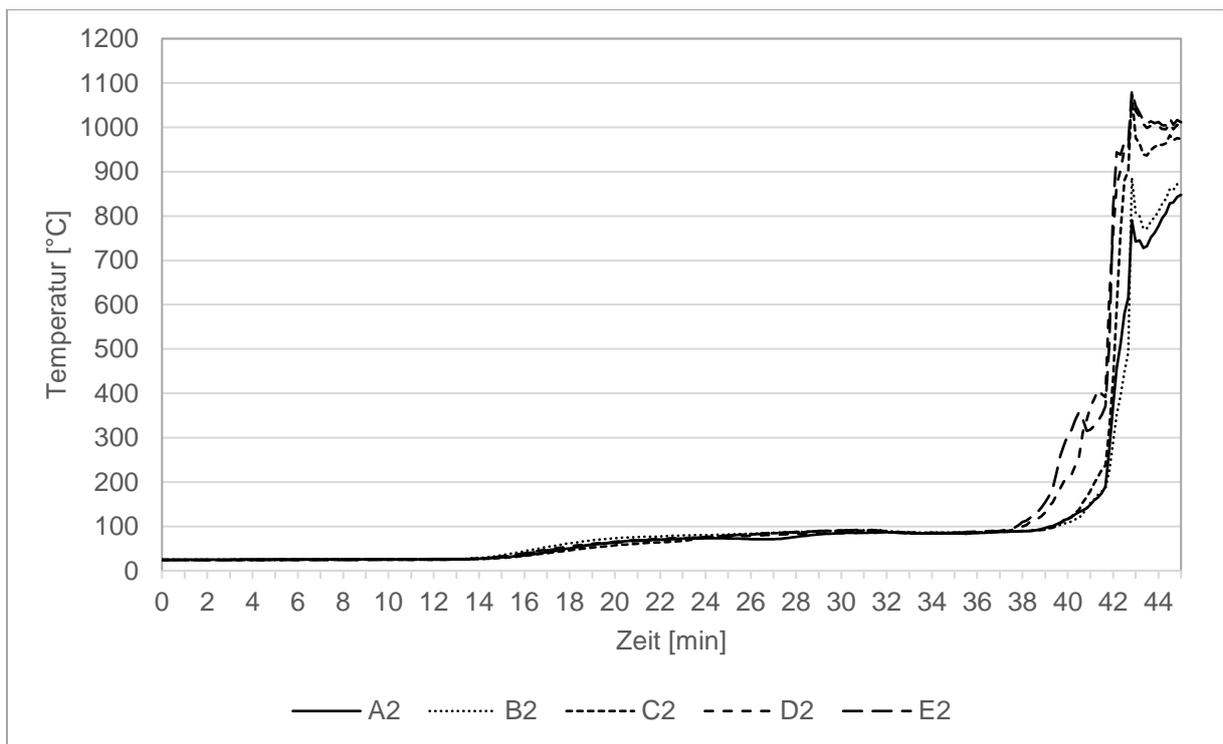


Abbildung 326: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Holzweichfaserdämmung und der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

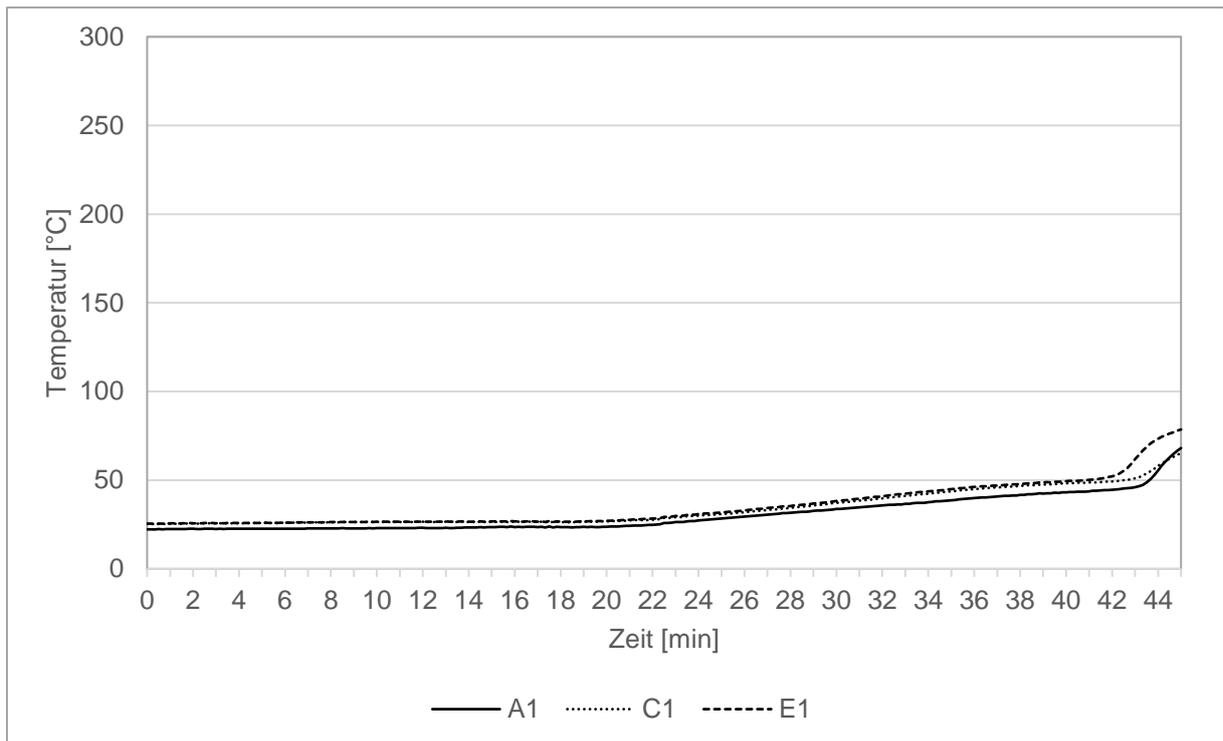


Abbildung 327: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

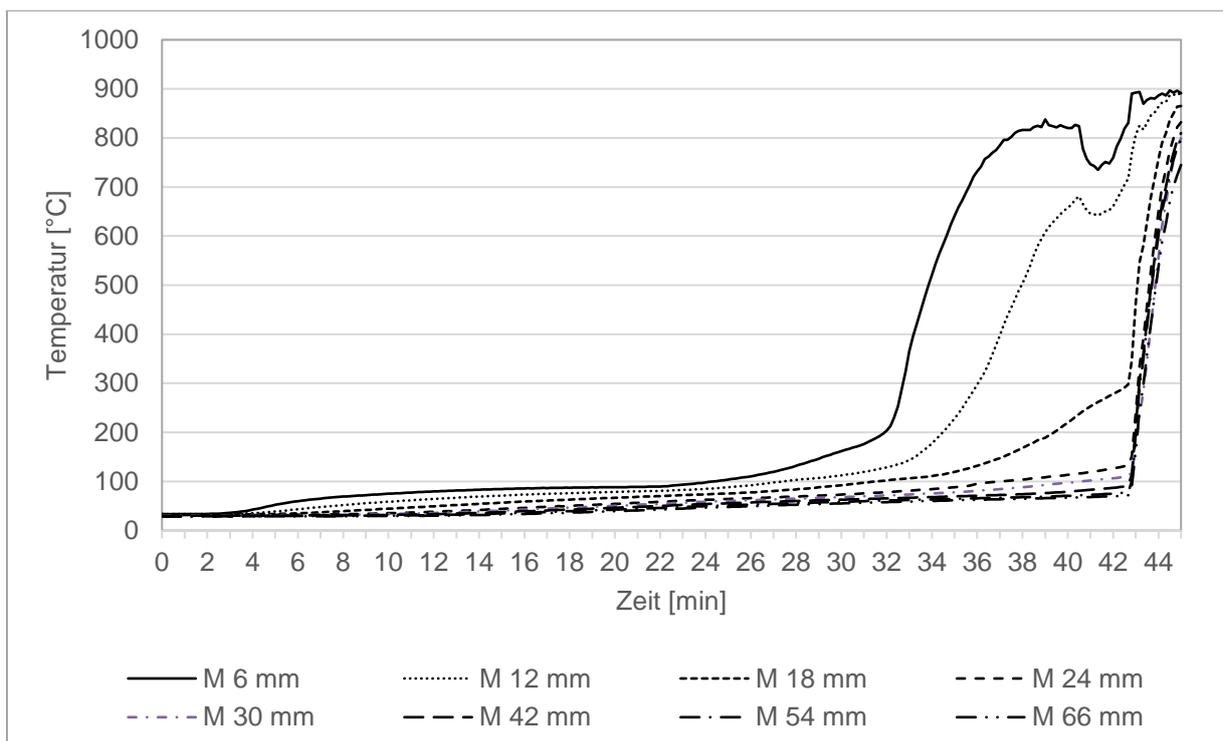


Abbildung 328: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Decke

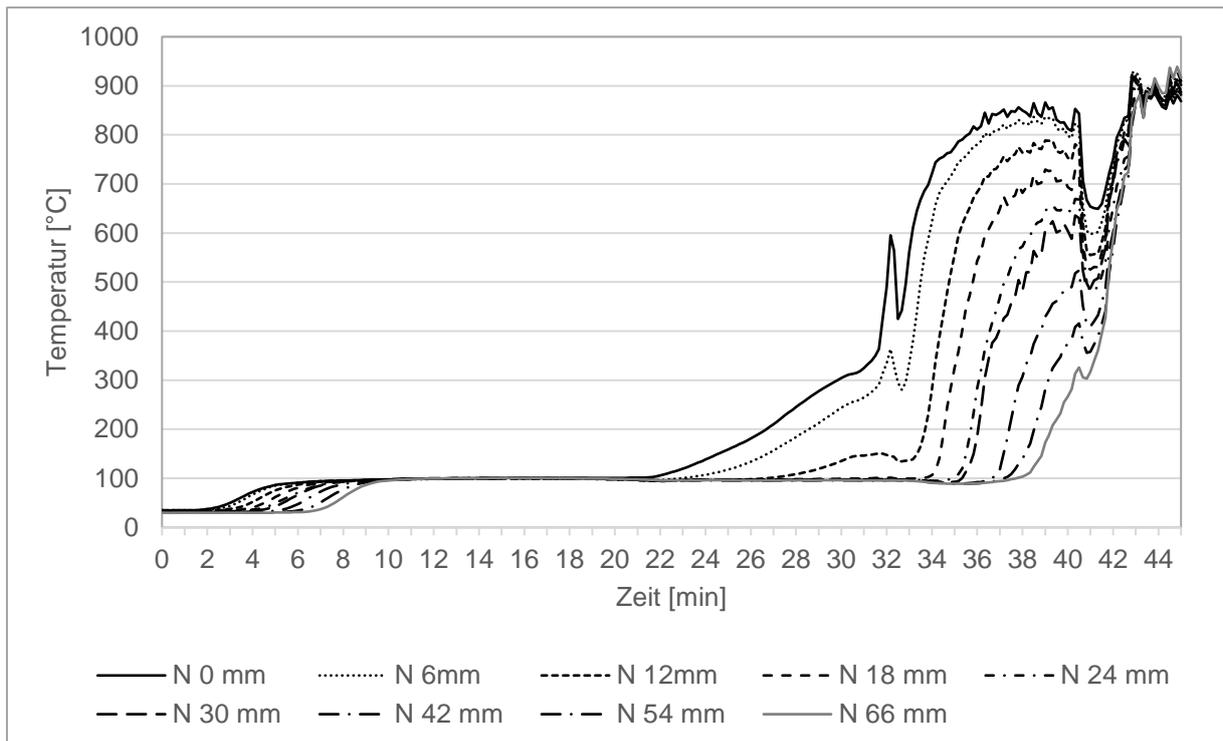


Abbildung 329: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

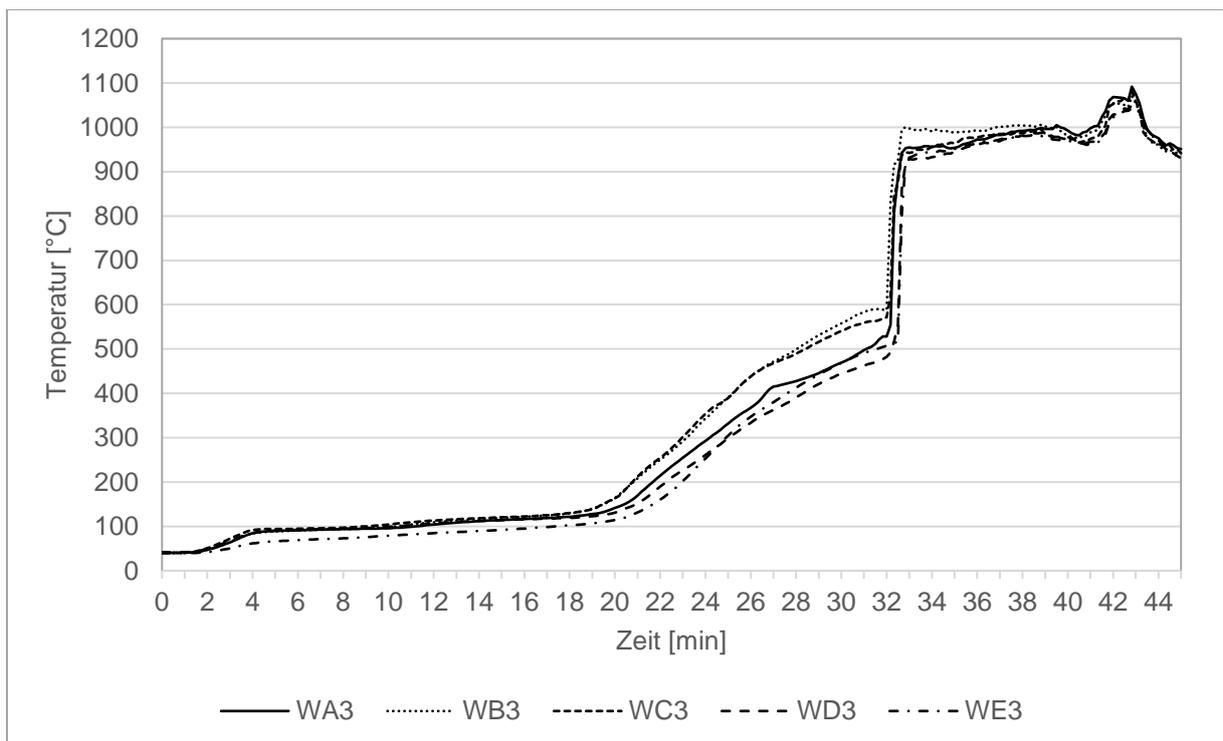


Abbildung 330: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Zellulose in der Wand im Gefach 1

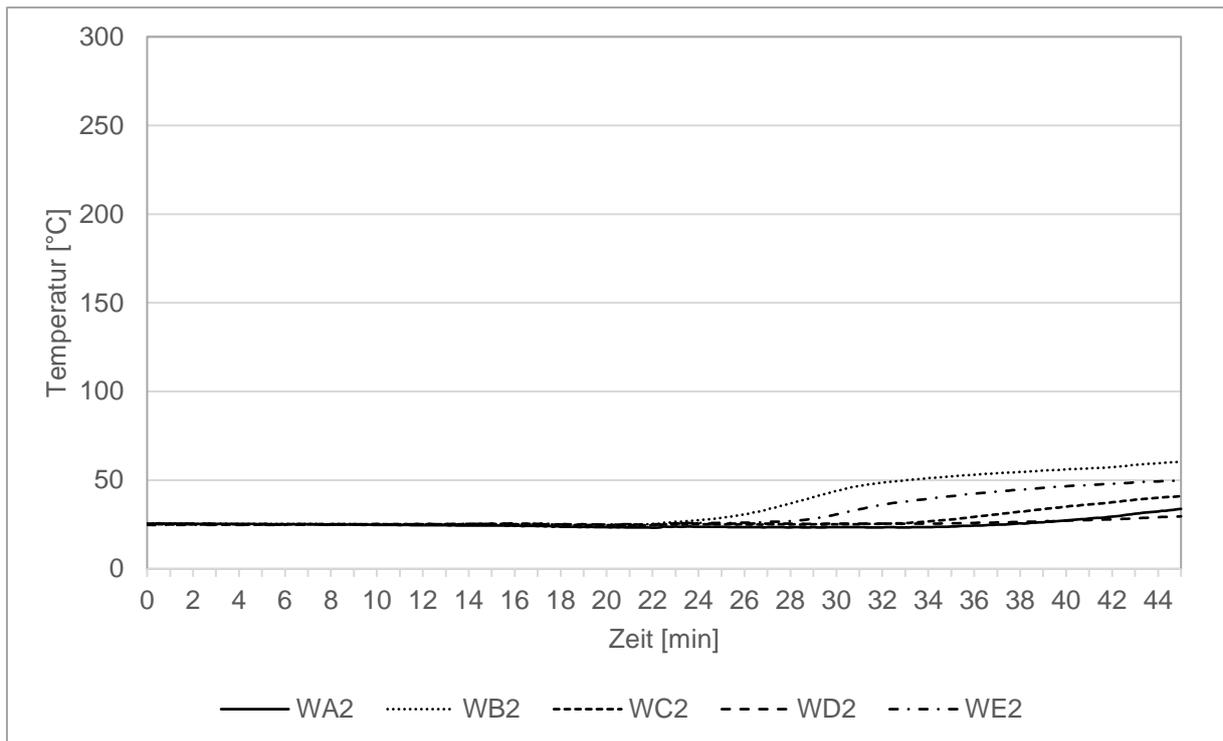


Abbildung 331: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Zellulose und der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

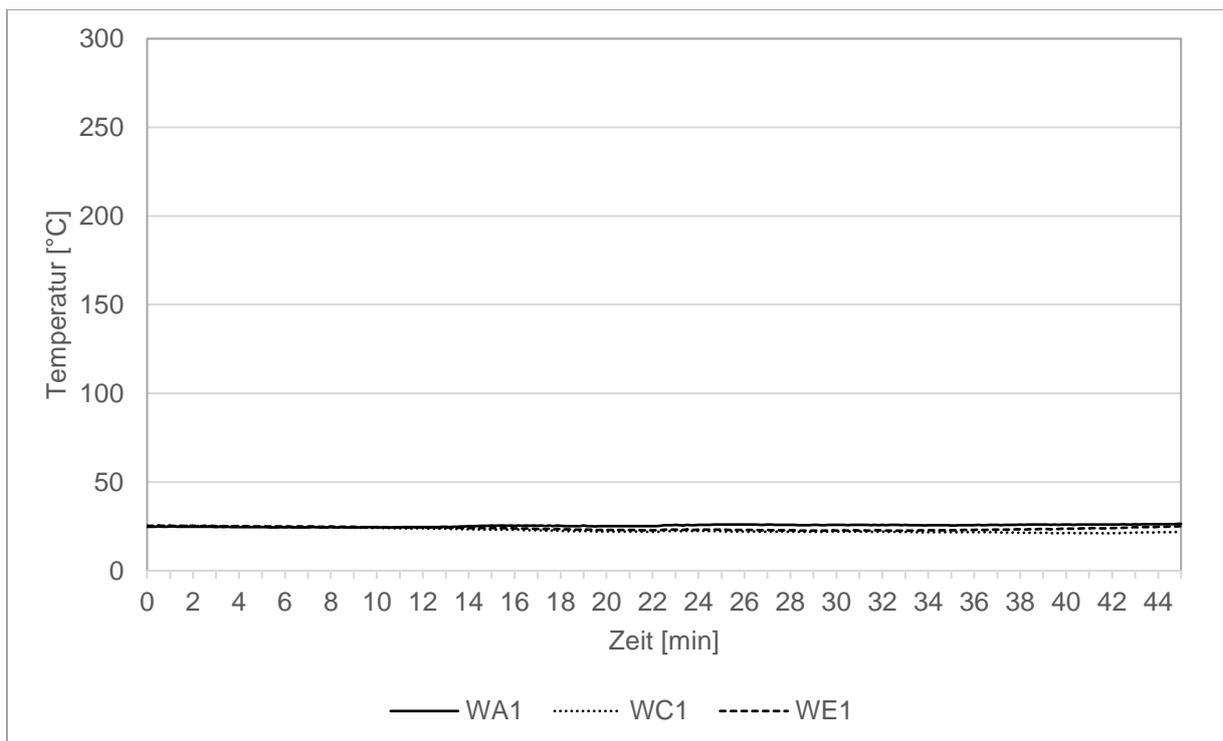


Abbildung 332: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

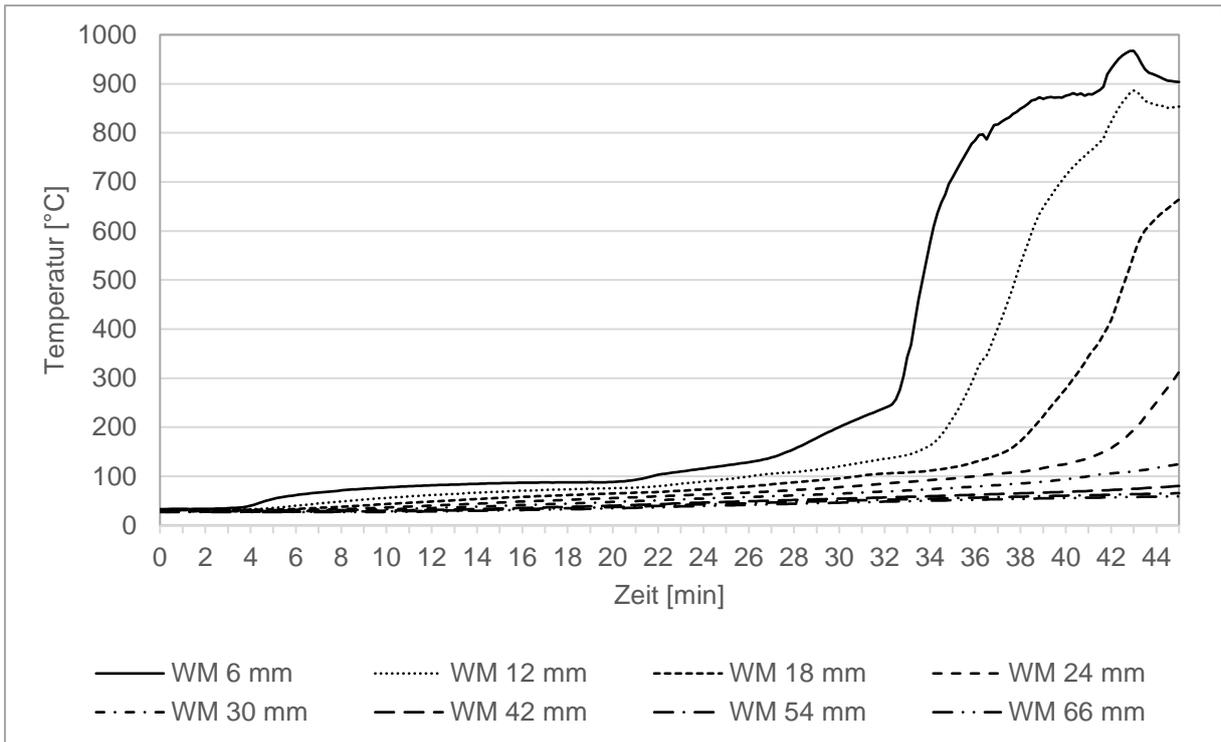


Abbildung 333: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Wand

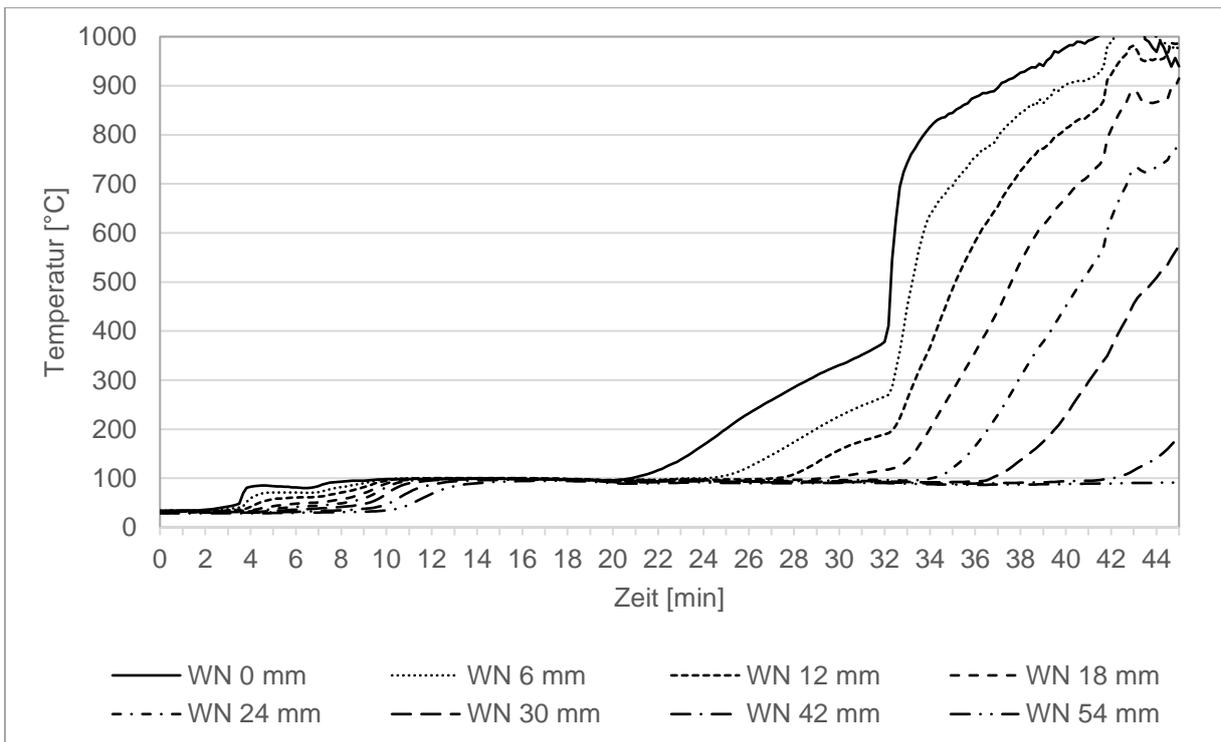


Abbildung 334: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

## Prüfkörper 12

Zeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung
10:00	Feine Haarrisse W1 ausgehend von Schraubenlöcher, die mit Conolith verschlossen sind
14:00	An allen Gefachen feine Haarrisse über gesamte Fläche
21:00	Durchbrand hinter GKF W1 Im und W2 rm
24:42	Durchbrand leichter GKF D1 Im, D2 rm und leichtes Bauchen der GKF an der Decke links und rechts an den Rändern
28:00	Wände oben und Decke langsames Bauchen und Anfängliches Versagen der GKF-Schutzkonstruktion, vgl. sichtbaren Spalt auf Fotos
31:00	Versagen Fuge vorne Decke => Mitbrand Holzfaser
33:40	deutliche Risse Wand => Bauch
36:19	W1 Hilfskonstruktion oben kaputt => Deutlich offen (nach vorne geknickt) => Mitbrand Zellulose 5-8 cm
38:00	Versagen GKF Decke 1 und Decke 2 mitte
39:00	Versagen Wand GKF oben
45:00	Abfallen Plattenreste
47:50	Keine Dämmwirkung der Decke mehr am Ständer, Dämmung komplett geschrumpft => nicht mehr anliegend
52:00	intensiver Mitbrand der Dämmstoffe
54:00	Dämmung Decke hinten rausgefallen, Versagen Hasendraht
56:00	Rauch an Decke, Brenner aus, Decke Dämmung komplett versagt
01:00:00	Abbruch geplant durch Löschen



Abbildung 335: Schwarzfärbung der Gipskartonplatten (3. Minute)



Abbildung 336: Durchbrand hinter (26. Minute)



Abbildung 337: langsames Bauchen der Wand oben und Decke (28. Minute)



Abbildung 338: Versagen der Fuge vorne an Decke und Versagen der Hilfskonstruktion (35. Minute)



Abbildung 339: Versagen der GKF Decke (38. Minute)



Abbildung 340: Versagen der GKF Wand (40. Minute)

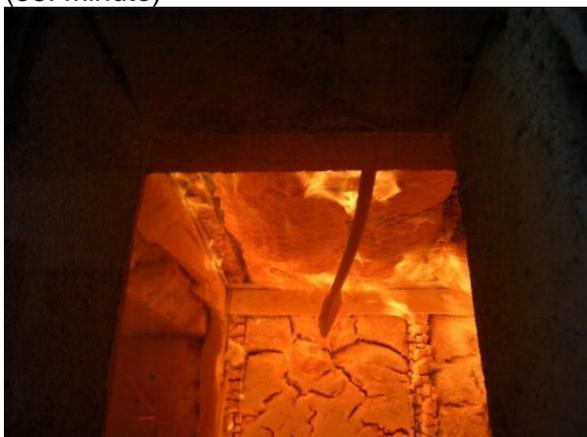


Abbildung 341: Dämmung der Decke geschrumpft, keine Dämmwirkung mehr (48. Minute)



Abbildung 342: Versagen des Hasendrahts und Herausfallen der Dämmung (59. Minute)



Abbildung 343: Versuchskörper nach Versuchsende

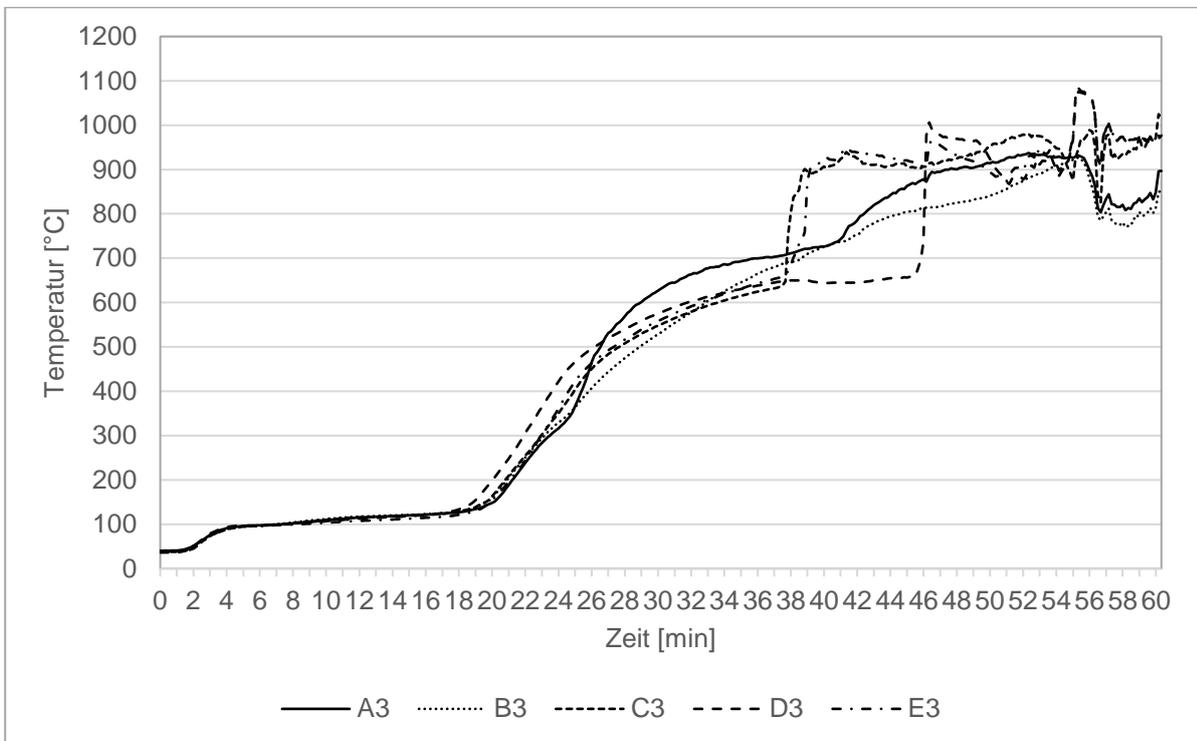


Abbildung 344: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Holzweichfaserdämmung in der Decke im Gefach 1

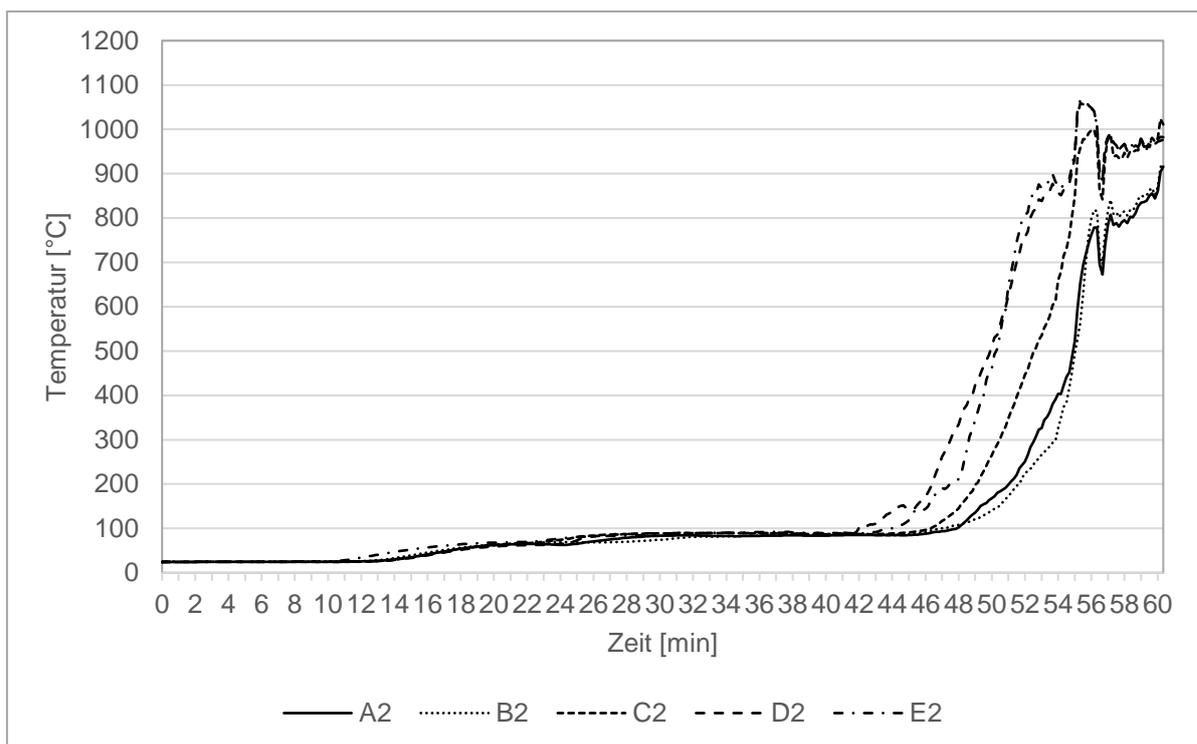


Abbildung 345: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Holzweichfaserdämmung und der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

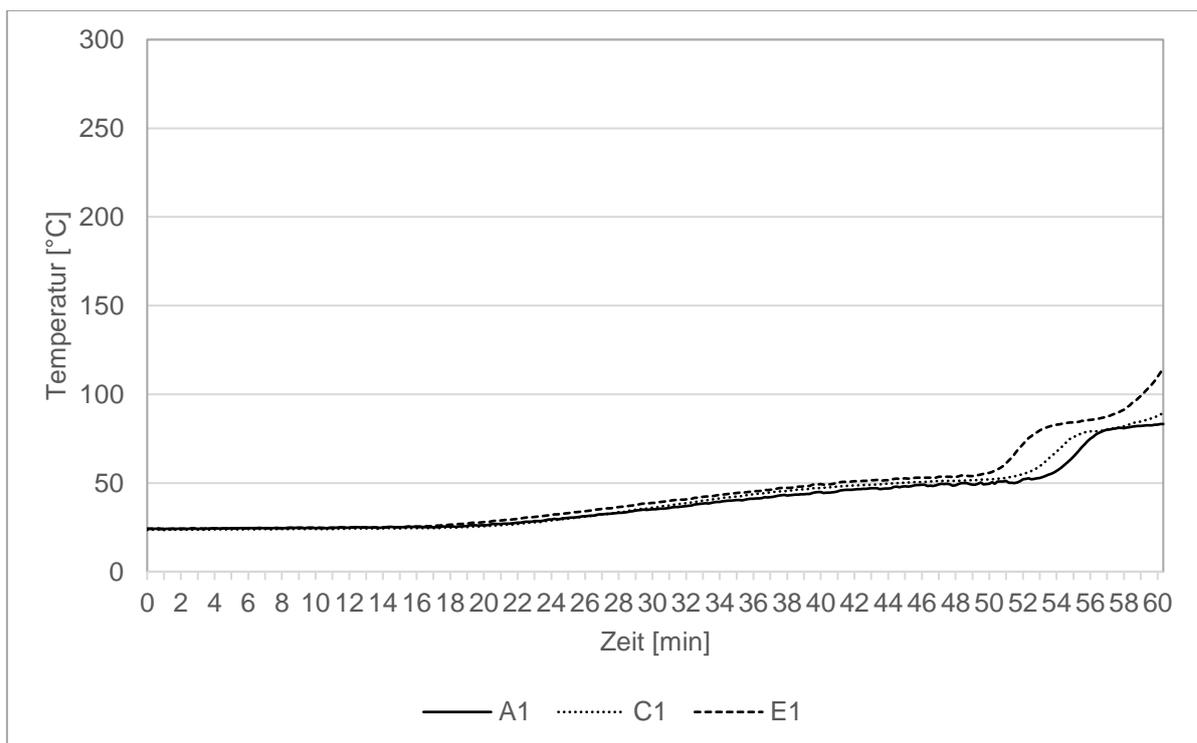


Abbildung 346: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Decke im Gefach 1

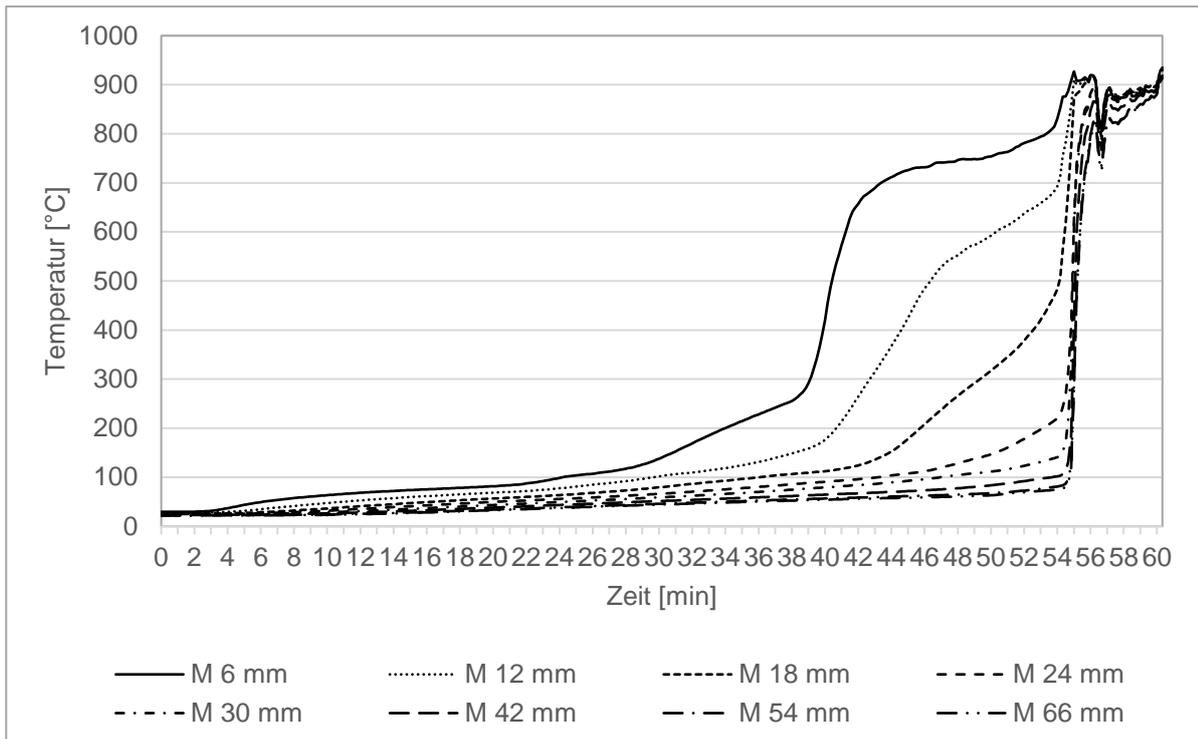


Abbildung 347: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Decke

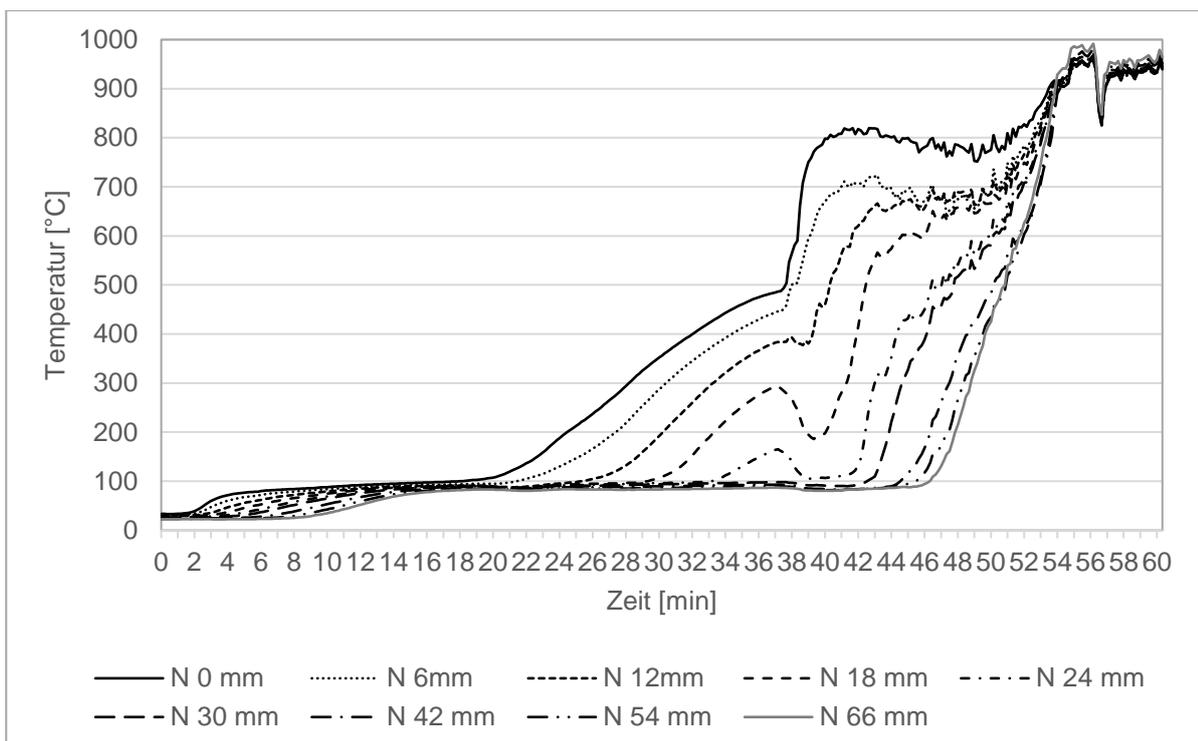


Abbildung 348: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

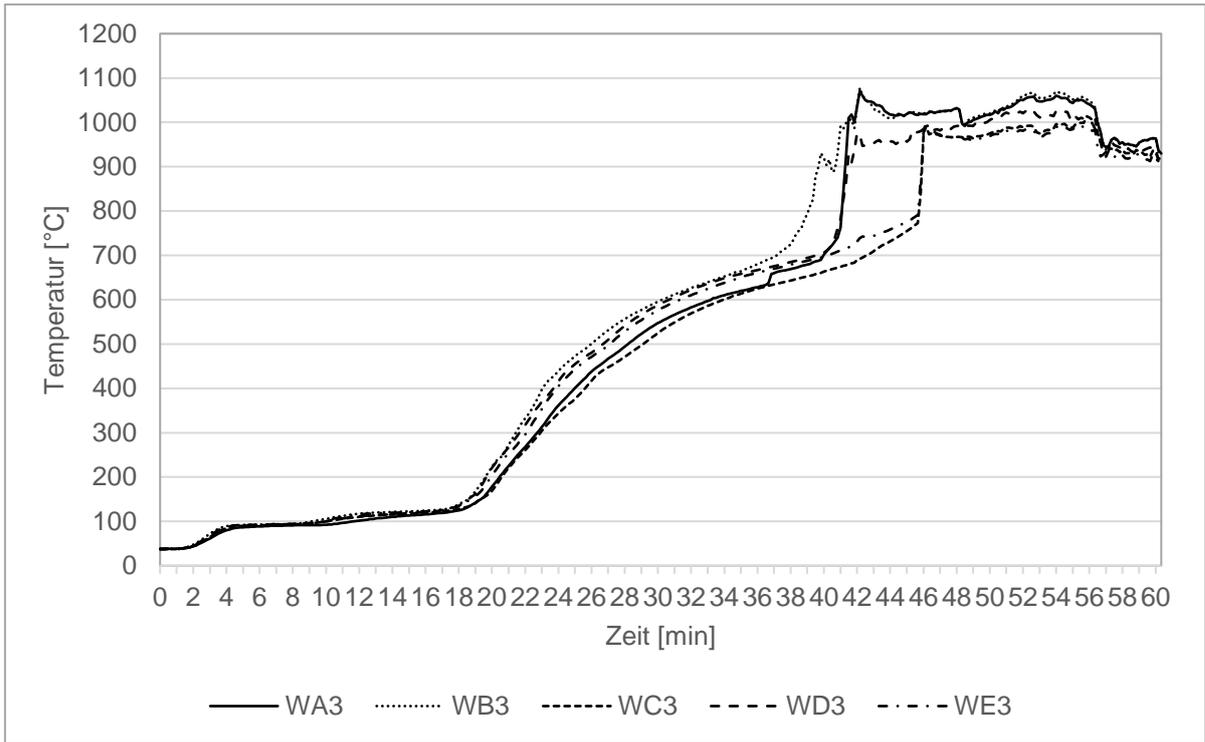


Abbildung 349: Temperaturverlauf zwischen der 15 mm Gipskartonfeuerschutzplatte und der 160 mm Zellulose in der Wand im Gefach 1

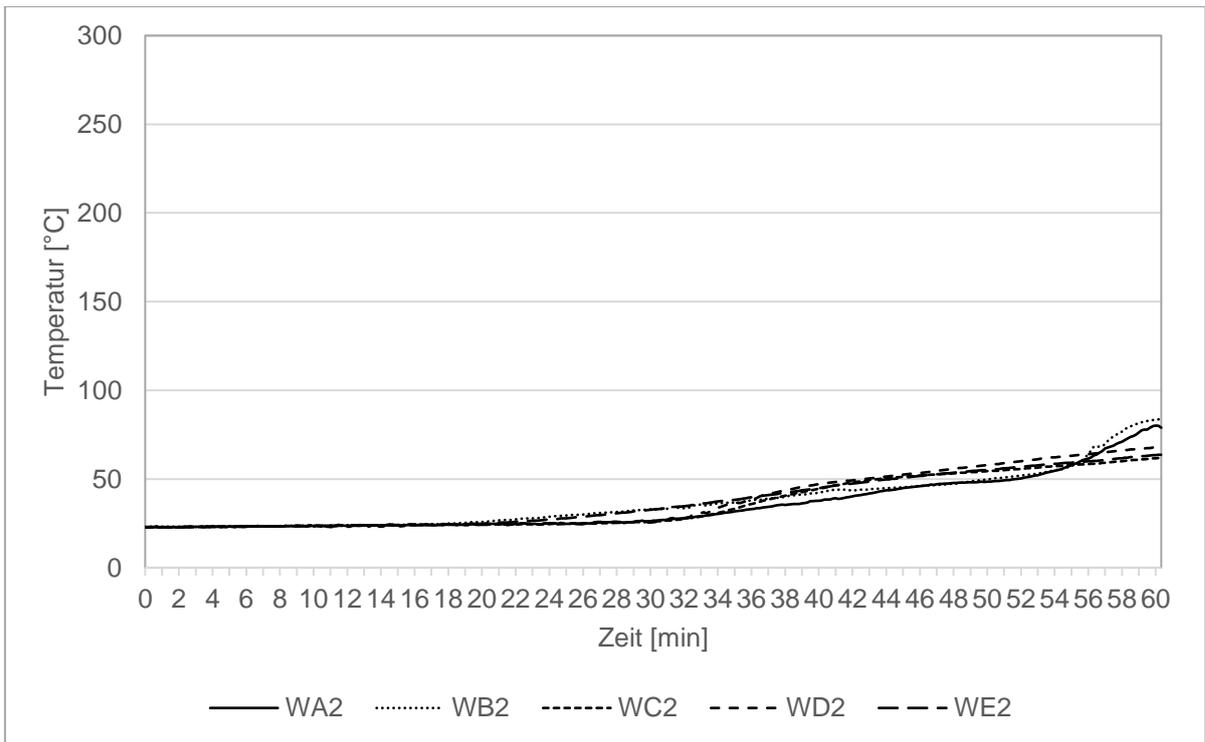


Abbildung 350: Temperaturverlauf zwischen der 160 mm Zellulose und der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

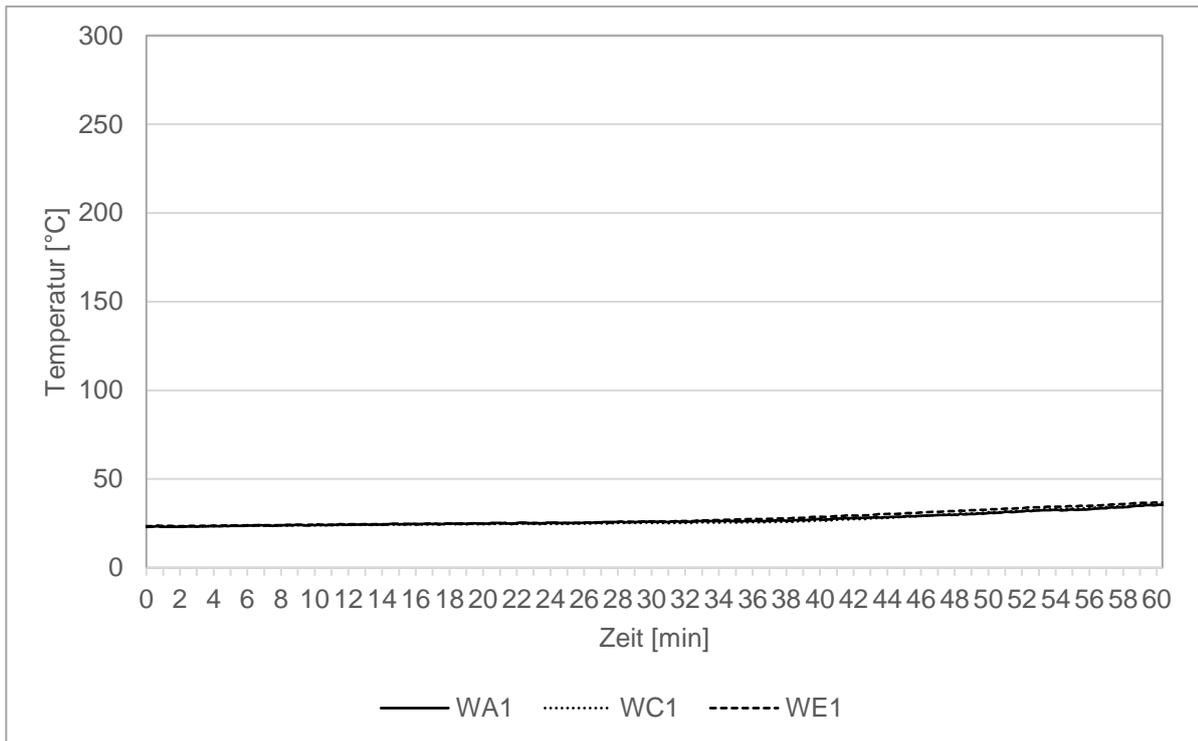


Abbildung 351: Temperaturverlauf hinter der 19 mm Spanplatte in der Wand im Gefach 1

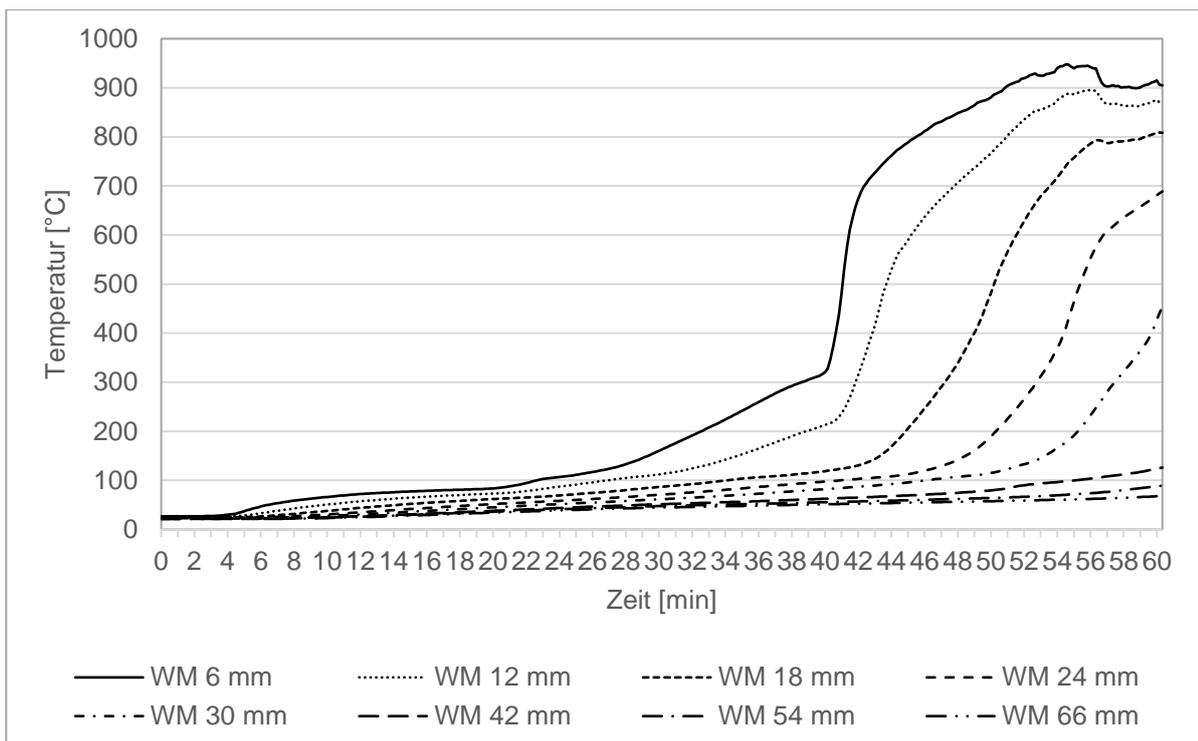


Abbildung 352: Temperaturverlauf in der Mitte des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm in der Wand

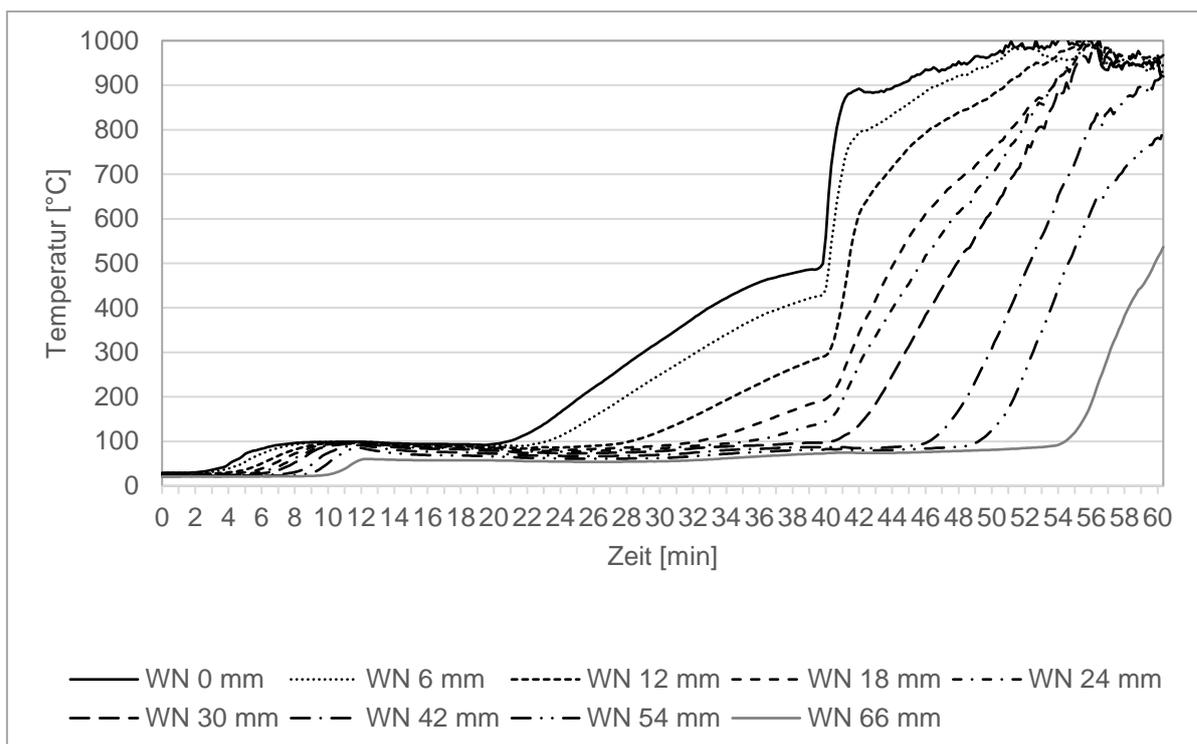


Abbildung 353: Temperaturverlauf entlang des Holzrahmens im Abstand von ca. 6-12 mm Tiefe dem Gefach 2 zugewandt in der Decke

## Anhang I Restquerschnitte aus Brandversuchen V10 – V12

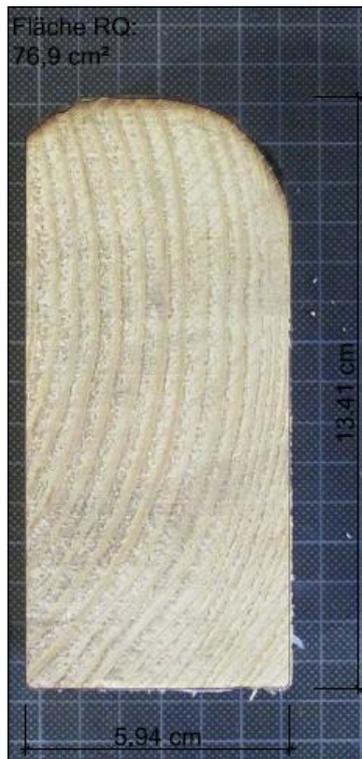


Abbildung 354: Restquerschnitt V10 Wand Mitte



Abbildung 355: Restquerschnitt V11 Wand Mitte

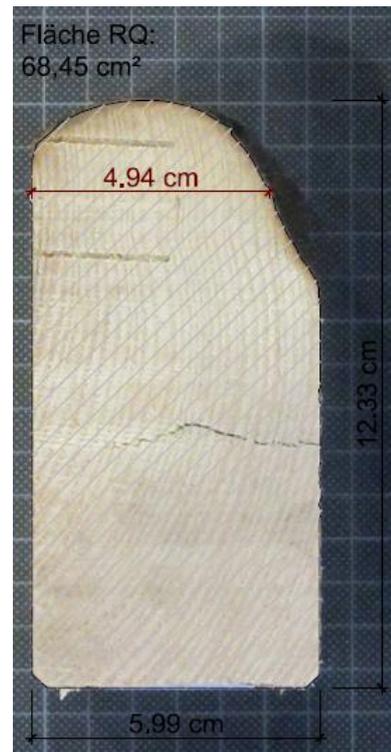


Abbildung 356: Restquerschnitt V12 Wand Mitte

In Abbildung 356 sind die Restquerschnitte der Ständer aus den Wandversuchen zu sehen. Diese Restquerschnitte wurden aus der Mitte der Ständer entnommen, wo auch die Thermoelemente zur Temperaturmessung angebracht waren. Diese Restquerschnitte bilden u.a. die Grundlage für die Auswertung der Versuche. Die Seiten der Ständer waren durch Zellulosefaser geschützt.



Abbildung 357: Restquerschnitt  
V10 Decke Mitte



Abbildung 358: Restquerschnitt V11  
Decke unten



Abbildung 359: Restquerschnitt  
V12 Decke Mitte

In Abbildung 357 - Abbildung 359 sind die Restquerschnitte der Balken aus den Deckenversuchen zu sehen. Diese Restquerschnitte der Versuche V10 und V12 wurden aus der Mitte der Ständer entnommen, wo auch die Thermoelemente zur Temperaturmessung angebracht waren. Für Versuch V11 stand nur ein Restquerschnitt zur Verfügung, der dem Dreittelpunkt des Balkens entnommen wurde. Diese Restquerschnitte bilden u.a. die Grundlage für die Auswertung der Versuche. Die Seiten der Balken waren anfänglich durch Holzfasermatten geschützt.