

Matthias Pahn, Catherina Thiele, Marcin M. Haffke

# **Sandwichtragwirkung von kerngedämmten Fertigteilwandtafeln unter Brandbeanspruchung**

F 3171

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0408-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

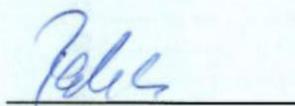


## Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

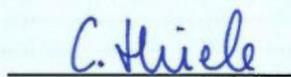
**Projekt:** Sandwichtragwirkung von kerngedämmten Fertigteilewandtafeln unter Brandbeanspruchung  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.25)  
Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

**Bearbeiter:** Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn  
apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele  
Marcin M. Haffke, M.Sc.Eng.

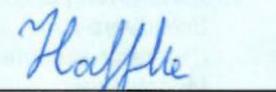
**Datum:** 31.07.2019



Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn



apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele



Marcin M. Haffke, M.Sc.Eng.

Dieser Bericht umfasst 160 Seiten.

Die gekürzte oder auszugsweise Wiedergabe oder Vervielfältigung dieses Berichts bedarf der Genehmigung des Fachgebiets Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Ausgangssituation und Zielsetzung des Forschungsprojekts .....	4
3.	Das europäische und nationale Klassifizierungssystem im Brandschutz.....	4
3.1.	Feuerwiderstandsklassen.....	5
3.2.	Brandverhalten von Baustoffen und Bauprodukten .....	6
4.	Brandwände im Brandschutz .....	7
4.1.	Definition und Anforderungen.....	7
4.2.	Anforderungen an den Brandschutz und die statische Funktion .....	9
4.3.	Klassifizierungsvorgang von Brandwänden .....	10
4.4.	Konstruktive Regeln für Brandwände.....	11
4.5.	Regeln für die Ausführung von Fugen.....	12
4.6.	Bauverordnungen und Baurichtlinien .....	13
4.7.	Sandwichwände aus bewehrten Beton .....	14
4.8.	Sandwichtragwirkung .....	15
4.9.	Sandwichwände als Brandwände .....	16
5.	Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens .....	17
5.1.	Einsatz einer Sandwichwand als Brandwand .....	17
5.2.	Reduktion der Tragschalendicke durch den Ansatz der Sandwichtragwirkung .....	17
5.3.	Erstellung eines Klassifizierungskonzeptes .....	18
5.4.	Literaturrecherche zu Brandverhalten von Sandwichwänden und Brandwänden .....	18
6.	Großbrandversuche.....	22
6.1.	Motivation .....	22
6.2.	Versuchsprogramm .....	24
6.3.	Beschreibung der geprüften Konstruktion und des Versuchsaufbaus .....	26
6.3.1.	Beschreibung des Versuchskörpers .....	26
6.3.2.	Herstellung des Versuchskörpers .....	27
6.3.3.	Prüfanordnung und Versuchsdurchführung .....	28
6.3.4.	Belastung .....	29
6.3.5.	Messtechnik .....	30
6.4.	Prüfergebnisse nach Klassifizierungskriterien .....	31
6.5.	Vertikales Verformungsverhalten .....	32
6.6.	Horizontales Verformungsverhalten .....	33
6.7.	Wärmeübertragung.....	34
6.8.	Brandverhalten der Kernschicht .....	37
6.9.	Bewertung der Sandwichtragwirkung im Brandfall.....	41
6.10.	Zusammenfassung .....	44
7.	Kleinbrandversuche an Sandwichwandquerschnitten .....	46
7.1.	Einführung .....	46
7.2.	Versuchsprogramm .....	46
7.3.	Beschreibung der Probekörper .....	50
7.3.1.	Dämmmaterialien .....	51
7.3.2.	Verbindungsmitel .....	52
7.3.3.	Betondeckschichten .....	53
7.3.4.	Herstellungsprozess.....	54
7.3.5.	Konditionierung des Probekörpers.....	57
7.4.	Prüfanordnung und –durchführung .....	57
7.4.1.	Brandversuche .....	58
7.4.2.	Referenzversuche .....	59
7.4.3.	Messtechnik .....	59
7.4.4.	Prüfbeobachtungen.....	61
7.5.	Versagensbilder der Verbindungsmittel .....	62
7.5.1.	Flachanker.....	62
7.5.2.	GFK-Verbindungsmittel.....	63
7.5.3.	Mineralwolldämmstoff .....	66
7.5.4.	EPS Dämmung .....	66

7.6.	Prüfergebnisse .....	67
7.6.1.	Tastversuchsreihe und Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit .....	67
7.6.2.	Prüfergebnisse der Gruppe E-D .....	68
7.6.3.	Prüfergebnisse der Gruppe E-F .....	69
7.6.4.	Prüfergebnisse der Gruppe E-P .....	71
7.6.5.	Prüfergebnisse der Gruppe M-D .....	72
7.6.6.	Prüfergebnisse der Gruppe M-F .....	74
7.6.7.	Prüfergebnisse der Gruppe M-P .....	75
7.6.8.	Analysen und Vergleich verschiedener Gruppen .....	77
7.7.	Brandverhalten der Kernschichten einer Sandwichwand im Brandfall .....	79
8.	Auswirkung des Brandverhaltens der Kernschichten auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand .....	83
8.1.	Analyse der Wärmeübertragung in einer Sandwichwand im Brandfall .....	83
8.2.	Kernschichteigenschaften und Feuerwiderstand einer Sandwichwand .....	88
8.3.	Nachrechnung von Großversuche .....	92
9.	Vorschlag eines Klassifizierungskonzeptes .....	96
10.	Zusammenfassung .....	102
11.	Empfehlungen für die Praxis und Ausblick .....	104
12.	Literaturverzeichnis .....	106
Anhang A:	Großbrandversuche an Sandwichwänden .....	111
Anhang B:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-D .....	119
Anhang C:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-F .....	124
Anhang D:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-P .....	129
Anhang E:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-D .....	135
Anhang F:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-F .....	140
Anhang G:	Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-P .....	146
Anhang H:	Tagungsbeitrag .....	152

## **1. Einleitung**

Außenwände werden zunehmend als Betonfertigteile mit innen liegender Wärmedämmung hergestellt. Durch eine immer dichtere Bebauung kommt es zunehmend zu Situationen, in denen wegen des geringen Abstands zu benachbarten Gebäuden oder infolge des Anbaus von neuen Gebäudeteilen eine Sandwichwand als Brandwand dienen soll. Fehlende Erkenntnisse und bestehende baurechtliche Anforderungen verhindern den kosteneffizienten Einsatz von Sandwichwänden zum passiven Brandschutz von Gebäuden.

Die mehrschichtigen Sandwichwandtafeln werden aus zwei Stahlbetondeckschichten und einer, aus einer Wärmedämmschicht und Verbindungsmitteln bestehenden, Kernschicht aufgebaut. Brandwände, die dazu bestimmt sind, die Ausbreitung von Feuer und Brandgasen auf andere Gebäude oder Gebäudeabschnitte zu verhindern, sollen eine Vielzahl von Anforderungen gemäß der Musterbauordnung erfüllen. Um eine Sandwichwand als Brandwand klassifizieren zu können fehlen bisher die Erkenntnisse über ihr Brandverhalten unter Berücksichtigung der Verbindungsmittel, der Dämmschicht und der Vorsatzschale.

Der folgende Bericht beschreibt die Arbeiten und Ergebnisse zum Forschungsprojekt "Sandwichtragwirkung von kerngedämmten Fertigteilwandtafeln unter Brandbeanspruchung" im Bearbeitungszeitraum von Juni 2017 bis Juli 2019.

## **2. Ausgangssituation und Zielsetzung des Forschungsprojekts**

Ein wesentlicher Teil des passiven vorbeugenden Brandschutzes von Gebäuden bildet die konstruktive bauliche Ausführung. Die baulichen Anforderungen an Gebäude und Gebäudeteile werden hinsichtlich ihres Brandschutzes durch die Musterbauordnung, die europäischen sowie deutschen Normen definiert. Bei dem Entwurf von vorgefertigten Sandwichwänden, die einen gewissen Feuerwiderstand aufweisen bzw. die Funktion einer Brandwand übernehmen sollen, müssen alle relevanten Regeln und Empfehlungen beachtet werden. Um die rechtlichen Bedingungen klären zu können muss das wirkliche Tragverhalten von Sandwichwänden unter einer Brandbeanspruchung erforscht werden. Dazu ist die vorhandene Literatur deutlich begrenzt. Folgend wird die Literaturrecherche hinsichtlich der Nutzbarkeit von Sandwichwänden als Brandwand und ihr Tragverhalten unter Brandbeanspruchung, im konstruktiven und rechtlichen Sinn vorgestellt.

## **3. Das europäische und nationale Klassifizierungssystem im Brandschutz**

Die in den jeweiligen Landesbauordnungen (die in unterschiedlichem Ausmaß auf der Musterbauordnung basieren) definierten Brandschutzanforderungen an Gebäude beziehen sich, hinsichtlich des Einsatzes von Sandwichwänden als Brandwände, auf das Brandverhalten einzelner Baustoffe sowie den Feuerwiderstand ganzer Bauteile. Grundlegende Anforderungen des baulichen Brandschutzes sowie die Beschreibung von Baustoffklassen und Feuerwiderstandsklassen ergeben sich aus DIN 4102-1 [1] und DIN 4102-2 [2]. Die europäische Norm die sich mit dem Brandschutzklassifizierungssystem befasst ist als DIN EN 13501-1 [3] und DIN EN 13501-2 [4] erschienen und wurde durch die Veröffentlichung in der Bauregelliste 2015/2 [5] in das deutsche Baurecht eingeführt worden. Für einige Länder (Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz, Saarland und Schleswig-Holstein [6]) wurde die Bauregelliste aufgehoben und die entsprechenden Bestimmungen der Bauregelliste in die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) [7] überführt. In der Bauregelliste [5] bzw. in der MVV TB Teil A [7] erfolgt die Zuordnung der Klassen zu den bauaufsichtlichen Anforderungen an den Brandschutz.

### 3.1. Feuerwiderstandsklassen

Die Feuerwiderstandsklassen geben an, wie viele Minuten ein Bauteil – in diesem Fall eine Wand, einem Feuer standhält.

Die Klassifizierung regelt in Deutschland gleichberechtigt die deutsche Norm DIN4102-2: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen [2]* und die europäische Norm *DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen [4]*.

Nach DIN EN 13501-2 [4] können tragende Bauteilen mit raumabschließender Funktion in Feuerwiderstandsklassen „Brandwand“ REI-M 30, 60, 90, 120, 180, 240 klassifiziert werden. Die wichtigsten Bezeichnungen einschließlich Erläuterungen zum Anwendungsbereich sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Erläuterungen der Klassifizierungskriterien und den zusätzlichen Angaben zur Klassifizierung des Feuerwiderstands nach DIN EN 13501-1 und DIN EN 13501-2

Herleitung des Kurzzeichens	Kriterium	Anwendungsbereich
R (Résistance)	Die <b>Tragfähigkeit</b> – ist die Fähigkeit des Bauteils, unter festgelegter mechanischer Einwirkung einer Brandbeanspruchung auf einer oder mehreren Seite(n) ohne Verlust der Standsicherheit für die angegebene Dauer zu widerstehen.	Zur Beschreibung der Feuerwiderstandsfähigkeit
E (Étanchéité)	Der <b>Raumabschluss</b> - ist die Fähigkeit eines Bauteils, der Beanspruchung eines nur an einer Seite angreifenden Feuers so zu widerstehen, dass ein Feuerdurchtritt zur unbeflammten Seite als Ergebnis des Durchtritts von Flammen oder heißer Gase verhindert wird. Diese würden sonst die Entzündung der dem Feuer abgekehrten Oberfläche des Bauteils oder in der Nähe dieser Oberfläche befindliche Materialien verursachen.	
I (Isolation)	Die <b>Wärmedämmung</b> - ist die Fähigkeit eines Bauteils, einer einseitigen Brandbeanspruchung ohne den Übertrag von Feuer infolge eines signifikanten Wärmetransportes von der dem Feuer zugekehrten Seite zu der vom Feuer abgewandten Seite zu widerstehen. Die Übertragung muss so begrenzt sein, dass weder die vom Feuer abgewandte Oberfläche noch Materialien in der Nähe dieser Oberfläche entzündet werden. Das Bauteil muss außerdem ein so großes Hindernis für die Wärmeeinwirkung darstellen, dass in der Nähe befindliche Personen geschützt werden.	
M (Mechanical)	Mechanische Einwirkung auf Wände (Stoßbeanspruchung)	
Zusätzliche Angaben zur Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen nach DIN EN 13501-1		
s (smoke)	Rauchentwicklung	Anforderung an die Rauchentwicklung
d (droplets)	Brennendes Abtropfen/Abfallen	Anforderung an das brennende Abtropfen/Abfallen

Die in Deutschland verwendete Klasse von Brandwänden ist die Klasse REI-M 90. Ein raumabschließendes tragendes Bauteil mit der Klassifizierung REI 90, muss der Brandbeanspruchung während der Prüfung mindestens 90 Minuten standhalten und die Kriterien E – Raumabschluss – und I – Wärmedämmung – erfüllen, um die Übertragung von

Feuer und Rauch in andere Nutzungseinheiten zu verhindern. Das Bauteil muss so widerstandsfähig sein, dass Flammen und Gase nicht durchtreten können. Die feuerabgekehrte Seite darf sich nicht derartig erwärmen, dass sich dort befindliche Materialien entzünden können. Das Kriterium M kennzeichnet die Fähigkeit des Bauteils, einer Stoßbeanspruchung

durch herabfallende andere Bauteile zu widerstehen. DIN EN 13501-1 [3] definiert dabei brennendes Abtropfen/Abfallen als Situation in welcher ein Material, das sich während einer Brandprüfung von der Probe löst und für eine Mindestdauer, die in dem Prüfverfahren angegeben ist, weiter brennt.

### 3.2. Brandverhalten von Baustoffen und Bauprodukten

Das Klassifizierungsverfahren des Brandverhaltens von Bauprodukten einschließlich der Produkte innerhalb von Bauteilen ist auf nationaler Ebene nach DIN 4102-1 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ [1] bzw. auf europäischer Ebene nach DIN EN 13501-1 [3] „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“ festgelegt. Die Norm DIN EN 13501-2 [4] spezifiziert das Verfahren zur Klassifizierung von Bauprodukten und Bauteilen anhand der Ergebnisse von Feuerwiderstandsprüfungen und Prüfungen zur Rauchdichtheit. Baustoffe und Bauteile werden nach ihrem Brandverhalten in unterschiedliche Baustoffklassen eingeteilt, die beschreiben, ob ein Baustoff überhaupt brennt und wenn ja, ob er leicht oder schwer entflammbar ist. In der Klassifizierung werden zwei Eigenschaften, die im Brandfall von großer Bedeutung sind, berücksichtigt; die Rauchentwicklung und das Abtropfen der Baustoffe. In Tabelle 2 sind die Baustoffklassen aufgeführt, welche zur Gewährleistung des in Deutschland geltenden Sicherheitsniveaus mindestens einzuhalten sind.

Tabelle 2: Klassifizierung des Brandverhaltens nach DIN EN 13501-1

Bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 1350-1
	Kein Rauch	Kein brennbares Abfallen/Abtropfen	
Nicht brennbar	X	X	A1
	X	X	A2 -s1 d0
Schwer entflammbar	X	X	B, C -s1 d0
		X	B, C -s3 d0
	X		B, C -s1 d2
			B, C -s3 d2
Normal entflammbar		X	D -s3 d0
			D -s3 d2
			E -d2
Leicht entflammbar			F

Die Klassifizierungen nach DIN 4102 und DIN EN 13501 sind nicht direkt aufeinander übertragbar. Nach der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen Teil C des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt können allerdings den bauaufsichtlichen Benennungen (nicht brennbar, schwer entflammbar, normal entflammbar und leicht entflammbar) sowohl die europäischen als auch die nationalen Bezeichnungen zugeordnet werden.

## 4. Brandwände im Brandschutz

### 4.1. Definition und Anforderungen

Die Musterbauordnung [8] (MBO) definiert grundsätzliche Anforderungen an Brandwände. Die enthaltenden Vorschriften werden in der Regel durch die Landbauordnung des jeweiligen Bundeslandes übernommen. Laut MBO begrenzen Brandwände einzelne Brandabschnitte (siehe Abbildung 1). Sie sind dazu bestimmt, die Ausbreitung von Feuer und Brandgasen auf andere Gebäude oder Gebäudeabschnitte zu verhindern. Brandwände müssen unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung feuerbeständig sein und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Die Brandwände sind in folgenden Fällen von Bedeutung:

- Für die bauliche Trennung zwischen zwei Bereichen unterschiedlicher Nutzung oder unterschiedlicher Brandschutzanforderungen.
- Als Ersatz für räumlichen Abstand zu anderen Gebäuden oder Lagern im Freien.

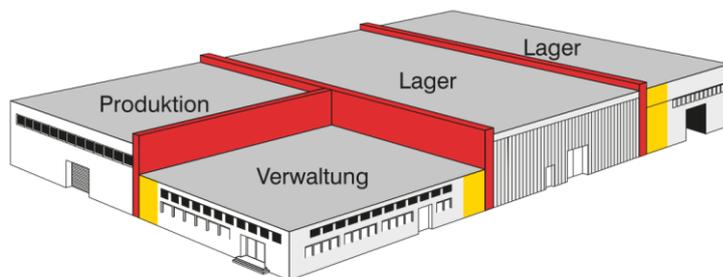


Abbildung 1: Brandwände zwischen Bereichen unterschiedlicher Nutzung (VdS 2234)

Tragende Brandwände einschließlich aussteifender Bauteile müssen zumindest der Feuerwiderstandsklasse REI 90-M nach DIN EN 1363-2 [9] sowie F90 nach DIN 4102-2 [2] entsprechen. Sie verhindern eine Brandausbreitung durch Flammeneinwirkung, Wärmeleitung und durch Brandgase für mindestens 90 Minuten. Sie behalten Ihre Tragfähigkeit auch bei einer dreimaligen Stoßbeanspruchung von 3000 Nm und wahren den Raumabschluss im Sinne von DIN 4102-2 [2].

Im Weiteren, werden für Sonderbauten die Anforderungen an den Brandschutz in gesonderten Richtlinien und Verordnungen geregelt, wie z. B.:

- *Muster-Industriebau-Richtlinie* MIndBauRL 2014 [10]
- *Musterbauordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten* MVKVO 1995 [11]
- *Musterbauordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten* MVStättV 2005 [12]

Die Muster-Industriebau-Richtlinie [10] (MIndBauRL) schreibt vor, in welchen Situationen die Brandwände anzuordnen sind.

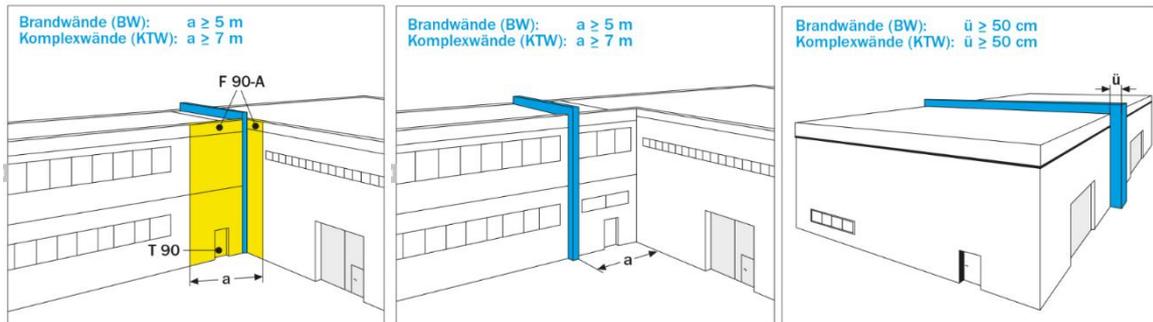


Abbildung 2: Anforderungen an die Positionierung von Brandwänden

„Im Bereich der Außenwände ist durch geeignete Maßnahmen eine Brandübertragung auf andere Brandabschnitte und Brandbekämpfungsabschnitte zu verhindern (MIndBauRL 5.10.3).

Geeignete Maßnahmen sind z. B.:

- Ein mindestens 0,5 m vor der Außenwand vorstehender Teil der Brandwand oder der Wand, die Brandbekämpfungsabschnitte trennt, der einschließlich seiner Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen besteht,
- Ein im Bereich der Brandwand oder der Wand, die Brandbekämpfungsabschnitte trennt, angeordneten Außenwandabschnitt mit einer Breite von mindestens 1,0 m, der einschließlich seiner Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen besteht.“

„Anstelle einer inneren Brandwand sind zwei sich gegenüberstehende raumabschließende, feuerbeständige Wände aus nichtbrennbaren Baustoffen zulässig. Sie müssen voneinander unabhängig standsicher sein. Die diese Wände unterstützenden oder aussteifenden Bauteile sind mit der gleichen Feuerwiderstandsdauer auszuführen wie die tragenden Bauteile des zugeordneten Brandabschnitts.“ (MIndBauRL 5.10.4).

„Müssen Gebäude oder Gebäudeteile, die über Eck zusammenstoßen, durch eine Brandwand oder eine Wand, die Brandbekämpfungsabschnitte trennt, abgeschlossen oder unterteilt werden, so muss die Wand über die innere Ecke mindestens 5,0 m hinausragen. Dies gilt nicht, wenn die Gebäude oder Gebäudeteile in einem Winkel von mehr als 120° über Eck zusammenstoßen.“ (MIndBauRL 5.10.6), (siehe Abbildung 2).

Laut MIndBauRL [10] dürfen Sandwichelemente als nichttragende Außenwände eingesetzt werden, wenn sie so ausgebildet sind, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen begrenzt ist. Dabei ist auf die Anforderungen der Musterbauordnung MBO verwiesen. Beim Einsatz von schwerentflammenden Baustoffen sind weitere Bedingungen bezüglich der Gebäudegröße bzw. Höhe und Funktion gegeben. Dabei dürfen sie nicht brennend abfallen oder abtropfen. Wenn der Abstand der Außenwände zur Grundstücksgrenze weniger als 5 m beträgt, dürfen nur nichtbrennbare Baustoffe eingesetzt werden.

Nach MVKVO 1995 [11] dürfen die Außenwände und eingesetzten Dämmstoffe von erdgeschossigen Verkaufsstätten und von Verkaufsstätten mit Sprinkleranlagen (soweit sie nicht feuerbeständig sind) nur aus mindestens schwerentflammenden Baustoffen soweit sie nicht feuerbeständig sind, bestehen. Bei sonstigen Verkaufsstätten ohne Sprinkleranlagen dürfen nur nichtbrennbare Baustoffe eingesetzt werden.

Nach MVStättV 2005 [12] bei Versammlungsstätten, die mehr als 200 Besucher fassen, dürfen die Außenwände und eingesetzten Dämmstoffe nur aus nichtbrennbaren Baustoffen

bestehen. Die in manchen Fällen zulässigen schwerentflammbaren Baustoffe dürfen nicht brennend abtropfen. Tragende und aussteifende Wände müssen feuerbeständig und in erdgeschossigen Versammlungsstätten feuerhemmend sein (soweit keine Feuerlöschanlagen eingesetzt werden).

Im Grundprinzip ist erkennbar, dass mit wachsenden Gebäudeabmessungen die Forderungen an den Brandschutz erhöht werden - Klingsohr 1986 [13].

#### 4.2. Anforderungen an den Brandschutz und die statische Funktion

Sandwichwände können sowohl als tragende als auch nichttragende Außen- und Innenwände eingesetzt werden. In beiden Fällen ist die Übernahme der Funktionen einer Brandwand durch die Sandwichwände von Bedeutung. Die MBO stellt je nach Gebäudeklasse, also entsprechender Gebäudehöhe und Größe der Nutzungseinheiten, unterschiedliche Brandschutzanforderungen an die Bauteile. Sie unterscheidet dabei zwischen folgenden Anforderungen:

- feuerhemmend
- hochfeuerhemmend
- feuerbeständig

Raumabschließende tragende Wände und Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten müssen nach MBO 2016 [8] wärmedämmend sein. Sie müssen daher die Anforderungen der Klasse REI mit der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer erfüllen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Bauaufsichtliche Anforderungen zur Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen nach Bauregelliste sowie MVV TB – Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 und DIN EN 13501-2

Bauaufsichtliche Benennung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände	Doppelböden	Selbständige Unterdecken
	ohne Raumabschluss	mit Raumabschluss				
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) und EI 30-ef (i←o)	REI 30	EI 30(a↔b)
hochfeuerhemmend	R60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) und EI 60-ef (i←o)		EI 60(a↔b)
feuerbeständig	R90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) und EI 90-ef (i←o)		EI 90(a↔b)
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Min.	R120	REI 120	-	-		-
Brandwand	-	REI 90 -M	EI 90 -M	-		-

Tragende Brandwände müssen der Klasse REI-M 90 entsprechen. Nichttragende Innenwände müssen die Anforderungen der Klasse EI mit der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer erfüllen. Nichttragende Brandwände müssen der Klasse EI-M 90 entsprechen.

An Bauteile mit unterschiedlicher statischer Funktion werden unterschiedliche konstruktive Anforderungen gestellt. Die in statischen Berechnungen ermittelte Bewehrung, muss bei tragenden und nichttragenden Stahlbetonbrandwänden einen Mindestachsabstand von der Oberfläche des Bauteils einhalten. Für unbewehrte Betonbrandwände ist diese Anforderung nicht mehr gültig.

Beim Nachweis des Feuerwiderstandes anhand der DIN 4102-4 [14] und der DIN EN 1992-1-2 [15] müssen Brandwände die in Tabelle 4 aufgelisteten Anforderungen erfüllen.

Tabelle 4: Anforderungen an Brandwanddicke nach DIN 4102-4

	Konstruktionsmerkmale	Zulässige Mindestdicke d (cm)	Maximale Schlankheit
1.	Unbewehrter Beton	20,0	40
2.	Bewehrter Beton - nichttragend	14,0	
3.	Bewehrter Beton - tragend	12,0	

Die statische Funktion des Bauteils soll bei den Brandversuchen zur Klassifizierung berücksichtigt werden. Während der Brandversuche, nach DIN EN 1363-1 [16], an einer tragenden Wand ist eine vertikale Belastung zu berücksichtigen, was im Wesentlichen den Ablauf und das Ergebnis eines Brandversuchs beeinflussen kann.

Ebenso wichtig sind außer den Anforderungen an Mindestdicken der Betonschalen und positiven Ergebnisse der Brandversuche folgende Randbedingungen:

- Anschluss an die tragenden Bauteile
- Fugenausbildung sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Lage und
- Anschluss an Wand- und Deckenkonstruktionen

#### 4.3. Klassifizierungsvorgang von Brandwänden

##### Nachweis des konstruktiven Brandschutzes

Im Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-2 [15]) sind Nachweise des konstruktiven Brandschutzes im Rahmen des Standsicherheitsnachweises definiert. Ein anforderungsgerechter Feuerwiderstand einer Stahlbetonwand kann mit den Zahlenwerten aus Tabelle 5.3 in DIN EN 1992-1-2 [15] und den konstruktiven Regeln nachgewiesen werden.

Die wesentlichen Parameter für die Einstufung in eine Feuerwiderstandsklasse sind:

- Mindestdicke
- Achsabstand der Bewehrung

Die Anforderungen hinsichtlich des Raumabschlusses (Kriterien E und I) dürfen als erfüllt angesehen werden, wenn die Mindestdicke von Wänden in Tabelle 5.3 (DIN EN 1992-1-2 [15]) eingehalten werden.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit (Kriterium R) sind in den Tabellen die Mindestforderungen bezüglich der Querschnittsabmessungen und Achsabstand der Bewehrung derart festgelegt, dass gilt:

$$\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi}} \leq 1,0$$

Dabei ist:

$E_{d,fi}$  - Bemessungswert der Schnittgrößen beim Brand

$R_{d,fi}$  - Bemessungswert der Tragfähigkeit (Widerstand) beim Brand

Die Achsabstände  $a$  zu einem Bewehrungsstab, -draht oder einer Bewehrungslitze sind Nennmaße. Toleranzen brauchen nicht zusätzlich berücksichtigt zu werden. Der Mindestachsabstand jedes einzelnen Stabes darf nicht kleiner sein als derjenige für R 30 bei einer einlagigen Bewehrungsführung. DIN EN 1992-1-2 [15] stellt Anforderungen an die tragenden und nichttragenden Brandwände aus Beton und gibt die Werte von Mindestdicken und Achsabstände der Bewehrung.

#### Brandversuche für die Klassifizierung von Brandwänden

Der Feuerwiderstand eines Bauteils kann mittels Brandversuchen bestimmt werden. Bei Brandprüfungen gilt der Feuerwiderstand des Bauteils als nicht erfüllt, wenn nur einer der drei vorher genannten Kriterien nicht mehr zutrifft: Tragfähigkeit, Raumabschluss oder Wärmedämmung. Die europäischen Normen definieren zusätzlich zwei Leistungskriterien für Bauteile: Strahlungsdurchtritt  $W$  (Verhinderung eines Strahlungsdurchtritts) und Stoßbeanspruchung  $M$ . Die zusätzliche in den Prüfungen aufgebrachte Stoßbeanspruchung soll dabei im Brandfall einstürzende Bauteile (Deckenbereiche oder Hochregallager) simulieren.

#### 4.4. Konstruktive Regeln für Brandwände

Industrielle sowie gebietsspezifische Richtlinien beinhalten eine Reihe von konstruktiven und baulichen Anforderungen, die einen wichtigen Einfluss auf die bauliche Ausführung von Sandwichwänden haben, welche die gewisse Feuerbeständigkeit aufweisen und als Brandwände eingesetzt werden sollen. In MBO 2016 [8] sind die Bedingungen der Verbindung einer Brandwand mit Außenwänden und dem Dach eines Gebäudes beschrieben. Die Brandwände sind dann 0,30 m über die Bedachung zu führen (siehe Abbildung 3) oder in Höhe der Dachhaut mit einer beiderseits 0,50 m auskragenden feuerbeständigen Platte aus nichtbrennbaren Baustoffen abzuschließen. Bei Gebäuden der Gebäudeklassen 1 bis 3 sind Brandwände mindestens bis unter die Dachhaut zu führen. Verbleibende Hohlräume sind vollständig mit nichtbrennbaren Baustoffen auszufüllen. Sollte eine Sandwichwand als Brandwand dienen, müssen beim Anbau von neuen Gebäudeteilen die erforderliche Überstände und erforderliche Feuerbeständigkeit der Gebäudeteile in der Nähe von Brandwand wie beschrieben berücksichtigt werden.

Auch das Merkblatt für die Anordnung und Ausführung von Brand- und Komplextrennwänden (VdS 2234 [17]) schreibt vor, dass der Überstand feuerbeständig sein sollte und aus nichtbrennbaren Materialien bestehen und in einer Brandsituation formfest bleiben muss. Die Empfehlung gilt nicht bei feuerbeständigen Dächern.

„Bei Sandwichwänden mit EPS-Dämmung müssen zusätzliche Vorkehrungen vortroffen werden um eine Brandausbreitung zu verhindern. Dies kann mit einer Brandsperre in der Dämmungsschicht realisiert werden. Die Brandwände sind unversetzt durch alle Geschosse zu führen. Öffnungen in Brandwänden sind grundsätzlich unzulässig. Sind sie aus betrieblichen Gründen erforderlich, müssen sie feuerbeständig geschützt sein“ (VdS 2234 [17]).

Laut VdS 2234 [17] ist es empfehlenswert, bei Außenwänden mit brennbaren Baustoffen

- Brandwände mindestens 50 cm über die Außenwandebene fortzuführen oder
- die Außenwände im Brandwandbereich 5 m feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen auszuführen, sowie
- brennbare Baustoffe dürfen die Brandwand nicht über den Außenwänden überbrücken.

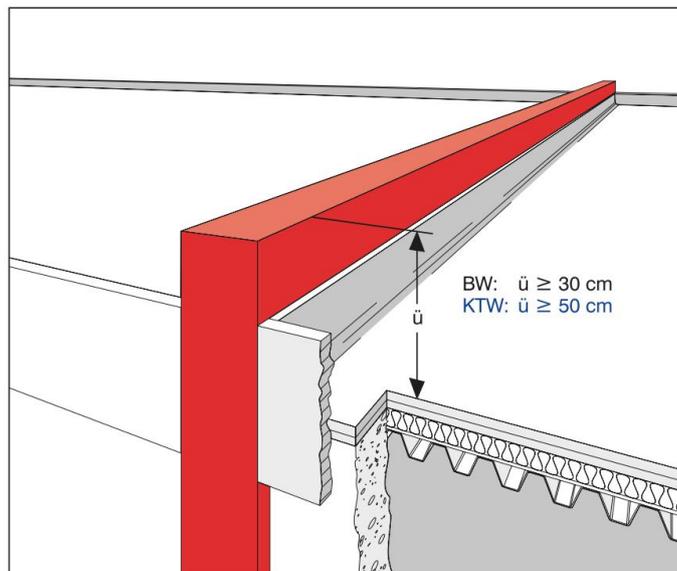


Abbildung 3: Wandausführung zwischen Gebäuden gleicher Höhe (VdS 2234)

Laut MBO 2016 [8] müssen bei Außenwandkonstruktionen mit geschossübergreifenden Hohl- oder Lufträumen wie hinterlüfteten Außenwandbekleidungen gegen die Brandausbreitung besondere Vorkehrungen zu treffen. Das gilt für Doppelfassaden entsprechend. Die Vorgaben der jeweiligen Landesbauordnung setzen Anforderungen an die Dämmschicht, wenn eine Sandwichwand als Außenwand eingesetzt werden soll. Nach der MBO 2016 [8] § 27 sind grundsätzlich Dämmschichten aus schwerentflammenden Baustoffen herzustellen. Die Dämmschichten aus normalentflammenden Baustoffen sind bei Gebäuden geringer Höhe zulässig.

Bei schwerentflammenden Außenwandbekleidungen in der Ausführung als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit EPS-Dämmstoffen sind gemäß MVV TB [7] besondere Vorkehrungen in Form von standsicheren und formstabilen konstruktiven Maßnahmen zu treffen die horizontal angeordnet sind. Unter Berücksichtigung einer Brandeinwirkung von außen sind, im unteren Bereich der Fassade, geeignete nichtbrennbare konstruktive Maßnahmen vorzusehen.

Außenwandbekleidungen dürfen gemäß MBO keinen Beitrag zum Brand leisten (nichtbrennbar). Brandwände müssen auch in diesem Fall standsicher und raumabschließend sein, zusätzliche mechanische Beanspruchungen aus im Brandfall versagenden Bauteilen der baulichen Anlage (Anprall) sind zu berücksichtigen.

#### 4.5. Regeln für die Ausführung von Fugen

Im Fall von vorgefertigten Bauteilen, die einen gewissen Feuerwiderstand aufweisen, ist die richtige Ausführung von Fugen von großer Bedeutung Bub u. Seekamp 1968 [18]. In der Sandwichbetonbauweise sind, besonders bei großformatigen Wandflächen, konstruktive Fugen unvermeidlich. Im Hinblick auf die baulichen Brandschutzanforderungen wirken die Fugen generell nachteilig und schwächen die Brandwand. Aus diesem Grund sind besondere konstruktive Maßnahmen erforderlich, die sicherstellen, dass im Brandfall ein Übergreifen von Feuer und Rauch auf den benachbarten Brandabschnitt verhindert wird. Fugen von Sandwichwänden sollen im Allgemeinen Anforderungen nach Kapitel 4.6 DIN EN 1992-1-2 [15] erfüllen. Die Fugen sollen mit Beton verschlossen werden, so dass die Mindestdicke der Brandwand gewährleistet wird. Im Bereich der Fuge darf die Fuge unverfüllt bleiben.

Nach VdS 2234 [17] ist eine Fuge in einer Brandwand brandschutztechnisch einwandfrei ausgeführt, wenn:

- sie über die gesamte Tiefe mit nichtbrennbaren, elastischen Mineralfasermaterialien der Baustoffklasse DIN 4102-1 [1] A1 mit einem Schmelzpunkt über 1000°C, z.B. Steinwolle, dicht ausgestopft ist oder
- für die Verwendung der Fugenkonstruktion in Verbindung mit der Wandbauart ein Nachweis über die Feuerwiderstandsklasse F 90 nach DIN 4102-2 [2] geführt worden ist oder
- konstruktive Maßnahmen ergriffen worden sind, z.B. abgewinkelt verlaufende Fugen und Fugenabdeckungen an beiden Wandflächen mit verschiebbaren Stahlblechen oder Brandschutzplatten.

In Syspro 2010 [19] wird darauf hingewiesen, dass für die Abdichtung der Fuge von vorgefertigten Bauteilen auf der Außenseite meist ein spezieller Dichtstreifen erforderlich ist, der aufgrund seiner Zusammensetzung bei einer Wärmeeinwirkung auf ein Mehrfaches seiner ursprünglichen Dicke expandiert und eine thermisch stabile Schaumschicht mit niedriger Wärmeleitfähigkeit bildet.

Bezüglich der Anforderungen an die Sicherstellung des Raumabschlusses während der Brandeinwirkung, müssen die Bauteilfugen geschlossen bleiben. Diese Anforderung kann mit nichtbrennbaren mineralischen Baustoffen (wie Mörtel, Beton) oder mineralischen Dämmstoffen mit einem Schmelzpunkt von mindestens 1000°C und mit Bauprodukten, die bei Brandeinwirkung den Restquerschnitt sicher verschließen, erfüllt werden (MVVTB [7]). Auch das DAfStb Heft 162 [20] empfiehlt, dass die Fugen besonders bei dünnen Platten möglichst profiliert werden sollen, damit zwei benachbarte Platten wie Nut und Feder ineinander greifen.

#### 4.6. Bauverordnungen und Baurichtlinien

Neben Bauordnungen und Normen die die Klassifizierung, Definitionen und Anforderungen beinhalten müssen auch die gebietsspezifischen Baurichtlinien in Betracht genommen werden. Folgend sind die Anforderungen an Brandwände, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ausführung von Brandwänden in Sandwichbauweise haben.

Die FVHF Leitlinie: *Brandschutztechnische Vorkehrungen für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden (VHF) nach DIN 18516-1* (VHF Brandschutz 2016 [21]) präsentiert technische Regeln zum Einbau von Brandsperren als eine mögliche Vorkehrung im Sinne der MBO 2016 [8] § 28 und § 30 für Außenwandkonstruktionen mit geschossübergreifendem Hohl- oder Luftraum. „Für Sandwichwände mit EPS-Dämmung sollen Brandsperren jedes zweite Geschoss eingesetzt werden. Diese Vorgaben können die nichttragenden Sandwichwände betreffen, die höher als ein Geschoss sind. Horizontale Brandsperren sind nicht erforderlich, wenn durch die Fassadengestaltung oder die Verwendung nicht brennbarer Baustoffe eine Brandausbreitung im Hinterlüftungsraum ausgeschlossen ist.“ Kleinteile dürfen brennbar sein und die Fassade trotzdem ohne Brandsperren ausgeführt werden. Tragende Verbindungsmittel müssen nichtbrennbar sein. Die alternativen Brandschutzmaßnahmen, die eine Brandausbreitung über einen Zeitraum von 30 min wirksam verhindern können, werden ebenfalls empfohlen.

Das Merkblatt für die Anordnung und Ausführung von Brand- und Komplextrennwänden VdS 2234 [17] konkretisiert insbesondere für Industrie und Gewerbe die Anforderungen an Brand- und Komplextrennwände aus Sicht der industriellen Feuerversicherung. Vor dem Einsatz von Systemwänden als Brandwände im Industriebau sollen deren Leistungsmerkmale, anhand der vielfältigen Aspekte der Risikobewertung eingehend überprüft werden.

Laut MHHR2012 [22] müssen tragende und aussteifende Bauteile, nicht nur Brandwände, feuerbeständig sein und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Zusätzlich muss die Feuerbeständigkeit tragender und aussteifender Bauteile von Gebäuden mit mehr als 60 m Höhe 120 Minuten betragen. Auch die raumabschließenden Bauteile müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Darüber hinaus müssen nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände in allen ihren Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen mit der Ausnahme für Dämmstoffe in nichtbrennbaren, geschlossenen Profilen, Dichtstoffe zur Abdichtung der Fugen zwischen Verglasungen und Traggerippen und Kleinteile ohne tragende Funktion, die nicht zur Brandausbreitung beitragen.

#### 4.7. Sandwichwände aus bewehrten Beton

Vollständig vorgefertigte Stahlbetonwandtafeln mit innenliegender Wärmedämmung werden als Sandwichwände bezeichnet. Die Schalen werden in Normalbeton und in Einzelfällen in Leichtbeton ausgeführt. Die Kopplung der Schalen erfolgt über diskrete Verbindungsmittel deren statische Aufgabe der Abtrag der Lasten aus der Vorsatz- in die Tragschale ist. Als Dämmstoffe kommen expandiertes Polystyrol- und seltener extrudiertes Polystyrol-Hartschäume und Polyurethan-Hartschaum oder Mineralschaum zum Einsatz. Die Dämmung und die Verbindungsmittel bilden zusammen die Kernschicht.

Grundsätzlich können Sandwichwände hinsichtlich ihrer Verwendung als selbsttragende und tragende Wände unterschieden werden. Selbsttragende Wandelemente werden nur durch äußere Beanspruchungen aus Wind, Temperatur etc. belastet, während tragende Elemente zusätzlich lastabtragende, stabilisierende und aussteifende Funktionen übernehmen. Dies ist beispielsweise beim Abtrag von Vertikallasten bei einem Wandelement oder der Ausbildung von aussteifenden Wand- und Deckenscheiben der Fall.

In der Praxis werden bei statischen Berechnungen die Sandwichwände wie übliche Stahlbetonwände dimensioniert. Die einzige tragende Schicht ist dabei die Tragschale, die alle vertikalen Lasten übernimmt und durch Einhalten der Mindestwandstärken als nicht stabilitätsgefährdetes Bauteil betrachtet wird. Durch das Zusammenwirken der Vorsatzschale und der Kernschicht entsteht in der Realität eine signifikante Steigerung der Biegetragfähigkeit, die in aktuellen statischen Berechnungen vernachlässigt wird (siehe Schmitt u. Pahn 2014 [23] und Haffke u. Pahn 2017 [24]). Die Ergebnisse der statischen Berechnungen liegen somit weit auf der sicheren Seite. Die Berücksichtigung der Tragwirkung des gesamten Sandwichwandquerschnitts kann im Brandfall in einem sehr hohen Feuerwiderstand einer Sandwichwand resultieren. Im Weiteren kann bei Berücksichtigung der Sandwichtragwirkung unter Aufrechterhaltung des Feuerwiderstands die Dicke der Betonschalen deutlich reduziert werden. Der Beitrag der Sandwichtragwirkung unter Brandbeanspruchung ist aktuell nicht erforscht.

#### 4.8. Sandwichtragwirkung

Die spezifische Sandwichtragwirkung, die in Sandwichelementen für die Umlagerung der Schnittgrößen verantwortlich ist, kann potenziell von großer Bedeutung für ihr Brandverhalten sein. Wegen der Schubübertragung zwischen den Betondeckschichten durch die Kernschicht, ist die Gesamtbiegesteifigkeit einer Sandwichwand größer als die Summe der Biegesteifigkeiten der einzelnen Betonschalen.

Die Hauptprinzipien dieser Tragwirkung wurden umfangreich in Stamm u. Witte 1974 [25] beschrieben. Die Tragwirkung von Sandwichelementen basiert auf einem Verbundsystem, dessen Aufbau aus zwei dehnsteifen Deckschichten mit einer Eigenbiegesteifigkeit und einer mäßig schubsteifen Kernschicht besteht, die miteinander schub- und zugfest verbunden sind. Nach dieser Theorie, bleiben die Querschnitte der einzelnen Betonschichten auch nach der Verformung aufgrund ihrer hohen Schubsteifigkeit in sich eben. Dabei ist der Gesamtquerschnitt nur abschnittsweise in ebenen Flächen verformt. Dies wird durch relativ große Schubverformungen der Kernschicht verursacht. Die Relativverschiebung der Deckschichten zueinander hat somit den maßgebenden Einfluss auf das Sandwichtragverhalten. Das prinzipielle Tragverhalten wird in Abbildung 4 dargestellt.

Bei einer schubschlaffen Kernschicht ist keine Gesamtbiegesteifigkeit vorhanden, da allein die Deckschichten die Verformung durch Eigenbiegung aufnehmen - a). Im Gegenzug, ist der Kernschicht schubstarr, wird keine Relativverschiebung hervorgerufen und die Sandwichtragwirkung ihr größtmögliches Ausmaß erreicht - c).

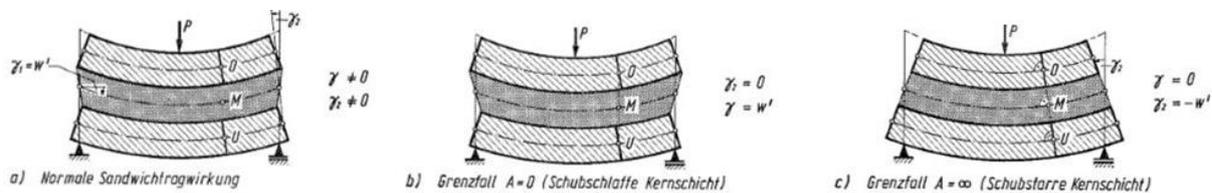


Abbildung 4: Mechanisches Tragverhalten von Betonsandwichelementen (Stamm u. Witte 1974 [25])

Im Praxisfall, nimmt die Schubsteifigkeit der Kernschicht einen Wert zwischen 0 und  $\infty$  an und somit übertragen die Deckschichten ein Teil des gesamten Biegemomentes und der Querkraft und der verbleibende Rest wird durch die Schubtragwirkung der Kernschicht übertragen. Resultierend daraus, entstehen bei einem positiven Biegemoment Druckspannungen in der oberen und Zugspannungen in der unteren Deckschicht sowie Schubspannungen in der Kernschicht. Der Grad der Sandwichtragwirkung beschreibt die Effizienz der Schubübertragung durch die Kernschicht. Generell, je höher die Schubsteifigkeit der Kernschicht ist, desto weniger werden die Betonschalen auf Eigenbiegung belastet, umso größer ist dann der Grad der Sandwichtragwirkung.

Da die Gesamtschubsteifigkeit der Kernschicht sich aus dem Dämmmaterial und den Verbindungsmitteln zusammensetzt, spielt die Schubsteifigkeit der beiden Komponenten, deren Verbund zu den Betonschalen bzw. deren Verankerung in den Betonschalen eine wichtige Rolle. Eine mechanisch effektive Kernschicht vergrößert also die Biegesteifigkeit und somit auch die vertikale Stabilisierung einer Sandwichwand. Auch die in der Ebene wirkenden Belastungen wie z.B. das Eigengewicht der freihängenden Vorsatzschale können durch eine steifere Kernschicht effektiver übertragen werden.

In statischen Berechnungen, wird jedoch der Beitrag der Kernschicht und der Vorsatzschale zur Lastübertragung nicht miteingerechnet. Die Vorsatzschale wirkt lediglich als Witterungsschutz der Wärmedämmung und Tragschale. Die Sandwichtragwirkung wird dadurch in der statischen Berechnung nicht berücksichtigt, die vereinfachte Annahme liegt bezüglich der Gesamtbiegesteifigkeit auf der sichereren Seite. Die Sandwichtragwirkung und der Grad der Sandwichtragwirkung während dem Brandfall sind bisher unbekannt. Da die Sandwichtragwirkung einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten im Brandfall haben kann, soll deren Ausmaß und Effektivität in Bezug auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand untersucht werden.

#### 4.9. Sandwichwände als Brandwände

Hinsichtlich der gestellten Anforderungen ist der Einsatz von Sandwichwänden aus Stahlbeton als Brandwand denkbar und von großer wirtschaftlicher Bedeutung für die Baupraxis. Die Einstufung in die Feuerwiderstandsklasse ist in diesem Fall jedoch nicht trivial nachzuweisen. Um die Tauglichkeit von Sandwichwänden als Brandwand nachzuweisen muss ihre Feuerbeständigkeit das Kriterium REI-M 90 erfüllen. Dabei muss der Einfluss, der durch die eingebauten Verbindungsmittel entstehenden Querschnittsschwächung während des Brandes berücksichtigt werden. Weiterhin muss geprüft werden, ob die Kernschicht nicht zur Brandausbreitung beiträgt. Die Außenschale darf während des Brandes nicht brennend abfallen.

Der Nachweis einer Brandwand kann mit dem Tabellenverfahren nach DIN EN 1992-1-2 [15] geführt werden. Danach sind bewehrte, tragende Wände mit einem Betonquerschnitt von mindestens 14 cm und einem Achsabstand der Bewehrung von mindestens 2,5 cm als widerstandsfähig gegen eine mechanische Stoßbelastung klassifiziert.

Im Fall von Sandwichwänden ist die Anforderung eines Achsabstands meist eingehalten, da die Wände in der Regel einlagig bewehrt sind. Es besteht die Gefahr, dass auf der Außenseite die Fugendichtung bei der Anordnung von EPS-Dämmplatten nicht immer für die Klassifizierung als Brandwand ausreicht, da die Rauchentwicklung bei dickeren Dämmplatten (z.B. 18 cm) zu groß sein kann. Daher wird empfohlen mit Mineralfaserdämmplatten anstelle EPS einzusetzen (Syspro 2010 [19]).

Nach MBO 2016 [8] müssen Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein. Baustoffe, die schwerentflammbar sein müssen, dürfen nicht brennend abfallen oder abtropfen. Der Widerstand der Vorsatzschale muss im Fall einer Sandwichwand dementsprechend nachgewiesen werden.

Eurocode 2 gibt zusätzliche Aussagen hinsichtlich des baulichen Brandschutzes von Außenwänden. Bekleidung, Putz oder Verblendung sind möglich. Sie verlängern die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils. Bei schwerentflammbaren oder brennbaren Baustoffen sind jedoch die Anforderungen der Bauaufsicht zu beachten. Dampfsperren und Sperrschichten dagegen beeinflussen den Feuerwiderstand des Bauteils nicht. Aus dem Eurocode 2 ergibt sich, dass bei der Sandwichwand zusätzlich der Nachweis für die Außenschale zu führen ist. Es werden jedoch keine Aussagen zum Feuerwiderstand des Gesamtquerschnitts von Sandwichwänden getroffen.

In Weiterem soll der Beitrag des Sandwicheffekts zur Lastabtragung unter Brandeinwirkung untersucht werden. Die Erhöhung der Biegesteifigkeit und der thermischen Isolierung der

zusammenwirkenden Kern- und Vorsatzschicht wirkt positiv hinsichtlich der Übernahme der Funktionen einer Brandwand durch eine Sandwichwand. Dieser positive Beitrag mit großem Potential wurde bisher noch nicht untersucht. Deren Berücksichtigung kann zu einer Reduktion der Betonquerschnittsdicke einer Brandwand führen, bei einer gleichzeitigen Erhaltung des Feuerwiderstandes.

Die Anforderung der Nichtbrennbarkeit der Komponenten von Brandwände stellt die Anforderung auf die Kernschicht, dass die Dämmungsmaterial sowie Verbindungsmittel anzünden weder brennend abtropfen nicht dürfen. Im Fall von Sandwichquerschnitten lässt sich diese Anforderung durch Verkapslung einer Kernschicht erfüllen. Diese einfache konstruktive Lösung kann mit umlaufenden Streifen von nichtbrennbarem Dämmungsmaterial wie Mineralwolle oder Wechsel von Sandwichquerschnitt zu Betonvollquerschnitt erledigt werden, wie es in Literatur diskutiert wurde [26],[27].

## **5. Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens**

Aus Normen und Richtlinien bzw. vorhandener Forschung zu Sandwichwänden unter Brandeinwirkung ergeben sich die rechtlichen und konstruktiven Regeln für Sandwichwände hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für den Einsatz im passiven Brandschutz von Gebäuden (siehe Kapitel 4.4 bis 4.6), die von großem Interesse für die Baupraxis ist. Das mechanische Verhalten von Sandwichwänden unter Brandbeanspruchung, die diese Anforderungen erfüllen, wurde noch nicht untersucht. Folgend werden die Ziele des Forschungsvorhabens mit der Aufteilung auf wesentliche Punkte erläutert.

### **5.1. Einsatz einer Sandwichwand als Brandwand**

Ziel des Forschungsvorhabens ist zunächst die Beurteilung der Situationen und Bedingungen, unter denen vorgefertigte Sandwichwände als Brandwände klassifiziert werden können. Die Anforderungen an die Mindestdicken einer Betonwand und den Achsabstand der Bewehrung werden in der Regel von Wänden mit einer Tragschichtdicke größer als 14 cm erfüllt. Dabei kann das Brandverhalten von Vorsatz- und Kernschicht nicht beurteilt werden. Dabei können potenziell nichttragende Schichten einer Sandwichwand unkontrolliert unter einer Brandbeanspruchung versagen. Der potenzielle Abfall der Vorsatzschicht ist abhängig von der Feuerbeständigkeit der Kernschicht und des Verbindungsmittels und muss daher untersucht werden. Die Tauglichkeit der Sandwichwände für den Einsatz als Brandwände soll erforscht werden.

### **5.2. Reduktion der Tragschalendicke durch den Ansatz der Sandwichtragwirkung**

Im Weiteren, wenn die Tauglichkeit einer Sandwichwand als Brandwand belegt worden ist, werden die damit verbundenen Vorteile genauer untersucht. Die durch den Sandwicheffekt aktivierte Zusammenwirkung der Vorsatzschale und der Kernschicht beim Lastabtrag von Sandwichwänden soll unter einer Brandeinwirkung untersucht werden. Die Berücksichtigung dieses Beitrags eröffnet die Möglichkeit einer Reduktion der Brandwanddicke bei gleichzeitiger Erhaltung ihrer mechanischen Leistungsmerkmale. Durch eine steifere Verbindung der Vorsatzschicht mit der Tragschicht, kann bei dünnwandigen Sandwichwänden die Dicke von Trag- sowie Vorsatzschicht reduziert werden. Die dabei entstehende Einsparung der Wanddicke um 1 cm bedeutet eine CO<sub>2</sub>-Äquivalent Reduktion pro ein Quadratmeter Wand von 3,71g/cm [28]. Die Randbedingungen und Anforderungen an dünnwandige Sandwichwände

für den Einsatz als Brandwand unter Berücksichtigung einer unterschiedlichen Ausbildung der Kernschicht soll im Brandfall erforscht werden.

### 5.3. Erstellung eines Klassifizierungskonzeptes

Auf der Basis von Erkenntnissen über die Tauglichkeit von Sandwichwänden für den baulichen Brandschutz und Untersuchungen zur Sandwichtragwirkung unter Brandbeanspruchung, die eine Reduktion von Brandwanddicken ermöglicht, soll ein thermisches Modell und ein Klassifizierungskonzept für Sandwichwände erstellt werden. Das angestrebte Klassifizierungskonzept soll es ermöglichen, dass ein Nachweis für Sandwichwände als Brandwände, anhand der Angaben über Geometrie und Materialien, ohne aufwendige Brandversuche geführt werden kann.

### 5.4. Literaturrecherche zu Brandverhalten von Sandwichwänden und Brandwänden

Die vorhandene deutsche und internationale Literatur zum Thema „Sandwichwände im Brandfall“ ist stark begrenzt. Einige Sandwichwandsysteme wurden auf ihren Feuerwiderstand und potenzielle Brandausbreitung durch eine brennende Dämmschicht getestet. Es sind aber keine allgemeingültigen Arbeiten bekannt, die ein Feuerwiderstandskonzept oder Klassifizierungskonzept für in der Praxis zahlreich ausgeführte Sandwichwandkonstruktionen betrachten. Die Feuerbeständigkeit wurde aber in mehreren Fällen bestätigt. Diese und andere relevante vorhandene Literatur zu Forschungsvorhaben, die einen Beitrag zur Planung der experimentellen Untersuchungen sowie zur Erstellung eines Klassifizierungskonzeptes leisten können, werden in diesem Kapitel vorgestellt.

In Einea u. a. 1991 [29] sind einige Aussagen zum Brandverhalten von Sandwichelementen getroffen. Demnach kann eine exzellente Brandbeständigkeit gewährleistet werden, indem man die Dämmung und die Bewehrung komplett im Beton verkapselt. Die berichteten Feuerwiderstandsdauern betragen zwischen 1 h 23 min und 4 h 25 min. Es wird vorgeschlagen, dass eine entsprechende Betondeckung und Sicherheitsbeiwerte die Sicherheit von Kunststoff-Verbindungs Mitteln gewährleisten können.

In Schmied u. a. 2015 [30] wird über ein Forschungsvorhaben an Sandwichpanelen mit aufgeklebten Metalldeckschichten berichtet. Sandwichwandelemente weisen aufgrund unterschiedlicher Bestandteile, ein unterschiedliches Verhalten im Brandfall auf. Daher muss das System jeweils als Ganzes betrachtet werden. In den durchgeführten Versuchen, reduzierte sich aufgrund der Erhitzung der Deckschichten, die Festigkeit des Klebstoffs zwischen Dämmung und Metalldeckschicht so sehr, dass sie die aus dem Eigengewicht und den Verformungen ergebenden Beanspruchungen nicht mehr aufnehmen konnten. Die der Brandbelastung zugewandte Deckschicht hat sich gelöst und die Sandwichtragwirkung war danach komplett ausgeschlossen. Aufgrund ihrer hervorragenden Dämmeigenschaften und der Verwendung von nichtbrennenden Deckschichten können solche Sandwichelemente mit dem entsprechenden Nachweis als feuerhemmende oder feuerbeständige, nichttragende Innen- oder Außenwände oder Dächer eingesetzt werden. Der Autor stellte fest, dass die bestehenden Regelwerke für den Einsatz von Sandwichelementen mit Anforderungen an den Feuerwiderstand nicht ausreichend sind. Es wurde weiterhin diskutiert, dass die Übertragung der Ergebnisse aus den genormten Brandversuchen auf reale Gebäude und Brandsituationen aufgrund des komplexen Tragverhaltens von Sandwichelementen schwieriger ist als bei

konventionellen Bauweisen, deren innere Struktur während der Beanspruchung durch Feuer unverändert bleibt.

Ein wichtiger Beitrag zu Untersuchungen an Sandwichwänden wurde in der gutachterlichen Stellungnahme Nr. 2559/2570-We/Rm vom 04.04.2000 [31] dargestellt. In diesem Forschungsvorhaben wurde die geprüfte Sandwichwand mit ähnlichen Dicken der Betonschalen und Dämmschicht nach DIN 4102-3:19977-09 positiv als Brandwand bewertet. Es wurde festgestellt, dass die zusätzliche Dämmschicht und die Vorsatzschale das Brandverhalten der Elemente in keiner Weise beeinträchtigt. Im Gegenteil, es wurde eine Aussage getroffen, dass die zusätzlichen Schichten sowohl den Wärmedurchgang als auch die Gesamtstabilität der Wandkonstruktion verbessern.

In Kahmer 2017 [32] wurde über Brandversuche an ähnlichen Sandwichkonstruktionen wie im aktuellen Forschungsvorhaben berichtet. Die untersuchten Sandwichwände waren nach einem angewandten Hochhausbrand intakt, so dass eine sichere Lastabtragung nach 120 Minuten nachgewiesen wurde. Die aufgebrachte Auflast in diesem Fall betrug 50 kN. Es wurden große Kopfverformungen beobachtet, die laut dem Autor durch Dachbinder konstruktiv gelöst werden sollen. Die eingesetzten GFK-Anker sind durch die Brandbeanspruchung an der Außenseite komplett geschmolzen, die Vorsatzschale wurde jedoch nach deren Ausfall mit speziellen Edelstahlnadel getragen. Eine Ausbreitung des Brands durch die Wand über die Anker wurde nicht festgestellt. Dabei wurde eine positive, thermisch schützende Wirkung der Vorsatzschale festgestellt, die zu einer Reduzierung der Brandlast auf die Tragschale führt. Aus diesem Grund wurde empfohlen, dass die Brandeinwirkung von innen rechnerisch maßgebend ist.

Andere experimentelle und numerische Untersuchungen in Hulin u. a. 2016 [27] an Sandwichwänden hatten ebenso zum Ziel die Tauglichkeit dünnwandiger HPC (high performance concrete) Betonsandwichwände als Brandwände zu bestätigen. In den durchgeführten Versuchen wurde das Brandverhalten von tragenden innovativen Sandwichwänden mit tragenden integrierten Stützen auf die REI 60 – M Kriterien, die dem Brandversuch für Brandwänden entspricht, mit kleinen Abweichungen untersucht. Die Wände haben die Versuche mit Auflast auf Kriterium E nicht bestanden. Wie erwartet wurden Betonabplatzungen des HPC beobachtet. Die Zugabe von Polypropylen Fasern wirkt positiv gegen Betonabplatzungen in dünnen Schalen. Die verwendete PUR-Dämmung hat nach der direkten Feuerexposition intensiv gebrannt. Es wurde vermutet, dass der Verbund zwischen Dämmstoff und Beton tragfähiger ist als die Dämmung an sich. Dies wurde am aufgetretenen Schubversagen der Dämmung erkannt. Die aufgebrachte Auflast betrug in diesem Fall 163 kN/m. Die versuchstechnisch ermittelten Temperaturverläufe wurden dann in Hulin u. a. 2016 [33] numerisch simuliert. Es wurde festgestellt, dass bei sehr dünnen Schalen (30 mm) die thermische Auswölbung zwischen Verbindungsmitteln zu großen Spannungskonzentrationen in den Deckschichten führen kann. Die geometrischen Diskontinuitäten (wie in diesem Forschungsvorhaben – integrierte in der Deckschicht Stützen) können auch für die Konzentration von Zugspannungen kritisch sein. Im Weiteren kann der Porendruck aufgrund der guten Dämmeigenschaften ein wichtiger Faktor in den Sandwichelementen sein. Die beflammete Schale soll eher als ein abschottendes Element betrachtet werden und nicht als das tragendes Bauteil. Die Übertragung der Auflast soll durch die integrierten Stützen erfolgen.

In der Zulassung (abZ: Z-71.3-39) [26] von Sandwich-Fassadenwand aus Textilbeton (Solidian)), wo die Tragschale aus Stahlbeton besteht, wurden einige Maßnahmen getroffen,

um den Feuerwiderstand des Wandsystems zu erhöhen. Bei einer 30 mm dicken Vorsatzschale und kontinuierlichen GFK Gitterträger-Verbindungsmitel in der Kernschicht ist davon auszugehen, dass die Kernschicht zum Lastabtrag nicht angerechnet werden darf. Die brennbaren Dämmstoffmaterialien sind mit einem 200 mm dicken Streifen aus nichtbrennbarem Material verkapselt.

Wie bereits in einigen Untersuchungen [34; 27; 33] angedeutet wurde, kann ein struktureller Beitrag der nichttragenden Schichten einer Sandwichwand eine zusätzliche Stabilisierung im Brandfall gewährleisten. Je höher der Grad der Sandwichtragwirkung ist, desto ähnlicher wird das strukturelle Tragverhalten eines Sandwichelements zu einem Verhalten des monolithischen Querschnitts der gleichen Dicke [35]. Die effektive Sandwichtragwirkung wirkt dabei vorteilhaft bezüglich der Biegesteifigkeit und Stabilisierung. Auf der anderen Seite, entsteht durch die Einführung der zusätzlichen Normalkräfte in die Deckschichten, ein hoher Grad der Sandwichtragwirkung und kann zu einer stärkeren Ausnutzung der Kern- und Vorsatzschicht führen. Der Einfluss dieser Kräfteumlagerung auf das Tragverhalten der Komponenten unter erhöhten Temperaturen sollte daher genauer untersucht werden.

Vom maßgebenden Einfluss der Kernschicht auf das Biegetragverhalten der Sandwichelemente unter Brandbeanspruchung wurde auch in Schmitt u.a. 2017 [36] berichtet. Die dünnwandigen Sandwichelemente mit GFK-Bewehrung und Verbindungsmitteln (der gleichen Art der GFK-Stäben wie in diesem Forschungsprojekt) wurden beflammt bis die GFK-Bewehrung ihren theoretischen Schmelzpunkt erreicht hat. Obwohl die GFK-Komponenten keine eindeutigen Beschädigungen infolge der hohen Temperaturen aufweisen, wurde die EPS-Dämmung stark beeinträchtigt. Die Effektivität der Schubübertragung durch die Kernschicht und insbesondere die Dämmung wurde als maßgebender Faktor für das Biegetragverhalten identifiziert. Bezüglich der erreichten Biegetragfähigkeit, besteht der maßgebende Parameter in der auf der beflamten Seite des Bauteils erreichten Temperatur und nicht in der Aufheizungsdauer oder Aufheizungs geschwindigkeit.

Die berichtete große Abhängigkeit des mechanischen Tragverhaltens von Sandwichelementen von den Kernschichteigenschaften, kann wiederum von den in der Kernschicht erreichten Temperaturen stark beeinflusst werden. Dabei spielen die Faktoren wie mechanisches und thermisches Verhalten der einzelnen Betonschalen eine maßgebende Rolle.

Eine strukturelle Analyse des Brandverhaltens, die auch für die Sandwichwände maßgebend sein kann, wurde in Brandversuchen an vertikal und horizontal belasteten Betonwänden in Mueller u. Kurama 2017 [37] durchgeführt. Das Biegetragverhalten (und auch die im Brandfall verursachte Ausmitte) wurde sogar als maßgebend für das Stabilitätstragverhalten und den Vertikallastwiderstand der Wände bewertet. Das Querreißen infolge einer Brandbeanspruchung kann zu einem Scherversagen des Bauteils führen. Weitere entstehende Durchbiegung die nach dem Brand bzw. während der Abkühlung entsteht kann kritischer für die Stabilität sein als der Brandfall selbst. Da die Wände normalerweise nicht mit Biegebewehrung ausgeführt werden, kann bei solchen Bauteilen mit Brandbeanspruchung besonders gefährlich sein. Diese Erkenntnisse können auch auf Sandwichwände übertragen werden, besonders unter Berücksichtigung, dass die zusätzlichen Schichten einer Sandwichwand die Tragfähigkeit einer Tragschale im Brandfall verbessern können.

In Meyer-Ottens u. Steinert 1969 [38] ist eine Herleitung der Herkunft der herkömmlichen Brandwände aus Stahlbeton zusammengefasst. Demnach gelten feuerbeständige Wände mit bestimmten Mindestdicken als Brandwände, wobei die Mindestdicken aufgrund von Erfahrungen festgelegt wurden. Hierdurch wurde eine zusätzliche Tragreserve gegen mechanische Beanspruchung beim Brand und beim Löschen definiert. Dieses zusätzliche Tragvermögen wurde in Versuchen überprüft.

Eine Zusammenfassung der Abhängigkeit von Wanddicke und Feuerwiderstand des Bauteils wurde in Wierig 1963 [20] dargestellt. Für massive Betonwände ist die Wärmeleitfähigkeit in der Regel das Kriterium das den Feuerwiderstand im Brandfall beschränkt. Im Allgemeinen sind dicke Wände im Hochbau, wie z.B. bei Außenwänden wegen des erforderlichen Wärmeschutzes, durch Feuer nicht gefährdet. Bei dünnen Wänden kann es dagegen vorkommen, dass die zulässige Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite überschritten wird. Abbildung 5 zeigt die erforderliche Dicke für massive Wände aus Beton in Abhängigkeit der Versuchsdauer, damit auf der dem Feuer abgekehrte Seite keine Temperaturerhöhung von mehr als 140°C über die Anfangstemperatur auftritt.

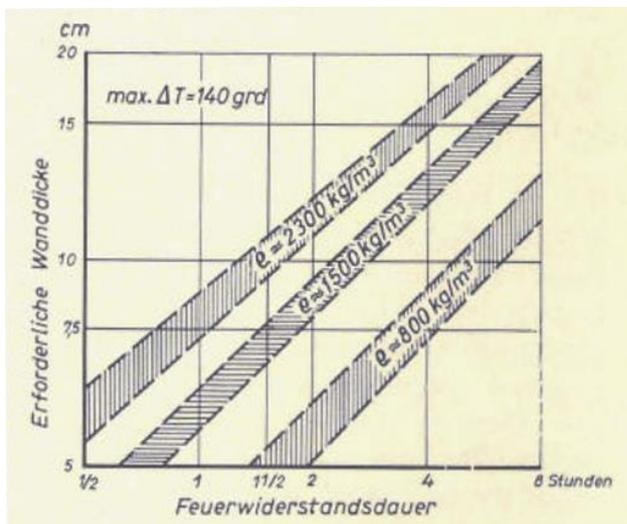


Abbildung 5: Erforderliche Dicke massiver Betonwände für 140°C Temperaturerhöhung an der dem Feuer abgewandten Seite (aus Wierig 1963 [20])

Abbildung 5 zeigt, dass die nach DIN EN 1992-1-2 erforderliche 14 cm dicke Tragschicht den Grenztemperatureinstig erst nach über drei Stunden erreicht, während die in Kapitel 5.2 vorgeschlagene lediglich 10 cm dicke Betonschale diese nach eineinhalb Stunde überschreitet. Nach dieser Zeit kann angenommen werden, dass das Aufheizen der Kernschicht ihre Eigenschaften deutlich beeinflusst. Dies gilt besonders, wenn die Kernschichtkomponenten der Klasse niedriger als „nichtentflammbar“ eingestuft sind. Aus diesem Grund ist die genauere Untersuchung der Kernschichteigenschaften unter erhöhten Temperaturen erforderlich.

Dieser Zusammenhang der Dicke einer Betonwand und deren Feuerwiderstand wurde auch in Wierig 1963 [20] bestätigt. Die Wärmeübertragung ist der maßgebende Effekt der die Mindestdicke einer Betonwand begrenzt. Dabei ist angedeutet, dass die Streuungen bei den Temperaturmessungen im Wandinneren besonders infolge unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehaltes, verschiedener Zuschlagsstoffe, und unterschiedlicher Raumgewichte, sehr groß sind. Die kritische Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite ist bis zu einer Versuchsdauer von 3 Stunden im Allgemeinen nur bei Schwerbetonen und Wanddicken

von  $\leq 15$  cm von Bedeutung. Laut DAfStb Heft 248 [39] kann eine erhöhte Temperatur im Beton und Bewehrungsstahl zum verfrühten Versagen durch

- Überschreiten der Streckgrenze des Stahles,
- Überschreiten der Betondruckfestigkeit oder
- Lösen des Verbundes zwischen Stahl und Beton

führen. Dabei kann die Abplatzung von Beton dieses Versagen noch zusätzlich verfrühen.

Auch die FIB Bulletin 74 [40] trifft quantitative Aussagen zum Zusammenhang der Dicke und dem Feuerwiderstand vorgefertigter Betonwände. Demnach kann der Feuerwiderstand relativ einfach durch Vergrößerung der Betondeckung erhöht werden. Für vorgefertigte Trennwände bewertet das Bulletin nur die Kriterien E und I. Eine 100 mm dicke Betonwand erreicht die Klasse EI 90. Bezüglich des R Kriteriums, um große Verformungen und das dadurch bedingte Versagen von Wänden/Platten zu vermeiden, soll die Schlankheit  $f/i$  (Knicklänge / Trägheitsradius - siehe [40]) den Wert 50 nicht überschreiten. Tragende Wände mit einer Dicke von 140 bis 300 mm wiesen einen Feuerwiderstand von 60 Minuten problemlos auf. Für höhere Widerstände sind die empfohlenen Mindestdicken angegeben. Die kleinste angegebene Dicke von 120 mm soll einen Feuerwiderstand für nicht stark belasteten Wände bei einseitigem Brand von REI 90 erreichen.

## 6. Großbrandversuche

Dieses Kapitel beschreibt die Großbrandversuche an Sandwichelementen aus Stahlbeton mit stiftförmigen Verbindungsmitteln aus faserverstärktem Kunststoff, die in den Monaten Juli und August 2017 im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern durchgeführt wurden (siehe Tabelle 5). Die Wände wurden im standardisierten Brandversuch unter Brandbelastung, einer vertikalen exzentrischen Last und anschließender Stoßbelastung geprüft. Die experimentelle Untersuchung hatte zum einen das Ziel die Tauglichkeit von Sandwichwänden als Brandwände zu prüfen und zum anderen, dass Brandverhalten der Wandkomponenten und die daraus resultierende Sandwichtragwirkung zu untersuchen. Die Versuchsreihe beinhaltet drei Sandwichwände, bei denen die Seite der Beflammung und die Dicke der Dämmschicht variiert wurden.

Tabelle 5: Versuchsdatum

Versuchsnummer	Prüftag
Versuch 1	04.07.2017
Versuch 2	17.07.2017
Versuch 3	02.08.2017

### 6.1. Motivation

Auf dem Markt existiert eine Vielfalt von verwendeten Verbindungsmittel [41–43]. GFK-Verbindungsmittel bilden eine thermisch-effektive und gleichzeitig bereits gut bewehrte Lösung im Sandwichbau. Die stiftförmigen GFK-Verbindungsmittel werden, wegen ihrer gutem mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie ihrer guten Dauerhaftigkeit immer häufiger eingesetzt [43]. Die Anwendung von hoch thermisch effizienten GFK-Verbindungsmittel resultiert in deutlich verbesserten thermischen Eigenschaften des gesamten Wandsystems.

Das Brandverhalten von Verbindungsmitteln aus faserverstärktem Kunststoff stellt eine der schwierigsten Fragen hinsichtlich dem Einsatz von Sandwichwänden als Brandwände dar. Im Allgemeinen wird behauptet, dass sich die Verwendung von nichtmetallischen Verbindungsmitteln negativ auf das Brandverhalten einer Sandwichwand auswirkt, im Gegensatz zu verschiedenen Formen von metallischen Verbindungsmitteln wie Nadeln, Flachankern, Gitterträgern oder Manschetten. Im Brandfall können die mechanischen Eigenschaften der Verbindungsmittel, wie beispielsweise die Schub- oder Verankerungstragfähigkeit herabgesetzt werden. Unter der erhöhten Temperaturbelastung können die Verbindungsmittel, die die beiden Betonschalen miteinander koppeln schmelzen, sodass der Feuerwiderstand eines Sandwichelementes maßgeblich durch die verwendeten Verbindungsmittel beeinflusst wird. Deswegen wurden die Versuchswände für die Großversuche mit GFK-Verbindungsmitteln hergestellt, um eine praxisnahe und ungünstige Ausführungsvariante (hinsichtlich des Brandverhaltens) einer Sandwichwand zu untersuchen.

Zudem erschwert die aktuelle Normenlage die Bewertung des Brandwiderstandes von Sandwichwänden mit GFK-Verbindungsmitteln, da es zum jetzigen Zeitpunkt keine einheitliche Brandschutzklassifizierung (Baustoffklassifizierung) für solche Verankerungssysteme gibt. Umso wichtiger sind die Untersuchungen des Brandverhaltens an einer gesamten Sandwichwand. Die europäische Klassifizierungsnorm für Baustoffe (DIN EN 13823) - SBI Test (Single Burning Item Test) ist nicht für stabförmige Produkte (GFK – Verbindungsmittel) ausgelegt, sondern für flächige Baustoffe / Produkte. Der SBI Test berücksichtigt unterschiedliche Messkriterien. Dabei wird zuerst der Heizwert (PCS) gemessen und anschließend im Kleinbrennerofen eine flächige Ecksituation aus diesem Material aufgebaut. An der Ecke wird eine Holzkrippe angezündet. Dabei wird der Rauch, die Energiefreisetzung, das Abtropfen etc. gemessen. Auf Grundlage der Messergebnisse erfolgt die Klassifizierung des Brandverhaltens des Baustoffes. Dieser Test darf nicht für die Klassifizierung von stiftförmigen Verbindungsmitteln angewendet werden.

Deshalb sind die Brandwandversuche von großer praktischer Bedeutung. Da es nur möglich ist sich innerhalb der Baustoffklassifizierung an gewissen Prüfungen zu orientieren, aber oft keine eindeutige Klassifizierung erreicht werden kann, ist es von großer Bedeutung, den Gebrauchsfall (Praxisfall) in entsprechenden Bauteilversuchen das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion zu prüfen, um diesen im Brandfall besser beurteilen zu können.

Im Gegensatz zum herkömmlichen Vorgehen, wonach in statischen Berechnungen die Vorsatzschale und die Kernschicht nicht als tragende Elemente berücksichtigt werden, kann deren Anteil in Bezug auf die Biegesteifigkeit einer Wand große Werte annehmen [23; 34; 24; 27]. Demnach kann die Biegesteifigkeit in manchen Fällen sogar um 100% vergrößert werden.

Die geringe Anzahl an experimentellen Untersuchungen des Brandverhaltens von Sandwichwänden mit GFK-Verbindungsmitteln in der Literatur und die Schwierigkeiten bei der direkten Anwendung von standardisierten Versuchsmethoden verhindern die Klassifizierung von Sandwichwänden in Brandschutzklassen. Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte, werden mit den durchgeführten Großbrandversuchen folgende Zeilen angestrebt:

- Überprüfung der Tauglichkeit der Sandwichwände als Brandwände. Deswegen wurde der Feuerwiderstand zusammen mit dem Brandverhalten von Wandkomponenten nach den REI-M Kriterien für tragenden Brandwände geprüft. Die in der Literaturrecherche gesammelten Erkenntnisse (siehe Kapitel 4.9) hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Sandwichwänden als Brandwände sollen validiert werden.

- Struktureller Widerstand der Sandwichwände unter Brand- und Stoßbelastung. Die mechanische Kopplung der freihängenden Vorsatzschale zur Tragschale darf nur soweit beschädigt werden, dass die Vorsatzschale nicht schlagartig von der Tragschale abfällt. Dies gilt sowohl während der Brandbeanspruchung als auch bei der Stoßbelastung.
- Brandverhalten der eingesetzten GFK-Verbindungsmitel. Das mechanische Verhalten und im Besonderen die Unterstützung der freihängenden Vorsatzschale, die Schub- und die Biegesteifigkeit der Wände und die Verankerungssicherheit sollen untersucht werden. Im Weiteren soll die Brennbarkeit der Verbindungsmitel, die potenzielle Brandausbreitung und die damit einhergehende Rauchgasentwicklung kritisch betrachtet werden. Die geschmolzenen Verbindungsmitel können Hohlräume in den Betonschalen hinterlassen oder/oder Betonabplatzung intensivieren. Da diese Einflüsse die raumabschließende Funktion einer Wand beeinträchtigen können, sollte deren Einfluss auf das Brandverhalten von Sandwichwänden untersucht werden.
- Sandwichtragwirkung der Versuchswände im Brandfall. Der Grad der mechanischen Kopplung der beiden Betonschalen im Brandfall soll untersucht werden. Je länger die Sandwichtragwirkung zu einem hohen Maß über die Dauer der Brandbeanspruchung erhalten werden kann, desto größer ist der mechanische Widerstand der Wand [36] und je länger kann der Feuerwiderstand gewährleistet werden.

## 6.2. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm wurde mit dem Ziel entwickelt, den Feuerwiderstand der Sandwichwände zu bestimmen und deren potenzielle Tauglichkeit als Brandwände zu überprüfen. Drei Großbrandversuche wurden durchgeführt, bei denen die mit Feuer beflammete Seite der Wand und die Dicke der Dämmschicht die untersuchten Parameter waren (siehe Abbildung 6).

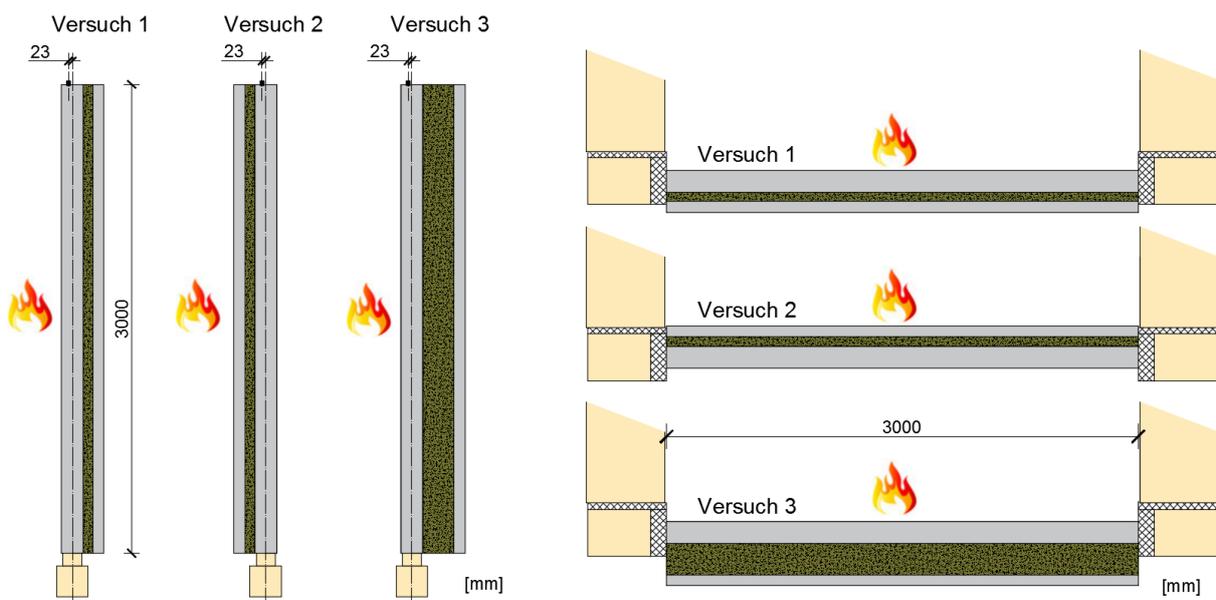


Abbildung 6: Ausrichtung der Prüfwand; vertikaler Aufbau und Lage der ausmittigen vertikalen Belastung (links); horizontaler Versuchsaufbau (rechts)

Bei der Prüfung wurden die Dämmschichtdicken 60 mm und 200 mm berücksichtigt. Durch Berücksichtigung unterschiedlicher Dämmstoffdicken sollen unterschiedliche Temperaturanstiege über die Länge der Verbindungsmittel und dadurch unterschiedliches mechanisches Verhalten verursacht werden. Zusätzlich dazu, kann die dem Feuer zugewandte Seite der Sandwichwand, wegen der unterschiedlichen Dicken der Trag- und Vorsatzschale, auch das Verhalten der Verbindungsmittel und der gesamten Wand beeinflussen. Um die möglichst vollständigen Informationen über den Feuerwiderstand der geprüften Wände zu erlangen, unterscheiden sich die ersten zwei Versuche nur in der jeweils beflamnten Seite. Diese Analyse wurde bei der 60 mm dicken Dämmung gemacht, weil diese Dicke höhere Anforderungen an die thermisch dämmende Funktion einer Wand stellt. Die Wand mit 200 mm Dämmschicht wurde nur in der Konfiguration, bei der die Tragschale zum Brand zugewandt ist, getestet.

Die Dämmschichtdicke in herkömmlichen Sandwichwänden variiert in vielen Ländern zwischen 50 und 75 mm, während in Frankreich und Deutschland Sandwichelemente mit bis zu 200 mm Dämmung hergestellt werden [43]. Einerseits führt eine dickere Dämmschicht normalerweise zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften einer Wand. Andererseits, unter Annahme, dass die Geometrie und die Eigenschaften des Querschnitts konstant bleiben, führt eine Vergrößerung der Verbindungsmittellänge zu einer Abminderung der Schubsteifigkeit. Die abgeminderte Schubsteifigkeit der Verbindungsmittel resultiert (aufgrund der längeren freien Länge zwischen den Betonschalen) in einer Abminderung der effektiven Sandwichtragwirkung, die in einer Wand generiert werden kann.

Daher sind die Versuchskörper 1 und 3, die sich lediglich in der Dicke der Dämmschicht unterscheiden, so konzipiert, dass sie den Einfluss dieser Parameter auf die Biegesteifigkeit im Brand demonstrieren. Die dickere Dämmung von Versuch 3 dient der Untersuchung des Einflusses der Verbindungsmittellänge auf die Tragfähigkeit der Sandwichwand unter hohen Temperaturen. Die längere, thermische Strecke der Verbindungsmittel soll zu stärkeren Beschädigungen der Schubverbindung der beiden Betondeckschichten führen, als bei der Verwendung von kürzeren Verbindungsmittel. Die thermisch verursachte Abminderung der Schubsteifigkeit und Erreichen der Schmelztemperatur des Harzes könnte die Sandwichtragwirkung der Betonschalen im Brandfall stark reduzierten oder vollständig eliminieren. Im Weiteren könnte dies zur Beeinträchtigung der raumabschließenden Funktion der Wand und schlagartigem Abfall der Trag- und Vorsatzschale führen. Der beschriebene Zustand muss untersucht werden, da dieses Verhalten für grundsätzliche Brandwände unzulässig ist.

Die Geometrie von Versuchskörper 1 und 2 ist identisch, um die vollständigen Feuerwiderstand der Sandwichwand, die auf beiden Seiten mit Feuer beansprucht werden kann, zu untersuchen. Die Vorsatzschale weist üblicherweise eine geringere Dicke als die Tragschale auf, um ihr Gewicht möglichst gering zu halten. Das wiederum führt zur Abminderung ihrer thermischen Eigenschaften. Zusätzlich wird, bei Sandwichelementen mit punktförmigen Verbindungsmitteln, wo die Sandwichtragwirkung relativ gering ist, der konstruktiv tragende Anteil der Vorsatzschale zur Biegesteifigkeit üblicherweise vernachlässigt [43]. Auch kann der Traganteil in Bezug auf die Steifigkeit und Sandwichtragwirkung umso schneller verloren gehen, wenn eine Wand dem Brand ausgesetzt ist. Ein übermäßiger Temperaturanstieg in den Verbindungsmitteln kann zu einem potenziell gefährlichen Abfall der Tragfähigkeit der Vorsatzschale führen. In diesem Fall kann eine thermische Beschädigung des Betons oder Abplatzungen infolge Brandangriff auch zu bedeutenden Abminderungen der Verankerungswiderstände der Verbindungsmittel führen.

Dabei muss bemerkt werden, dass der Fall, in dem die Vorsatzschale dem Brand zugewandt ist, in der Praxis nur selten auftritt. Trotzdem besteht die Möglichkeit, dass im Fall von Erweiterungen oder Nutzungswechsel von bestehenden Gebäuden eine externe Wand zu einer internen Wand wird. Um bei allen drei Versuchskörpern die ungünstigste Belastungssituation zu untersuchen, wurde bei jedem Versuch die volle Brandkurve angesetzt.

### 6.3. Beschreibung der geprüften Konstruktion und des Versuchsaufbaus

#### 6.3.1. Beschreibung des Versuchskörpers

Im Rahmen dieses Versuchsvorhabens wurden drei Versuchskörper im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern untersucht. Nach DIN EN 1365-1 [16] hat der Probekörper die Abmessungen Breite x Höhe = 3000 mm x 3000 mm. Dementsprechend sind die Prüfergebnisse auf Wände mit den Abmessungen in der Ausführung Breite x Höhe  $\geq 3000$  mm x 3000 mm anwendbar.

Die Sandwichwand besteht aus drei Schichten: einer Tragschale (140 mm), einer Kernschicht (60 oder 200 mm) und einer Vorsatzschale (70 mm). Die Betonschalen sind in Stahlbetonbauweise hergestellt. Beide Schalen wurden mit Standard Stahlmatte Q188A bewehrt (Bewehrungsfläche in beide Richtungen  $1,88$  cm<sup>2</sup>/m), die mittig im Querschnitt gelagert waren.

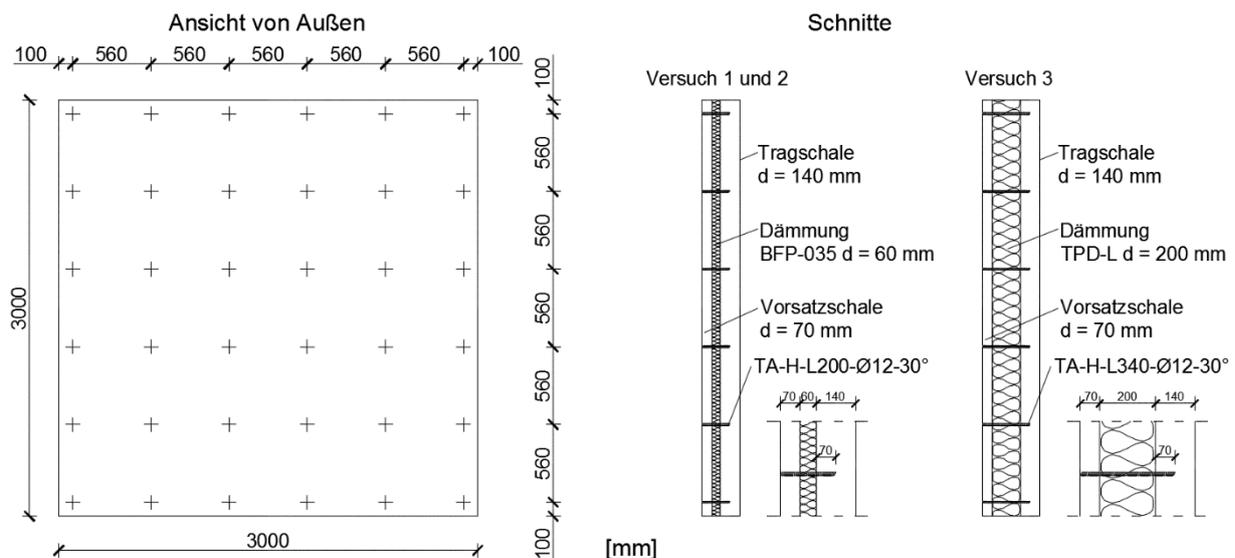


Abbildung 7: Prüfkörper

Zwischen den Betonschalen befindet sich eine Kernschicht aus thermischer Dämmung und mechanischen Verbindungsmitteln. Die Dicke der Kernschicht (auch die Lieferdicke der Dämmplatten) beträgt 60 mm in den Versuchen 1 und 2, sowie 200 mm im Versuch Nr. 3. Die verwendete Dämmung waren druckfeste Steinwolle-Wärmedämmplatten (Knauf Insulation Betonfertigteil-Dämmplatte BFP-035 – 60 mm Platten; Knauf Insulation Dachboden-Dämmplatte TPD-L – 200 mm Platten Z-33.4-1571 [44]).

Die Verbindung der einzelnen Schichten erfolgt deshalb mit GFK-Verbindungsmitteln. Dieser Verbindungsmitteltyp wird von allen, auf dem Markt vorhandenen Verbindungsmitteln, für dieses Versuchsvorhaben ausgewählt. Da das Brandverhalten von GFK-Verbindungsmitteln

weitestgehend unerforscht ist, wird zudem ein ungünstiger Aufbau einer Sandwichwand untersucht (mehr dazu in Kapitel 6.1).

Die Lage, Anzahl, Durchmesser und Einbindetiefe der Verbindungsmittel sind bei allen drei Versuchskörpern gleich und können Abbildung 7 entnommen werden. Die GFK-Stäbe (Schöck Isolink® TA-H-Ø12-30° Z-21.8-1894 [45]) weisen einen Durchmesser  $\varnothing 12$  mm, eine gerippte Oberfläche und abgeschrägte Schnittflächen an beiden Enden mit einem Winkel von  $30^\circ$  auf (siehe Abbildung 8). Die genauen thermischen und mechanischen Eigenschaften der Kernschichtmaterialien sind in der Kapitel 7.3.2 dargestellt. Die Herstellung der Verankerung in den Deckschichten erfolgt durch den Einbau in den frischen Beton auf einer beidseitigen Länge von 70 mm. Die Länge der Verbindungsmittel zwischen den Betonschalen, die so genannte freie Länge, ist in jedem Versuch gleich der Dicke der Kernschicht.



Abbildung 8: GFK-Verbindungsmittel vor dem Einbau in eine Sandwichwand

### 6.3.2. Herstellung des Versuchskörpers

Die Sandwichwände für die Großbrandversuche wurden im Fertigteilwerk der Fa. Fehr Technologies Deutschland GmbH & Co. KG hergestellt. Für die Herstellung der Prüfkörper wird zuerst die Dämmung zugeschnitten, angepasst und nummeriert (siehe Abbildung 9). Die Dämmung der Prüfwände wird passend eingebohrert, damit die Verbindungsmittel bei dem Einbau eingesteckt werden können.



Abbildung 9: Herstellung von Sandwichwänden; Betonierung der unteren Schale (links), Bewehrung und Verbindungsmittel bereit für die Betonierung der oberen Schale

Im Folgenden ist der Ablauf der Versuchskörperherstellung schrittweise erläutert:

1. Zuerst wird die Stahlmatte der unteren Lage in die Schalung eingelegt und mit Abstandhaltern in ihrer Lage gesichert. Nach der Fertigstellung der Bewehrungsarbeiten wird die untere Schale entsprechend der vordefinierten Schalendicken betoniert und mit einer Rüttelflasche verdichtet.
2. Die Dämmung wird in den noch frischen Beton eingedrückt, sodass Verbund zwischen Dämmung und Beton entsteht. Die GFK-Verbindungsmitel werden durch die vorgebohrten Löcher eingesteckt und mit dem Gummihammer in die untere Schale eingeklopft, sodass eine gute Verankerung in der unteren Schale entsteht.
3. Anschließend wird die Bewehrung der oberen Schale eingelegt und mit Abstandhaltern (kleinen Gitterträger) positioniert. Die obere Schale wird mit Beton verfüllt und mit einer Rüttelflasche verdichtet. Die Prüfkörper werden nach der Betonage unter einer Kunststoffolie (für mindestens 24 Stunden) gelagert, bevor sie ausgeschalt werden. Die Schalungsseiten werden hierbei mit speziellen Vorrichtungen seitlich gehalten, sodass die Wandgeometrien eingehalten werden.

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung mehr als 100 Tage gelagert und gegen Niederschlag geschützt. Das entspricht den Anforderungen von DIN EN 1363-1 [16]. Demnach soll ein Probekörper solange gelagert werden, bis seine Festigkeit und Feuchtegehalt mit dem vergleichbar ist, den das Bauteil bei üblichen Verwendung aufweisen würde. Weitere Kennwerte des Probekörpers sowie die Ergebnisse der Betondruckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 12390-3 können der Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Betondruckfestigkeitsprüfung

Nr.	Prüfungsfatum	Druckfestigkeit	Mittelwert	Standard Abweichung
-	-	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1.	21.06.2017	57,92	55,78	±1,95
2.		55,27		
3.		56,59		
4.		53,34		

### 6.3.3. Prüfanordnung und Versuchsdurchführung

Die Prüfung erfolgte auf Basis von DIN EN 1363-1 [16] sowie DIN EN 1365-1 [46], die die Prüfanordnungen zur Untersuchung des Verhaltens von tragenden Wänden beschreiben. Die Brandbelastung entsprach der Einheitstemperaturzeitkurve gemäß DIN EN 1363-1 [16]. Die Überprüfung und Steuerung der Innentemperatur des Brandofens erfolgte mit sechs Ofen-Thermoelementen (siehe Abbildung 10).

Der Prüfkörper bildete den vertikalen Raumabschluss der Brandkammer vom Großbrandofen mit den lichten Öffnungsmaßen Breite x Höhe = 3000 mm x 3000 mm. Die Tragschale ist jeweils direkt auf den Prüfraumen auf einer Mörtelschicht mit der Dicke von ca. 1-2 cm (KS-Dünnbettmörtel Mörtelklasse M10) gelagert, so dass die Vorsatzschale frei hängt. Auf den oberen Rand der Tragschale wird mit einer Mörtelschicht (KS-Dünnbettmörtel Mörtelklasse M10) ein Stahlvollquerschnitt 15x15 mm als Lasteinleitung gemauert. Die vertikalen Fugen zwischen Wand und Prüfraumen wurden mit elastischer, nichtbrennbarer Steinwolle verschlossen, so dass die frei verschiebliche Lagerung gewährleistet ist.



Abbildung 10: Innenraum des Brandofens, Abdichtung und Ofen-Thermoelemente (Versuch 1)

#### 6.3.4. Belastung

Während der 120-minütigen Exposition im Brandversuch, werden die Wandelemente mit einer vertikalen, exzentrischen Streckenlast belastet. Die Prüflast orientiert sich an der Auflast eines Obergeschosses, die auf die Wand im wirklichen Endzustand wirken würde. Gewählt wurde eine Streckenlast von 52 kN/m. Die Belastung der Prüfwände erfolgte durch außermittige Krafteinleitung. Die Lastausmitte wurde dabei als ein Sechstel ( $1/6$ ) der Tragschalendicke ( $140/6 \sim 23$  mm) in die Richtung der Beflammung auf der Tragschale angesetzt. Die Lage der Lasteinleitung bei jedem Versuch kann Abbildung 6 entnommen werden. Nach dem Brand wurden die Wände gemäß DIN EN 1363-2 [9] mit einer Stoßbelastung geprüft (siehe Abbildung 11 (links)). Die ersten zwei Stöße erfolgten unter Last. Für den dritten Stoß wurde die Wand entlastet. Bei den geprüften Wänden bilden die relativ steiferen Verbindungsmittel punktförmige Auflager in Bezug auf die Vorsatzschale. Zwischen den Verbindungsmittelreihen wird die Vorsatzschale auf einer verhältnismäßig weichen, nachgiebigen Bettung aus Mineralwolle gelagert. Wenn die Stoßbelastung in die Feldmitte der Vorsatzschale trifft (in weiter Entfernung zu den unterstützenden Verbindungsmitteln), kann die dünne Schale brechen und so zum Versagen führen. Die Ausrichtung der Verbindungsmittel wurde so konzipiert, dass die ungünstigste Prüfkonzellation untersucht werden konnte. Dabei entsprach nämlich die Wandmitte der Feldmitte im Ankerraster.

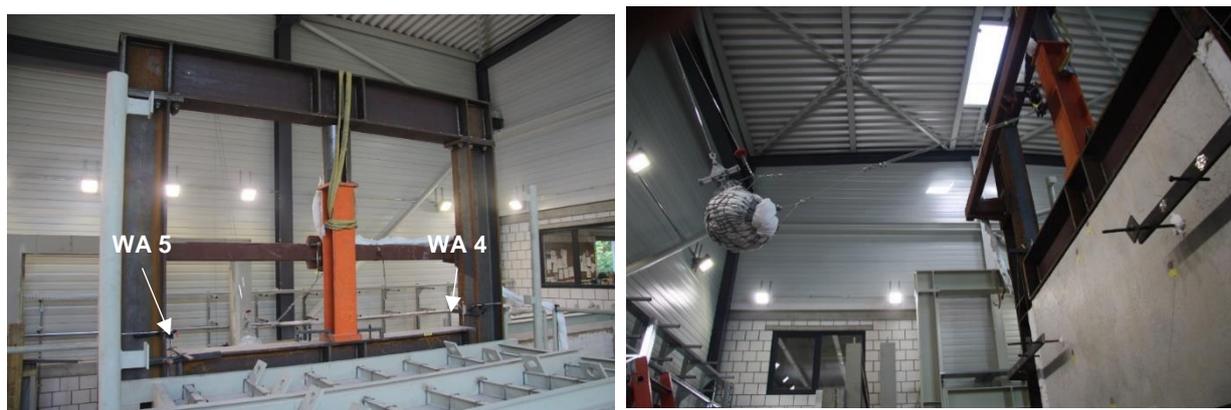
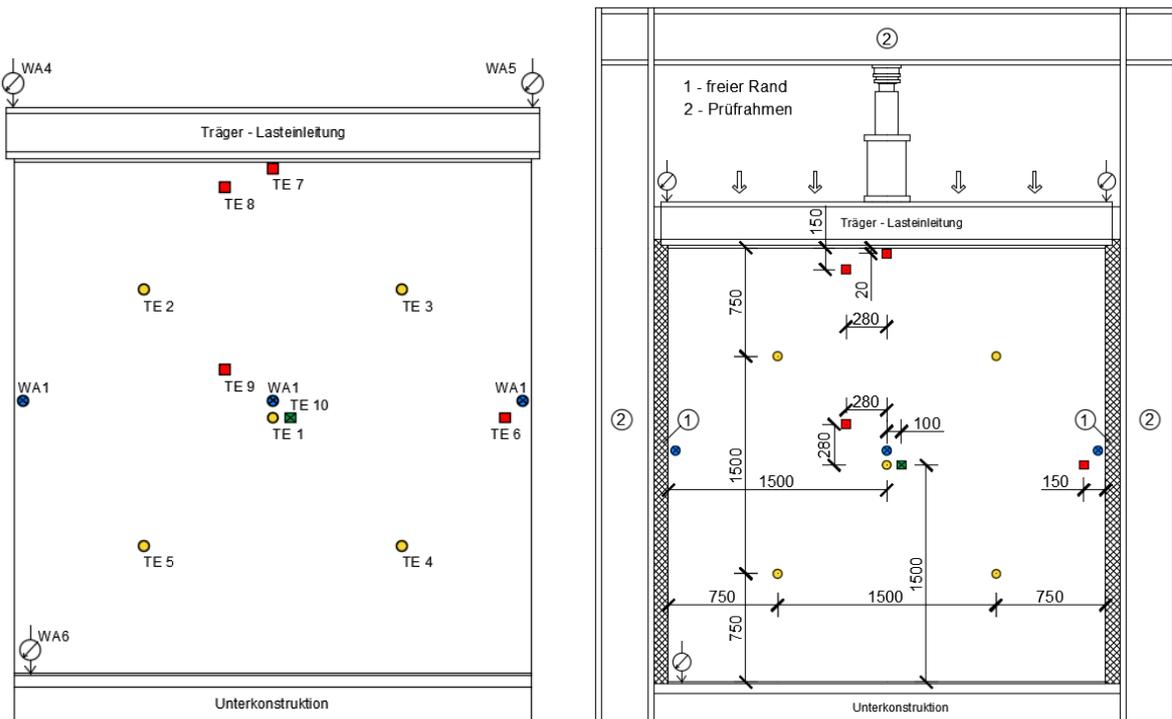


Abbildung 11: Versuchsaufbau; Messtechnik zur Aufnahme von vertikaler Verformungen (links);  
Stoßbelastung (rechts)



**Legende:**

- Lage der Thermoelemente für den mittleren Temperaturanstieg (TE1-5)
- Lage der Thermoelemente für den maximalen Temperaturanstieg (TE6-9)  
(TE10 – Temperaturanstieg zwischen Dämmung und Vorsatzschale)
- Lage des Temperaturelements für den Temperaturanstieg im Querschnitt
- ⊗ Lage der Durchbiegungs-Messpunkte (Wegaufnehmer WA1-3)  
WA4 und WA5 Wegaufnehmer zur Bestimmung von vertikalen Verformung  
WA6 Wegaufnehmer zur Bestimmung der Senkung von Vorsatzschale

Abbildung 12: Lage der Temperatur- und Verformungsmesspunkte (links), Positionierung des Prüfkörpers im Prüfraum des Brandofens (rechts)

### 6.3.5. Messtechnik

Die Temperaturmessung an der unbeflammten Seite erfolgte mit 9 Thermoelementen Typ K (Genauigkeit  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ ) nach DIN EN 1363-1 [16]. Eine Skizze mit der Lage der Thermoelemente kann Abbildung 12 entnommen werden. Dabei wurden die Thermoelemente TE1-5 zur Bestimmung des mittleren Temperaturanstiegs angesetzt. Die Thermoelemente TE6-9 dienten zur Bestimmung des maximalen Temperaturanstiegs. Die Thermoelemente TE 8 und TE9 wurden jeweils in der obersten und mittleren Verbindungsmittelreihe (vergl. Abbildung 7) befestigt, um die maximale Temperatur mit Berücksichtigung der potenziellen Wärmebrücken wegen der Präsenz von Verbindungsmitteln zu messen. Zusätzlich wurde die Temperatur in der Ebene zwischen Dämmung und der unbeflammten Schale mit einem einbetonierten Thermoelement TE10 gemessen.

Die Verformungen der Wände wurden mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Horizontalverformungen wurden an drei Punkten in 1500 mm Höhe, einmal mittig und jeweils am rechten und linken Rand gemessen. Die Lage der Messstellen kann Abbildung 12 entnommen werden. Vertikalverformungen wurden am Wandkopf jeweils an der linken und rechten Seite gemessen (siehe Abbildung 11 (rechts)). Zusätzlich um die relative Verschiebung der Vorsatzschale der

Tragschale gegenüber aufnehmen zu können wurde bei Versuch 1 und Versuch 3 die vertikale Verschiebung der Vorsatzschale am unteren Rand gemessen (WA6). Alle Messdaten wurden mit einer Speicherfrequenz von 0,2 Hz (alle 5 Sekunden) gespeichert. Zusätzlich zu den während dem Brand durchgeführten Messungen wurden auch zwei bis drei Tage nach den Brandversuchen Beobachtungen an den abgekühlten Wänden gemacht, die ergänzende Informationen liefern.

#### 6.4. Prüfergebnisse nach Klassifizierungskriterien

Die während der Prüfung gemessenen Temperaturen, der Ofeninnendruck in der Brandkammer, die Temperaturerhöhung an der unbeflammten Seite, sowie die horizontalen und vertikalen Verformungen des Probekörpers sind in Anhang A graphisch aufbereitet.

In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse bezüglich der vertikalen Verformung der Prüfkörper zusammen mit den Grenzwerten von DIN EN 13501-2 [4] zusammengestellt.

Tabelle 7: Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2 für tragende Bauteile mit raumabschließender Funktion

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Tragfähigkeit</b>			
Axiale Verkürzung $C = h/100$ [mm]	$9,90 < \frac{3000}{100} = 30$ Ausdehnung, keine Verkürzung	$2,05 < \frac{3000}{100} = 30$ Ausdehnung, keine Verkürzung	$18,76 < \frac{3000}{100} = 30$ Ausdehnung, keine Verkürzung
Geschwindigkeit der axialen Verkürzung $dC/dt = 3h/1000$ [mm/min]	$0,33 < 3 \cdot \frac{3000}{1000} = 9$	$0,27 < 3 \cdot \frac{3000}{1000} = 9$	$0,61 < 3 \cdot \frac{3000}{1000} = 9$
Durchbiegung $D = L^2/(400d)$ [mm]	$45,38 < \frac{3000^2}{400 \cdot 140} = 160,7$	$10,23 < \frac{3000^2}{400 \cdot 140} = 160,7$	$56,89 < \frac{3000^2}{400 \cdot 140} = 160,7$
Durchbiegungsrate $dD/dt = L^2/(9000d)$ [mm/min]	$1,40 < \frac{3000^2}{9000 \cdot 140} = 7,14$	$1,25 < \frac{3000^2}{9000 \cdot 140} = 7,14$	$2,63 < \frac{3000^2}{9000 \cdot 140} = 7,14$
<b>Raumabschluss</b>			
Öffnungen	keine Öffnungen festgestellt	keine Öffnungen festgestellt	keine Öffnungen festgestellt
Entzündung eines Wattebausches	keine	keine	keine
Flammen auf der dem Feuer abgewandte Seite	keine	keine	keine
<b>Wärmedämmung</b>			
Mittlere Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgewandten Seite	$52,46 < 140$ °C	$29,65 < 140$ °C	$51,04 < 140$ °C
Maximale Anfangstemperaturerhöhung	$56,41 < 180$ °C	$31,10 < 180$ °C	$56,11 < 180$ °C

Bei allen Versuchskörpern konnten die Leistungskriterien Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung auch während und nach der in der Prüfnorm beschriebenen Stoßbeanspruchung aufrechterhalten werden.

Die Ergebnisse der Brandprüfung sind direkt auf ähnliche Ausführungen anwendbar, bei denen eine oder mehrere der nachstehend aufgeführten Veränderungen vorgenommen werden und bei denen die Ausführung hinsichtlich ihrer Steifigkeit und Festigkeit weiterhin die Anforderungen der entsprechenden Bemessungsnorm erfüllt.

- Vergrößerung der Wandlänge
- Vergrößerung der Dicke von Tragschale
- Verringerung der Auflast
- Reduzierung der Sandwichwandhöhe

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse können die geprüften Sandwichwandkonstruktionen in die Feuerwiderstandsklasse REI 120 – M nach DIN EN 13501-2 [4] bzw. F120 nach DIN 4102-2 [2] eingestuft werden. In den nachstehenden Kapiteln wird genauer das mechanische und thermische Verhalten der Sandwichwände und deren Komponenten in den Brandversuchen beschrieben.

### 6.5. Vertikales Verformungsverhalten

Nach Norm DIN EN 13501-2 [4] hat der Feuerwiderstand der tragenden Brandwände versagt, wenn die gemessene vertikale Verformung oder die Geschwindigkeit der vertikalen Verformung im Brandversuch die Grenzwerte überschritten hat. Dabei ist zu erwähnen, dass die in der Norm vorgesehenen Verformungen und deren Begrenzung negativ sind (Verkürzung der Wand). Die in allen Brandversuchen erreichten Verformungen haben sich entgegen dieser Annahme verhalten, da in jedem Fall eine Wandausdehnung beobachtet werden konnte (siehe Abbildung 13). Die erreichten maximalen Werte der Verformungen und deren Geschwindigkeit haben die Grenzwerte nicht überschritten, was Tabelle 7 entnommen werden kann.

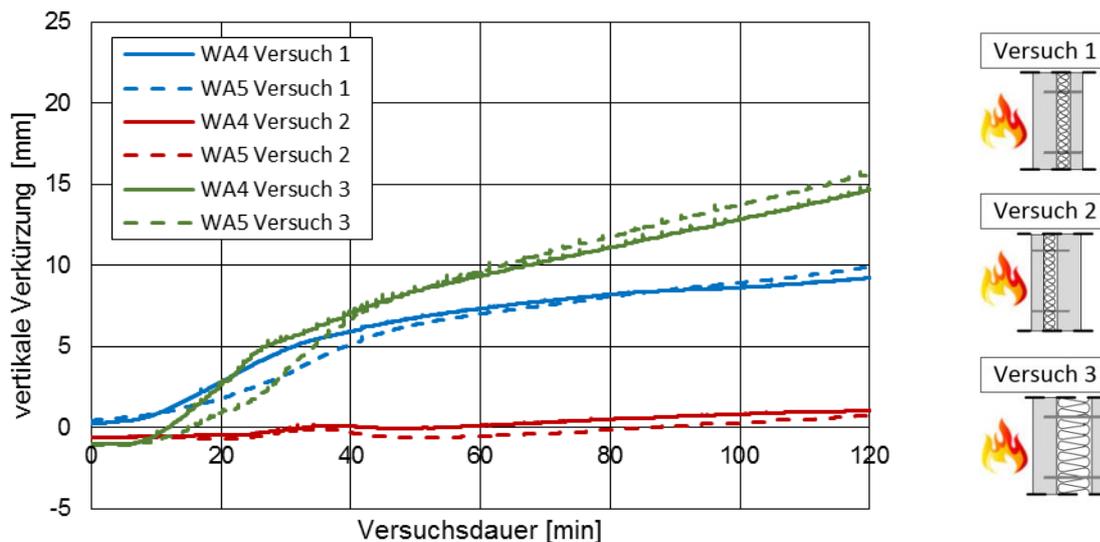


Abbildung 13: Vertikale Verformungen („-“, Stauchung; „+“ Verlängerung) der Sandwichwände während des Brandversuchs

Eine kurzzeitige Verkürzung der Wand in Bezug auf die Wandhöhe wurde in den Versuchen 2 und 3 beobachtet. Die geringe Startausdehnung der Wand im Versuch 1 wurde durch kurzzeitiges Vorheizen des Ofens aufgrund von technischen Problemen verursacht. Die vertikale exzentrische Belastung wurde mit einem hydraulischen Zylinder aufgebracht und konstant gehalten. Während der Aufheizphase, kurz nach dem Start des Brenners, beginnt die Wand sich thermisch auszudehnen. Dies resultiert in Druck gegen die Lasteinleitungsträger, die zwischen der Wand und der Kraftmessdose eingebaut war. Um die übermäßige Last abzubauen wurde der Öldruck kontinuierlich über die Versuchsdauer mit einem Ventil nachreguliert, sodass die Last möglichst konstant gehalten werden konnte. Die aufgenommene thermische

Ausdehnung war im Versuch 3 maximal. Dies bestätigt, dass aufgrund der dickeren Dämmschicht eine höhere thermische Belastung bei Beflammung der Tragschale im Vergleich zu Versuch 1 verursacht wurde. Ein deutlich anderes Verformungsverhalten wurde im Versuch 2 beobachtet, wo die Kernschicht lediglich als thermische Dämmung für die unbeflammte Tragschale wirkte. Die Ausdehnung im Versuch 2 betrug lediglich ca. 1 mm, was 10% der gemessenen thermischen Ausdehnung von Versuch 1 und 7% vom Versuch 3 entspricht.

## 6.6. Horizontales Verformungsverhalten

In Bezug auf das horizontale Verformungsverhalten wurde bei jedem der drei durchgeführten Versuche eine eindeutige thermische Biegung der Wand in Richtung des Brandofeninneren beobachtet. Die gemessenen horizontalen Verformungen sind in Abbildung 14 graphisch dargestellt. Die angewendete Norm setzt Grenzwerte für die horizontalen Verformungen und deren Geschwindigkeit.

Die Analyse der auftretenden Verformungen ist von hohem Interesse, da relativ große Bauteilverformungen erwartet wurden. Die thermische Biegung einer einseitig brandbeanspruchten Betonsandwichwand, fällt erfahrungsgemäß größer aus als es bei massiven Betonwänden mit gleichen Dicken der Fall wäre. Dies begründet sich durch den größeren Temperaturgradienten zwischen beflammter und unbeflammter Bauteiloberfläche. Die größten Verformungen wurden bei allen drei Versuchen in dem Zeitraum zwischen der siebten bis zur 35 Minute nach Belastungsbeginn gemessen. Nach dieser Phase der raschen Verformungszunahme, nahm die Geschwindigkeit der horizontalen Verformungen deutlich ab. Bei keinem der drei Versuche wurde auf der unbeflammten Seite eine Temperatur von über 100°C gemessen, was mit dem Verdampfen des freien Wassers in der Betonschale und Mineralwolle zu begründen ist. Die beobachtete Durchbiegung resultierte aus Spannungsumlagerungen zwischen der beflamnten und der unbeflammten Schale, die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen unterlag. Außerdem wurde die Durchbiegung der Wände zusätzlich durch die Durchbiegung der einzelnen Schalen infolge des Temperaturgradienten über ihre jeweilige Dicke verstärkt. Die sehr geringe (2 - 4 mm) Anfangsdurchbiegung bei Versuch 1 wurde durch das kurzzeitige Vorheizen des Ofens vor dem eigentlichen Versuchsstart verursacht.

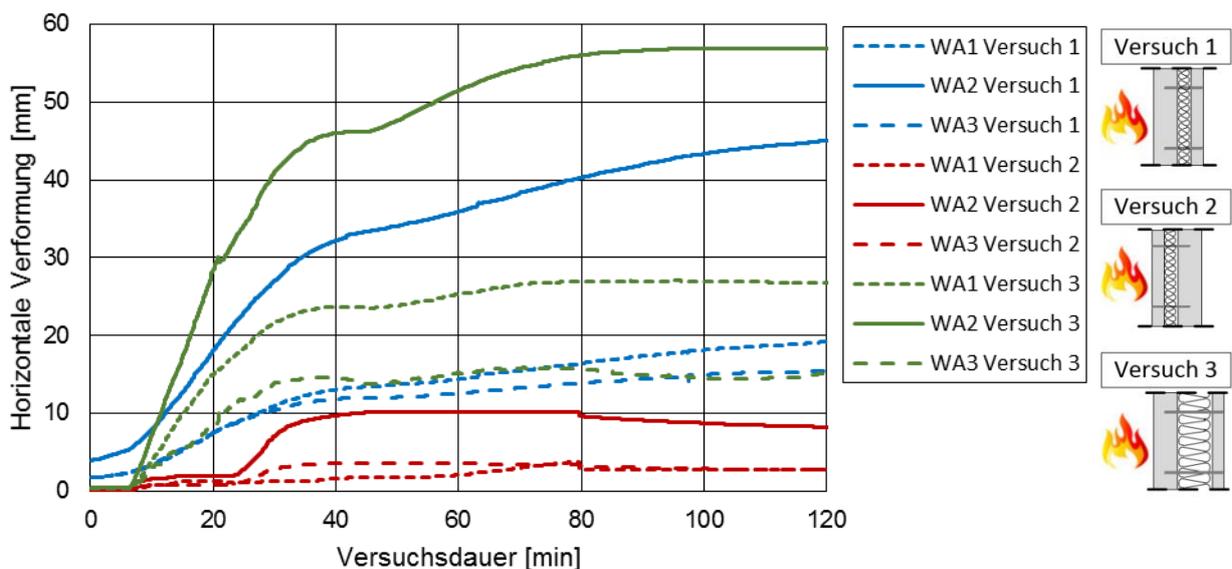


Abbildung 14: Horizontale Verformungen der Sandwichwände über die Dauer des Brandversuchs

Die größte aufgenommene Durchbiegung - im Versuch 3 (56,9 mm), kann durch den größeren Temperaturgradienten zwischen den Betonschalen infolge der dickeren Dämmschicht erklärt werden. Dies resultiert in größeren Ausdehnungsunterschied zwischen den Schalen und der dadurch verursachten größeren Durchbiegung der Wand. Der Temperaturgradient über die beflamnte Schale wurde beim Versuch nicht gemessen.

Die kleinste Durchbiegung (10,23 mm) wurde aus ähnlichen Gründen in Versuch 2 erwartet. Die geringere Dicke der beflamnten Schale resultierte in einem geringeren Temperaturgradienten und gleichzeitig geringeren thermischen Dehnungen als in Versuch 1 und 3. Die relativ geringere Steifigkeit der Vorsatzschale und zusätzlich ihre teilweise Entkopplung von der Tragschale (Versagen von Verbindungsmittel des inneren Wandbereichs) und Betonabplatzungen resultierte in geringeren Durchbiegung in den ersten 25 Minuten im Versuch 2. Nach diesem Zeitpunkt, stieg die Durchbiegung der Wand weiter an. Dies kann durch den Temperaturgradient und die thermisch induzierte Biegung der Tragschale infolge des Aufheizens des freien Wassers (vergleiche mit Abbildung 15) erklärt werden.

### 6.7. Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung von beflamnter Schale zur unbeflammten Schale wurde mit den Thermoelementen TE1 bis TE10 gemessen. Hinsichtlich der Anforderungen an die konstruktiven Elemente, die als Brandwände eingesetzt werden sollen, darf der mittlere Temperaturanstieg auf der beflamnten Seite nicht höher als 140°C sein, während die maximale Temperatur nicht mehr als 180°C über der Anfangstemperatur liegen darf. Die Versuchsnormen setzen keine Anforderungen an Temperaturanstieg innerhalb des Sandwichquerschnittes. Die grundlegenden Erkenntnisse zum Temperaturgradienten über die Wanddicke ermöglichen eine Erfassung der thermischen und mechanischen Eigenschaften des Dämmmaterials und der Verbindungsmittel.

Es wurde ein plötzlicher Anstieg der Temperatur bis ca. 100°C in der Ebene zwischen Dämmschicht und unbeflammter Schale festgestellt (siehe Abbildung 15). Das beobachtete Plateau bei 100°C wird durch Verdampfung des freien und verbundenen Wassers verursacht, da ähnlicher Effekt wurde bereits in Brandversuchen an Sandwichelementen beobachtet [27]. Dies zeigt, dass das freie Wasser in der beflamnten Betonschale mit Erreichen einer Temperatur von 100°C zu kochen beginnt. Dieser Vorgang führte zu einem raschen Temperaturanstieg auf bis zu 100°C in 5 bis 10 Minuten über die gesamte Dicke der Kernschicht durch das verdampfende, kochende Wasser. Dieser Effekt sollte beim Entwurf von Sandwichelementen berücksichtigt werden, besonders für thermisch empfindliche Materialien wo ein plötzlicher Anstieg der Temperatur bis 100°C den mechanischen Beitrag der Dämmung zur Biegesteifigkeit einer Sandwichwand komplett eliminieren kann. Der frühe Anstieg der Temperatur im Fall von Versuch 2 (nach 19 Minuten) ist auf die geringe Dicke der beflamnten Schale zurückzuführen (in diesem Versuch wurde die Vorsatzschale beflamnt). Da die beflamnte Schale den Temperaturanstieg über den Wandquerschnitt verhindert zeigen die Ergebnisse, dass die Dicke der beflamnten Schale einen maßgebenden Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit der thermisch empfindlichen Dämmmaterialien von Sandwichwänden haben kann. Der im Versuch 2 gemessene geringe graduelle Abfall der Temperatur von 100°C auf 96°C ist auf das Verdampfen der Feuchte zurückzuführen, da diese in dieser Phase das wichtigste Wärmeübertragungsmittel ist. Die gemessene Temperatur blieb bei allen Versuchen bis zum Ende des Versuchs konstant bei 100°C.

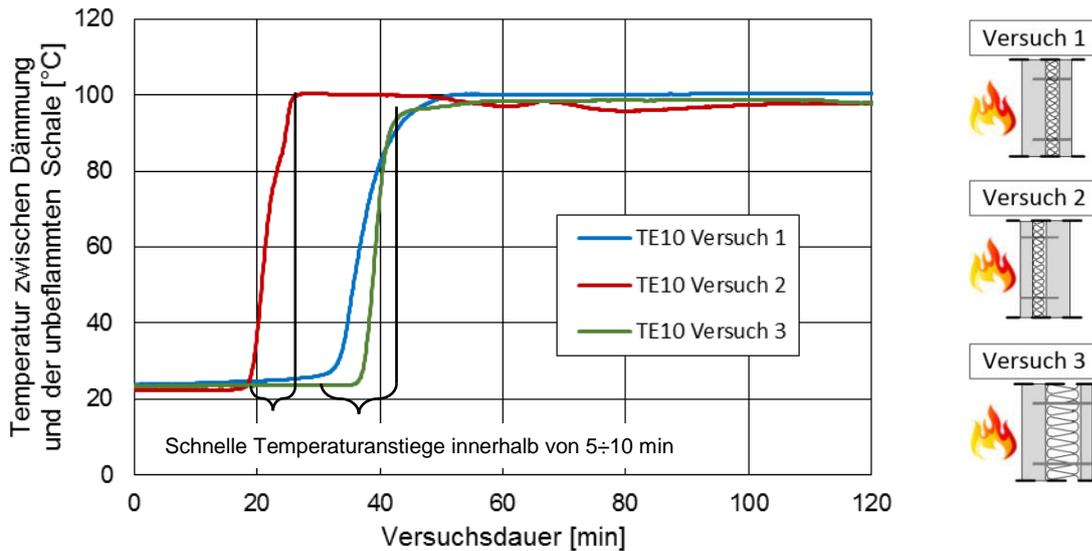


Abbildung 15: Temperaturanstieg in der Ebene zwischen Dämmung und der unbeflammten Schale

Der mittlere Temperaturanstieg (berechnet als Mittelwert von den Temperaturen der Thermoelementen TE1 bis TE5) ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Versuche 1 und 3 zeigten ein ähnliches Wärmeübertragungsverhalten, da sie sich nur in der Dicke der Dämmschicht unterschieden. In beiden Versuchen stellten sich die Phase des raschen Temperaturanstiegs nach ca. 50 min bezogen auf den Start des Brenners ein. Die gemessene mittlere Temperatur (TE1 bis TE5) zum Versuchsende (nach 120 min) nahm bei allen Versuchen ungefähr den gleichen Wert an. Die maximale Durchschnittstemperatur wurde beim dritten Versuch mit 51,04°C, was lediglich 37% der maximal, zulässigen Temperaturerhöhung entspricht, erreicht. Die Durchschnittstemperatur stieg am Frühesten im Versuch 3 (siehe Abbildung 17) (Versuch mit einer Dämmschichtdicke von 200 mm) an. Dies zeigt, dass die Dicke der Dämmschicht eine untergeordnete Rolle bei der Wärmeübertragung im Brandversuch spielt, da das kochende Wasser die gesamte Kernschicht aufheizt. Der relativ geringe Unterschied zwischen den Versuchen 1 und 3 deutet auf denselben Effekt hin und könnte durch unterschiedliche Feuchtegehalte in Beton und Dämmung verursacht werden. Die Feuchte der Materialien wurde nicht gemessen, jedoch ein intensiver Austritt von Wasserdampf in den Versuchen 1 und 3 beobachtet (mehr als 10 l Flüssigkeit), (siehe Abbildung 16 (rechts)).



Abbildung 16: Prüfbeobachtungen; Verdrehen an der unteren Kante (Versuch 2) (links) und Austritt von Wasserdampf (Versuch 1) (rechts)

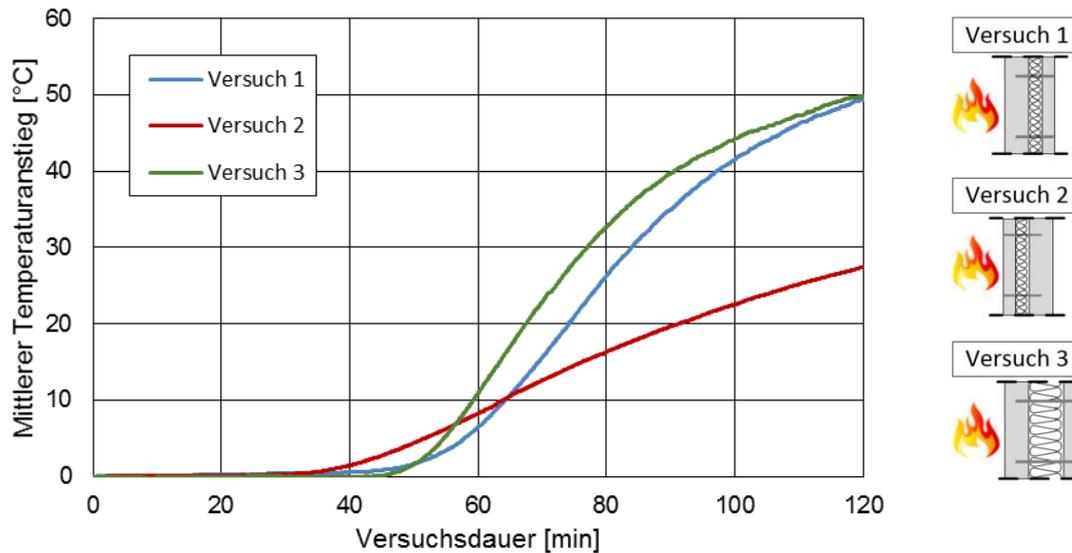


Abbildung 17: Mittlerer Temperaturanstieg auf der unbeflammten Seite

Bei Versuch 2 befand sich die Vorsatzschale zusammen mit der Kernschicht in der Brandkammer des Ofens. In diesem Fall hat die Temperatur 5 min früher (40 min nach Brennerstart) angefangen anzusteigen. Der erreichte maximale Wert von 29,7°C entspricht nur 21% des maximal zulässigen, mittleren Temperaturanstiegs. Diese Ergebnisse begründen sich durch den Austritt und Abzug des Wasserdampfs in der Brandkammer. Die relativ schnell entfeuchtete Dämmschicht hat das maßgebende Wärmeübertragungsmedium (Wasser) verloren, was zu einem relativ langsamen Temperaturanstieg führte. Es konnte beobachtet werden, dass die nichtbrennbare thermische Dämmung ihre dämmende Funktion auch in der Brandsituation beibehalten hat. Die Dämmschicht reagiert jedoch sehr empfindlich auf das schnelle Aufheizung durch das kochende freie Wasser, was zu einer schnellen Erwärmung der gesamten Kernschicht auf bis zu 100°C führt, die dann für 120 Minuten erhalten bleibt. Da die ersten 120 min in der Brandsituation in der Regel entscheidend sind, ist dieser Effekt in Sandwichwänden von großer praktischer Bedeutung. Maßgebend für die Wärmeübertragung innerhalb der ersten Stunde ist nicht die Wärmeübertragung durch die einzelnen Schichten, sondern die Migration des kochenden Wassers. Dieser Effekt kann nur mit einer erhöhten Dicke der beflammt Betonschale verzögert werden.

Die maximale Temperatur auf der unbeflammten Seite wurde in jedem Versuch mit dem Thermoelement TE9 gemessen, das sich auf der unbeflammten Seite der Wand möglichst nah an einem Verbindungsmittel in Wandmitte befand (siehe Abbildung 12). Diese Beobachtungen bestätigen, dass die Verbindungsmittel Wärmebrücken bilden und zu der Wärmeübertragung von der beflammt zur unbeflammten Wandseite beitragen. Dieser Beitrag war jedoch relativ gering. Der maximal aufgezeichnete Temperaturanstieg (siehe Abbildung 18) war mit 56,41°C und 56,1°C in den Versuchen 1 und 3 näherungsweise identisch und betrug lediglich 31,1°C in Versuch 2. Diese Temperaturen entsprechen ca. ~31% (Versuch 1 und 3) sowie ~17% (Versuch 2) bezogen auf den maximal zulässigen Temperaturanstieg.

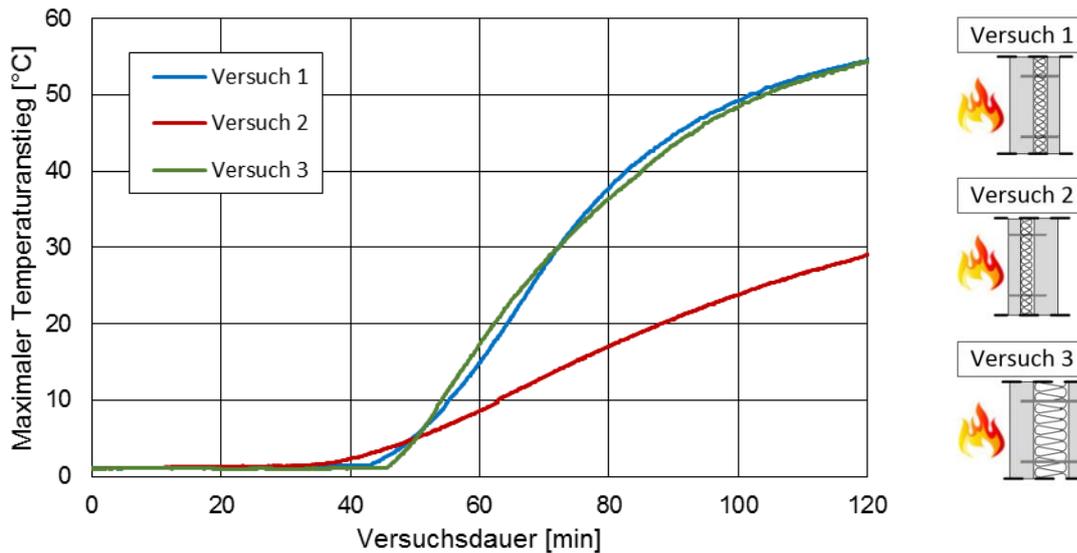


Abbildung 18: Maximaler Temperaturanstieg auf der unbeflammten Seite

### 6.8. Brandverhalten der Kernschicht

Die Kernschicht muss im Brandfall gewisse Anforderungen erfüllen, damit eine Sandwichwand als Brandwand klassifiziert werden kann. Demnach darf die Kernschicht nicht zur Ausbreitung eines Feuers beitragen und viele Gase beim Brennen erzeugen. Des Weiteren soll sie den thermischen Schutz der Tragschale, sowie eine ausreichende thermische Dämmung der Wand gewährleisten. Im Fall von Sandwichwänden sollte die Kernschicht möglichst lange und effektiv die Schubkräfte zwischen den Betonschalen übertragen. In Versuchen wurden durch Beobachtung die Wandverformungen und das generelle physikalische Verhalten während und nach der Brandbeanspruchung bewertet.

Die Mineralwolle hat die Krümmung der Betonschalen über die gesamte Höhe der Wände bei den Versuchen 1 und 3 angenommen. Es konnte kein Ablösen der Dämmung von den Betonschalen oder interlaminare Schubriss auf den sichtbaren Seiten der Wände beobachtet werden. Weder bei der Versuchsdurchführung noch nach Ende des Versuchs konnte eine Entfestigung des Materials festgestellt werden. Die Untersuchung der abgekühlten Versuchskörper hat gezeigt, dass die beflamte Seite der Mineralwolle bis zur Hälfte, besonders in dem mittigen Bereich der Wand, poröser und weicher geworden ist. Beim Versuch 2 hat sich die beflamte Vorsatzschale mechanisch von der Tragschale aufgrund des Schmelzens der GFK-Verbindungsmitel gelöst (siehe Abbildung 24). Dadurch ging auch der Verbund zwischen Vorsatzschale und Dämmung verloren. Jedoch blieb die Dämmung mit der Tragschale verbunden, sodass ihre thermisch dämmende Funktion wie bei den zwei vorherigen Versuchen erhalten blieb (vergleiche mit Abbildung 15).

Die geprüften Sandwichwände wurden mittig entlang ihrer langen Seite aufgeschnitten (siehe Abbildung 19) um den Einfluss der Brandbeanspruchung auf die Verbindungsmittel zu sehen.

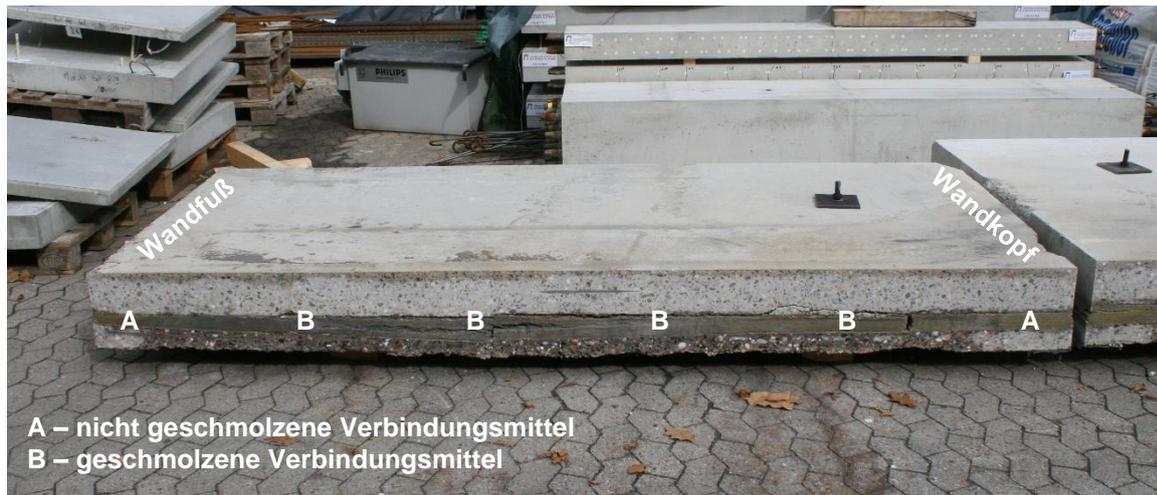


Abbildung 19: Lage der geschmolzenen Verbindungsmittel in der durchschnittenen Sandwichwand nach dem Brand (Versuch 2)



Abbildung 20: Ausbau der Sandwichwand (links) zur Untersuchung der Kernschicht des Brandversuches 3, thermische Beschädigungen der GFK-Verbindungsmittel (rechts)

Die Untersuchung mit dem bloßen Auge hat gezeigt, dass die Verbindungsmittel in der obersten und untersten Reihe (Lage A) ihre ursprüngliche Form und Farbe behielten, sodass keine Anzeichen einer thermischen Beschädigung festgestellt werden konnten. Im Gegensatz dazu zeigten die Verbindungsmittel in mittleren Bereich der Wand (Lage B) Beschädigungen infolge hoher Temperaturexposition während des Versuchs. Der Grad dieser Beschädigungen war bei allen drei Versuchen unterschiedlich.

Die Verbindungsmittel der Lage B in den Wänden 1 und 3 wurden über ihre freie Länge, auf Seite der beflamten Schale stark beschädigt. Über diese Länge konnte eine deutliche Verkohlung, sowie die Abwesenheit von Harz entlang des äußeren Stabumfangs festgestellt werden, sodass die Fasern durch die fehlende Harz imprägnierung ungeschützt sind. Die Verbindungsmittel waren dabei im abgekühlten Zustand immer noch fest und in ihrer originalen Form erhalten. Dies beweist, dass die Glasfasern im Inneren des Bewehrungsstabes immer noch mit Harz geschützt und stabilisiert sein müssen. Die beschriebene thermische Beschädigung betrug beim ersten Versuch 2 cm und beim dritten Versuch 7 cm ihrer freien Länge. Dieser Unterschied zeigt, dass die Verbindungsmittel in Versuch 3, bei denen die Dämmschichtdicke 200 mm betrug, auf einen längeren Abschnitt deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt waren. Die Verbindungsmittel der Versuchskörper 1 und 3, die in der Mitte des Wandelements platziert waren, wurden zur genaueren Untersuchung vom Beton befreit. Die Untersuchung der Verbindungsmittel hat gezeigt, dass sie auch über ihre Einbindetiefe immer noch fest und steif waren (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Ausgebautes Verbindungsmittel aus Versuchskörper 3 nach dem Brandversuch

In Abbildung 21 ist der infolge des HerauslöSENS aus dem Beton ungewollt beschädigte Stab dargestellt. Da der Bruch an dem Ende des Verbindungsmittels, wo er den hohen Temperaturen ausgesetzt war eingetreten ist, bestätigt dies die abgeminderten mechanischen Eigenschaften des Stabes infolge der Temperaturbelastung. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden deutlich höhere thermische Beschädigungen der Stäbe festgestellt, als in Schmitt u. a. 2017 [36] berichtet. Hierbei wiesen die gleichen GFK-Bewehrungsstäbe auf der Staboberfläche keine Spuren einer thermischen Exposition auf, obwohl sie Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes des Harzes ausgesetzt waren. Im Hinblick auf das Tragverhalten der Verbindungsmittel im Brandfall kann anhand der Versuche festgestellt werden, dass die Stäbe nicht aus der beflamten Betonschale herausgezogen wurden. Dabei hängt im Allgemeinen die Reduktion des Auszugswiderstandes maßgeblich von dem Erreichen einer Temperatur nahe der Schmelztemperatur des Harzes ab [47] wohingegen die Oberflächenbeschaffenheit sowie der Durchmesser nur einen geringeren Einfluss auf die Größe des Auszugswiderstandes haben [48]. Obwohl die erreichte Versuchstemperatur in der beflamten Betonschale höher war, als die Schmelztemperatur des Harzes, hat die Verankerung der Verbindungsmittel nicht versagt und es konnten keine Anzeichen eines baldigen Versagens der Verbindungsmittel (Verlust des Auszugswiderstandes) festgestellt werden. Die Literaturquellen [49; 47] bestätigen, dass sich eine erhöhte thermische Belastung geringer auf die gerippten GFK-Stäbe auswirkt, als die besandeten GFK-Stäbe desselben Herstellers [50].

Eine Ähnliche, jedoch viel stärkere Beschädigung der Verbindungsmittel der Lage B wurde in Versuch 2 festgestellt. In diesem Fall, waren die beschädigten Stababschnitte länger und stärker verkohlt. In diesem Fall waren die Verbindungsmittel nur durch die 7 cm starke Vorsatzschale geschützt, die wegen der Betonabplatzung noch weiter reduziert wurde. Das Harz der Stäbe ist auf einer Länge von ca. 5 cm, bezogen auf deren freie Länge und der Einbindelänge geschmolzen. Dies wurde bei der Untersuchung der abgekühlten Versuchskörper festgestellt, da die kontinuierlich von Harz befreiten Glasfasern zu sehen waren (siehe Abbildung 22). In diesem Fall waren die Verbindungsmittel beinahe über ihre gesamte freie Länge thermisch beschädigt. Bis zu ihrer Hälfte waren die Verbindungsmittel stark verkohlt. Anhand dieser Erkenntnisse kann festgestellt werden, dass die Verbindungsmittel der inneren Lage B ihre Tragfähigkeit verloren haben, sodass die Vorsatzschale lediglich durch die Verbindungsmittel der äußersten Reihen (Lage A) gehalten wurde.

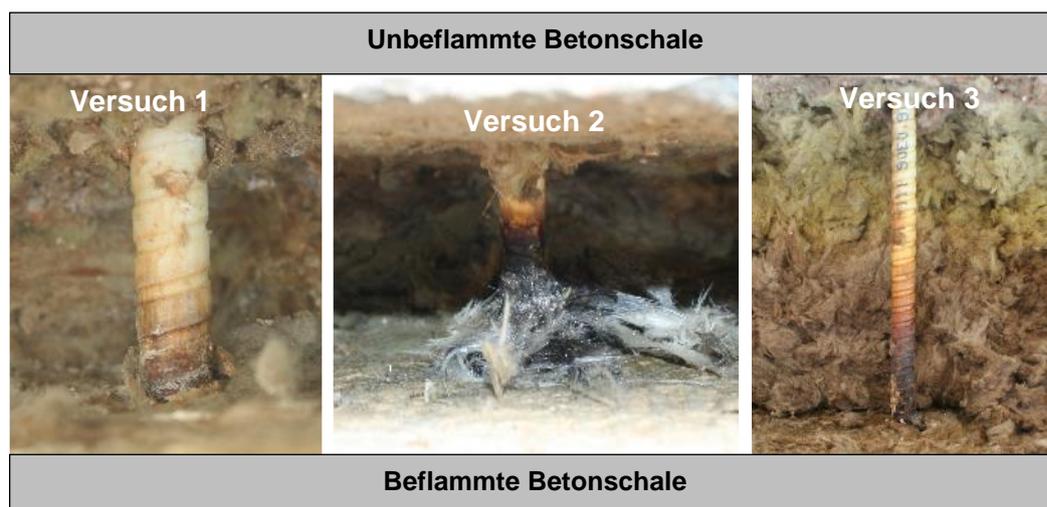


Abbildung 22: Exemplarische Bilder der thermisch beschädigten Verbindungsmittel

Ein plötzliches und intensives Steigen der Temperatur in den Betonschalen kann zu einer explosiven Betonabplatzung führen, was (laut Meyer-Ottens 1975 [39]) im Wesentlichen durch übermäßiges Ansteigen des Wasserdampfdrucks und der Druckspannungen auf der beflamnten Seite verursacht wird. Die plötzliche und intensive Temperaturerhöhung führte in den beiden Betonschalen zu einem übermäßigen Ansteigen des Porendrucks und der Druckspannungen auf der beflamnten Seite, was explosive Betonabplatzungen zur Folge haben kann. Bei den untersuchten Sandwichwänden war die erreichte Temperatur höher, als es bei einer freistehenden Betonschale mit einer Dicke, die der beflamnten Betonschale entspricht, der Fall wäre. Dies ist auf die eingebaute thermische Dämmung zurückzuführen, da sie den Wärmeabfluss der beflamnten Schale zusätzlich verhindert. In den Versuchen 2 und 3 traten in den ersten 15 bis 20 Minuten nach Versuchsbeginn auf der beflamnten Schale Betonabplatzungen von bis zu ca. 4 cm auf. Die beflamnte Innenseite der dem Brand zugewandten Betonschale war bei allen Versuchskörper sehr instabil und krümelig (siehe Abbildung 23). Die unbeflammte Außenseite blieb bei allen Versuchskörpern intakt (siehe Anhang A).



Abbildung 23: Beflammte Betonoberfläche nach dem Brand und Betonabplatzung (links) und ohne Betonabplatzung (rechts)

Dass bei Versuch 1 keine Betonabplatzungen aufgetreten sind, ist auf den Feuchtegehalt der Betonschale zurückzuführen, die durch die unterschiedliche Konditionierung des Versuchskörpers verursacht wurde. Diese Einflüsse wurden jedoch nicht erfasst. Als ein möglicher, relevanter Aspekt im Hinblick auf das Brandverhalten, wurde der potenzielle Einfluss der Verbindungsmittel auf den Abplatzungsprozess untersucht. Im Rahmen der durchgeführten

Versuche konnte nicht nachgewiesen werden, ob die Anwesenheit von stiftförmigen Verbindungsmittel Betonabplatzungen hervorrufen. Im Gegenteil, (siehe Abbildung 23), bei der Untersuchung des abgekühlten Versuchskörpers 2 wurde festgestellt, dass in der Nähe der eingebauten Verbindungsmitteln keine bzw. nur geringe Betonabplatzungen (im Vergleich zu anderen, stärker von Abplatzungen betroffenen Bereichen auf der untersuchten Wand) aufgetreten sind. Dieser positive Effekt kann durch den abgeminderten Porendruck in den Hohlräumen in der direkten Umgebung der Verbindungsmittel erklärt werden, da die geschmolzenen Bestandteile der Verbindungsmittel die Feuchte des Betons abfließen konnte.



Abbildung 24: Verwölbte Vorsatzschale nach dem Brand (links) und Fehlstelle durch ein geschmolzenes Verbindungsmittel (rechts) beim Versuch 2

## 6.9. Bewertung der Sandwichtragwirkung im Brandfall

Die vorhandene Sandwichtragwirkung spielt aus den folgenden zwei Gründen eine wichtige Rolle im Brandfall:

1. Da die Vorsatzschale und die Kernschicht einen mechanischen Beitrag zur Übertragung von Biegebelastungen leisten, ist die Biegesteifigkeit einer Sandwichwand gegenüber einer homogenen Wand (in Tragschalendicke) erhöht. Gleichzeitig stabilisiert die höhere Biegesteifigkeit die Wand gegen Ausknicken.
2. Damit eine Sandwichwand als Brandwand eingesetzt werden kann ist es erforderlich, dass beide Betonschalen mechanisch miteinander verbunden sind. In diesem Fall dürfen im Brandfall keine brennenden Teile oder Wandkomponente herabfallen. Außerdem darf nicht die gesamte Vorsatzschale im Brandfall herabfallen.

Die Verschiebung zwischen beide Betonschalen wurde während der Brandversuche mit einem Wegaufnehmer (WA6) gemessen. Dieser wurde eingesetzt, um die Relativverschiebung der beiden Schalen aufzunehmen. Diese Messung war bei den Versuchen 1 und 3 möglich, da die Vorsatzschale nach außen hin frei hing (siehe Abbildung 25). Die generellen Aussagen über den Grad der Sandwichtragwirkung wurden anhand dieser Messung und anderen Beobachtungen der Wandverformungen getroffen.

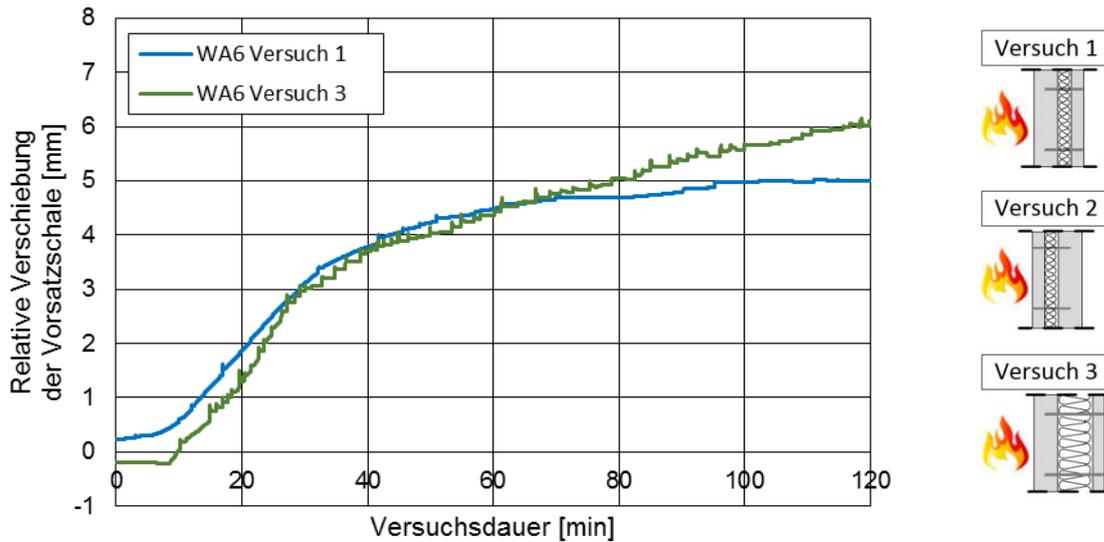


Abbildung 25: Vergleich der relativen Verschiebungen (WA6) der freihängenden Vorsatzschale in den Versuchen 1 und 3

Unter der Annahme, dass die mechanische Haftwirkung der Mineralwolle vernachlässigbar ist, wird das gesamte Gewicht der Vorsatzschale über die GFK-Verbindungsmitel abgetragen. Die Thermische Beschädigung der Verbindungsmitel wird durch die Reduzierung der Schubtragfähigkeit der Verbindungsmitel berücksichtigt und resultiert letztendlich in einer Senkung der Vorsatzschale.

Auf der anderen Seite, kommt es aufgrund der Verwölbung der Wand infolge des Temperaturgradienten zu einem Verdrehen des Wandquerschnitts am Wandfuß. Durch das Verdrehen der Wand am Wandfuß hebt die äußere Kante nach oben hin ab (siehe Abbildung 16 (links)). Die Risse in der unteren Fuge (siehe Abbildung 16) bestätigen, dass dieser Mechanismus aufgetreten ist.

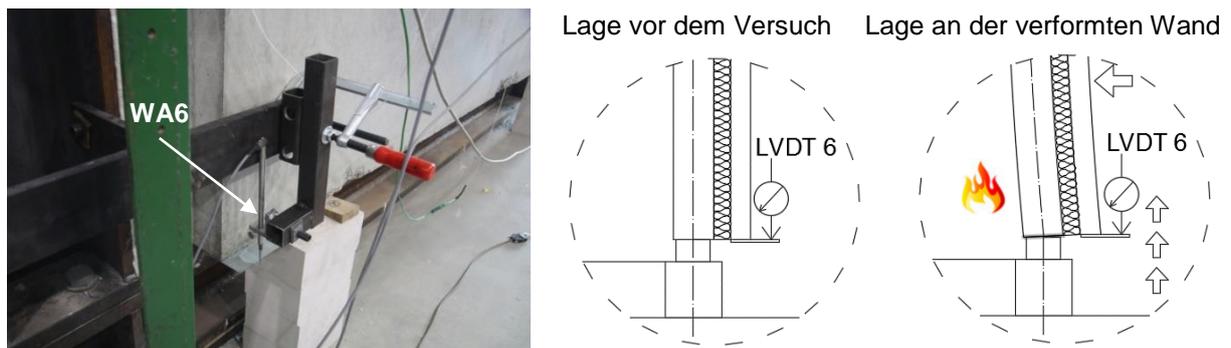


Abbildung 26: Lage des Wegaufnehmers zur Messung der relativen Verschiebung der Vorsatzschale bei den Versuchen 1 und 3 – Abheben der unteren Kante aufgrund der thermischen Verwölbung der Wand

Die beiden beschriebenen Verformungsmechanismen sind gleichzeitig während des Brandversuchs eingetreten, sodass die gemessene Verschiebung der unteren Kante (WA6) den Unterschied beider Effekte aufzeigt. Die gemessene Verschiebung nach oben bestätigt, dass die thermische Verwölbung der Wände viel größer war als die potenzielle Senkung der Vorsatzschale wegen der Beschädigung der Kernschicht.

Die kleine Senkung der Vorsatzschale zu Beginn von -0,2 mm beim Versuch 3 (siehe Abbildung 25) wurde durch die aufgebrachte vertikale Last verursacht. Bei Versuch 1 hat sich die Vorsatzschale wegen des ungewollten Vorheizens der Wand bereits vor dem Versuch um 0,3 mm verformt. In beiden Versuchen unterliegen die Vorsatzschalen in den ersten neun Minuten nach dem Brennerstart einer starken Verformung, wenn die Wand beginnt, sich infolge des Temperaturgradienten in einem hohen Maß zu biegen. Die gemessene Endverformung ist bei Versuch 3 mit ca. 1 mm Differenz im Vergleich zu den Versuchen 1 und 2 am Größten. Der Unterschied kann durch den dickeren Querschnitt der Wand erklärt werden woraus ein größerer Temperaturunterschied zwischen den Schalen sowie eine größere horizontale Durchbiegung der Wand und eine stärkere Verdrehung der Wand am Wandfuß resultiert.

Die thermische und konstruktiv schützende Funktion der Vorsatzschale samt Kernschicht wurde in jedem Versuch bestätigt. Auch im Versuch 2 wurden die Vorsatzschale und die Dämmung, trotz der gravierenden Beschädigung der Verbindungsmittel, freihängend gehalten. Die integrale Sandwichtragwirkung der Wände wurde in den Versuchen 1 und 3 mit dem Verformungsverhalten bestätigt. In beiden Fällen entsprach die Verformung der unbeflammten Vorsatzschale der Biegelinie der Tragschalen. Dass sie sich annähernd wie die beflammete Tragschalen verformten hat bestätigt, dass die GFK-Verbindungsmittel nicht herausgezogen wurden.



Abbildung 27: Biegeriss in der Vorsatz- (links) und Tragschale (rechts) beim Versuch 3

Zusätzlich wurden bei den Versuchen 1 und 3 gleichmäßig verteilte Biegerisse (alle 50 cm) in den rausstehenden Vorsatzschalen beobachtet (siehe Abbildung 27). Demnach haben die Verbindungsmittel und das Dämmmaterial über die gesamte Versuchsdauer eine ausreichende Verbindung der beiden Schalen gewährleistet. Die beschriebenen Beobachtungen bestätigten, dass die unbeflammte Vorsatzschale und die Kernschicht in Bezug auf die Biegesteifigkeit der Tragschale an der Übertragung von Biegebelastungen beteiligt waren. Dabei hat die Zwangsbiegeverformung der unbeflammten Vorsatzschale der Biegeverformung der Tragschale infolge Brandbeanspruchung entgegengewirkt. Die konstruktiv aktive Vorsatzschale hat also die gesamte Biegeverformung reduziert. Die Sandwichwände besaßen daher einen gewissen Grad an Sandwichtragwirkung während der Brandbeanspruchung und der Stoßbelastung. Der exakte quantitative Wert dieses Traganteils wurde jedoch nicht erfasst. Da die Größe der Sandwichtragwirkung in erster Linie von der Schubtragverhalten der Kernschicht abhängt, müsste dieses Verhalten genauer analysiert werden, um die Größe der Sandwichtragwirkung abschätzen zu können.

## 6.10. Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen hatte erstens die Tauglichkeitsüberprüfung von Sandwichwänden als Brandwände zum Ziel, zweitens die Untersuchung des Brandverhaltens der Wandkomponenten (insbesondere GFK-Verbindungsmitter) und der daraus resultierenden Sandwichtragwirkung. Drei Großbauteile und deren Komponenten wurden unter vertikaler exzentrischer Auflast, Brandexposition und anschließender Stoßbelastung untersucht. Das thermische und mechanische Verhalten der Wände wurde während und nach den Versuchen gemäß den Klassifizierungskriterien aus DIN EN 13501-2 [4] für tragende Brandwände untersucht. Zusätzlich wurde das Verhalten der Kernschicht aus Mineralwolle-Wärmedämmstoff und GFK-Verbindungsmittern kritisch bewertet. Die REI Kriterien für Brandwände wurden über 120 Minuten erhalten und die Wände haben die mechanische Stoßbelastung (M) überstanden.

Die GFK-Verbindungsmitter im mittleren Bereich der Wand wurden in Versuchen 1 und 3 stark thermisch beschädigt, blieben jedoch fest und konnten immer noch die Betonschalen mechanisch koppeln. Im Versuch 2 wurden die Verbindungsmitter über die gesamte Einbindelänge auf der beflamten Seite geschmolzen. Trotzdem, hat die Wand ihre strukturelle Integration durch die noch tragenden Verbindungsmitter der äußeren Reihen beibehalten. Da das Versagen aller Verbindungsmitter im Brandfall nicht ausgeschlossen werden kann, wäre eine empfohlene Lösung der Einsatz von feuerbeständigen Verbindungsmittern die im Brandfall die tragende Funktion übernehmen können. Mit solchen Vorkehrungen kann ein Abfall der Vorsatzschale verhindert werden.

Der potentielle Einfluss der Verbindungsmitter auf thermisch-bedingte Betonabplatzung wurde analysiert. In Versuch 2 wurde ein die Abplatzungen verhindernder Effekt beobachtet. Der Beton auf der beflamten Seite ist in der nächsten Umgebung der durch geschmolzenen Verbindungsmitter erzeugten Hohlräume weniger abgeplatzt. Dies kann durch einen geringeren Porendruck erklärt werden, da die Feuchte durch die Hohlräume aus dem Beton entweichen konnte. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die raumabschließende Funktion einer Brandwand, ist es wichtig, dass die Hohlräume nicht zur Feuerausbreitung beigetragen haben.

Zunächst kann festgestellt werden, dass der Präsenz von GFK-Verbindungsmittern nicht zu Betonabplatzungen beigetragen hat, sondern einen mildernden Effekt auf die Betonabplatzungen im Brandfall aufweisen. Die Wände wurden nicht durch die geschmolzenen Verbindungsmitter perforiert, da sie in der unbeflammten Schalen bei allen Versuchen intakt blieben. Die raumabschließende Funktion der Wände wurde erfüllt und es wurde kein Beitrag zur Feuerausbreitung oder Rauchgasentwicklung festgestellt.

Eine andere wichtige Erkenntnis wurde bezüglich des Wärmetransports in Sandwichwänden im Brandfall gemacht. Die in der Wand gebundene Feuchte wurde durch die Brandbelastung verdampft und wirkte als das Wärmeübertragungsmedium durch die Dämmschicht hindurch fast über die gesamte Versuchsdauer. Dies resultiert in einem raschen Aufheizen der gesamten Kernschicht und der inneren Seite der unbeflammten Betonschale bis zu 100°C, mit fast gleicher Geschwindigkeit bei allen Versuchen, unabhängig von der Dämmschichtdicke. Diese Erhöhung der Temperatur in der relativ kurzen Zeit der Brandbeanspruchung sollte im Entwurf berücksichtigt werden, vor allem, wenn temperaturempfindliche oder entflammbare Dämmmaterialien in Einsatz kommen. Der mechanische Beitrag der Dämmung kann dadurch kurz nach dem Feuerausbruch aus der Biegesteifigkeit der Wand eliminiert werden. Das Aufheizen

der Dämmung mit Wasserdampf kann nur mit Erhöhung der Dicke der beflamten Schale verlangsamt werden. Zusätzlich aber um die potenzielle Feuerausbreitung durch die Kernschicht zu verhindern, ist der Einbau von Streifen aus nichtbrennbaren Dämmmaterialien entlang des Rands der Wand zu empfehlen.

Die gemessenen Verformungen der frei hängenden Vorsatzschale haben gezeigt, dass die beiden Schalen die gleiche Krümmung unter Temperaturbeanspruchung widerfahren haben. Dies bestätigt, dass die GFK-Verbindungsmittel die ausreichenden mechanischen Eigenschaften beibehalten konnten und den konstanten Abstand beider Betonschalen über die gesamte Versuchsdauer gehalten haben. Die temperaturabhängige Schubsteifigkeit der Verbindungsmittel, während und nach dem Brandversuch wurde nicht ermittelt. Im Weiteren, wurden keine Zeichen für einen potenziell gefährlichen Abfall der Vorsatzschale im Versuch 2, während und nach der Brandexposition beobachtet. Die Biegeverformungen der Wände, infolge Temperaturbeanspruchung und Auflast verursachten eine Rissbildung in der unbeflammten Schalen in Versuchen 1 und 3.

Das Einhalten eines gewissen Grads der mechanischen Kopplung der beiden Betonschalen durch die Kernschicht wurde in allen Versuchen festgestellt. Dies wurde auch in Versuch 2 festgestellt, wo die Verbindungsmittel der inneren Reihen geschmolzen waren. Die Vorsatzschale blieb trotzdem mechanisch an die Tragschale gekoppelt. Dies deutet auf einen bedeutenden und dauerhaften Beitrag der Kern- und Vorsatzschicht zur Biegesteifigkeit (und dadurch zur Stabilisierung der Wand) hin. Die gemessene Relativverschiebung in Versuch 1 und 3 bestätigt, dass ein gewisser Grad des Sandwicheffekts über die gesamte Brandbeanspruchungszeit und während der Stoßbelastung beibehalten wurde. Da der potenziell große Zugewinn unter Berücksichtigung dieses Effekts auf den Feuerwiderstand der Sandwichwände zu erwarten ist, sind weiteren Untersuchungen zu den Kernschichteigenschaften in Abhängigkeit erhöhter Temperaturen von großer praktischer Bedeutung.

Mit den gesammelten Ergebnissen kann zusammengefasst werden, dass die geprüften Sandwichwände prinzipiell als Brandwände eingesetzt werden könnten. Mit der Anwendung von speziellen Vorkehrungen wie Verkapslung der schwerentflammbaren und eventuell brennbaren Dämmstoffe und Verbindungsmittel in nichtbrennbaren Baustoffen in der Kernschicht, wäre deren Anwendung in Brandwänden denkbar. Im Fall von EPS-Dämmstoff könnte z.B. ein Streifen Mineralwolle auf dem Umfang der Wand verwendet werden. Besondere Vorkehrungen müssen bei der Ausführung von Öffnungen angewendet werden. Das sollte bereits bei der Planung von Außenwänden berücksichtigt werden, die beim Anbau potenziell die Funktionen einer Brandwand annehmen sollen. Die Stoßfugen der Wandtafeln müssen mit besonderer Abdichtung versehen werden, z.B. Ausstopfung mit Mineralwolle. Der Abfall der Vorsatzschale kann relativ einfach durch Einsatz einer Mindestbewehrung und feuerbeständiger Verbindungsmittel zur Übertragung des Eigengewichts der Vorsatzschale in der Brandsituation verhindert werden. Die Berücksichtigung der Sandwichtragwirkung kann einen bedeutenden Beitrag zur Stabilisierung einer Wand und deren Widerstand gegen Anprallbelastung liefern. Die in verschiedenen Literaturquellen genannten thermischen der geprüften Sandwichwände und die stabilisierende Wirkung von Vorsatzschale und Kernschicht auf die Tragschale konnten bestätigt werden. Dies spiegelt sich in den gemessenen Temperaturen und Verformungen wider.

## 7. Kleinbrandversuche an Sandwichwandquerschnitten

Die Großbrandversuche haben die grundlegende Tauglichkeit einer Sandwichwand als Brandwand bestätigt. Um quantitative Aussagen zu dem Grad der Sandwichtragwirkung und zu der Mitwirkung der Kernschicht und der Vorsatzschale im Brandfall treffen zu können wurde die in diesem Kapitel beschriebene Versuchsreihe konzipiert. Ziel der Versuche ist die Erforschung des Schubtragverhaltens der Kernschicht von Sandwichwänden im Brandfall. Dazu wurden Schubversuche an Sandwichversuchskörpern aus Stahlbeton durchgeführt. Hierbei werden verschiedene Ausführungen der Kernschicht mit gleichbleibender Dämmstoffdicke von 140 mm unter erhöhten Temperaturen untersucht. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden zwei maßgebende Komponenten der Kernschicht (Dämmmaterial und der Art der Verbindungsmittel) variiert. Die Versuche wurden im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern im Zeitraum von November 2018 bis Februar 2019 durchgeführt.

### 7.1. Einführung

Die aus thermischer Dämmung und Verbindungsmitteln bestehende Kernschicht koppelt mechanisch beide Stahlbetonschichten und ermöglicht eine Übertragung einer Schubkraft zwischen den Deckschichten. Der Grad der Sandwichtragwirkung hat eine große Bedeutung in der Brandsituation. Hohe Sandwichtragwirkung führt zu einer besseren Stabilisierung der Tragschicht und dadurch der ganzen Wand im Brandfall und zum anderen kann dies zu einer potenziell größeren Biegeverformungen infolge Temperaturbeanspruchung führen. Deswegen sind Erkenntnisse zum temperaturbedingten mechanischen Tragverhalten der Kernschicht sehr wichtig zur realitätsnahen Beschreibung des Tragverhaltens einer Sandwichwand im Brand. Der in einer Sandwichwand vorhandene Grad der Sandwichtragwirkung wird durch die zwei Parameter:

- a) Schubsteifigkeit, und
- b) Schubfestigkeit

der Kernschichtkomponenten bestimmt. In den Großversuchen wurde bereits die Mitwirkung der Vorsatzschale und der Kernschicht mit der Tragschale sowie deren mechanischen Beitrag zu der Biegesteifigkeit festgestellt. Die Schubsteifigkeit und die Schubfestigkeit der Kernschicht beeinflussen die Schnittgrößenverteilung und die Biegesteifigkeit sowie die Sicherheit gegen Stabilitätsversagen einer Sandwichwand im Brandfall. Grundsätzlich sind die Schubeigenschaften der Kernschicht stark temperaturabhängig, wie bereits in [51] berichtet. In Kombination mit der temperaturbedingten Steifigkeitsänderung des Dämmmaterials und der Verbindungsmittel werden die mechanischen Eigenschaften dementsprechend reduziert. Die Dauer der Temperaturbeanspruchung und die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs soll primär eine untergeordnete Rolle spielen. Der Grad der Sandwichtragwirkung konnte durch die Großversuche noch nicht qualitativ bewertet werden. Die Kleinversuche sollen daher die oben beschriebenen Steifigkeitsänderungen unter der Temperaturbeanspruchung messbar machen.

### 7.2. Versuchsprogramm

Die Versuche sollen Erkenntnisse über die Schubfestigkeit und die Schubsteifigkeit der auf verschiedene Weise ausgeführten Kernschicht von Sandwichbauteilen im Brandfall generieren. Es werden insgesamt 12 Referenzversuche unter Raumtemperatur und 26 Versuche

unter erhöhter Temperatur durchgeführt. Das Schema zur Bezeichnung der Versuchskörper ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Schlüssel der Versuchsbezeichnung

<b>Dämmstoffmaterial - Verbindungsmitteltyp - Prüftemperatur</b>	
Dämmstoffmaterial	E – expandiertes Polystyrol M - Mineralwolle
Verbindungsmitteltyp	F – Stahl-Flachanker P – GFK-Verbindungsmittel D – keine Verbindungsmittel
Versuchstemperatur	Prüftemperatur, oder R - Referenzversuch

Das Versuchsprogramm der Referenzversuche und der Brandversuche wird in sechs Versuchsgruppen aufgeteilt. Hierbei wird nach Kombination der Verbindungsmitteltypen und des Dämmmaterials unterschieden, siehe Tabelle 9.

Zwei repräsentative Verbindungsmitteltypen werden in diesem Versuchsprogramm untersucht. Beide verwendeten Verbindungsmitteltypen sind schubtragend und werden in Kombinationen mit oder ohne andere Verbindung der Schalen, die die Torsionskräfte oder das Eigengewicht einer Schale übertragen soll, angesetzt. Dabei repräsentieren die zwei Typen die unterschiedlichen Verbindungstechnologien, Flachanker als eine effektive und hochtragende Stahlverbindung und GFK-Verbindungsmittel als innovative und thermisch effiziente Lösung.

Die zwei am meisten verwendeten Dämmmaterialien in Sandwichwänden sind Mineralwolle und expandiertes oder extrudiertes Polystyrol. Diese zwei Dämmstoffgruppen weisen unterschiedliches Brandverhalten und Schubverhalten auf.

Es wurden Versuche nur mit Dämmstoff (Gruppen M-D und E-D) durchgeführt, die es erlauben den Einfluss der Dämmung bei den Versuchen mit Verbindungsmittel und Dämmung (Gruppen M-F, M-P, E-F und E-P) beurteilen zu können. Dazu werden die Versuche mit Dämmmaterial allein bei vergleichbaren Temperaturlaststufen untersucht wie die Versuche an Verbindungsmitteln. Hierbei steht die Erforschung der temperaturbedingten Schädigung der mechanischen Schubeigenschaften der Verbindungsmittel im Vordergrund. Jedoch führen verschiedene Dämmmaterialien, wegen ihres unterschiedlichen Brandverhaltens, zu unterschiedlichen Temperaturbelastungen der Verbindungsmittel. Deswegen ist das Versuchsprogramm so konzipiert, dass das Schubverhalten des jeweiligen Verbindungsmitteltyps in Kombinationen mit zwei verschiedenen Dämmmaterialien untersucht wird.

Tabelle 9: Versuchsprogramm mit schematischem Darstellung des Prüfkörpers jede Gruppe mit markierter Lage des Thermomessfühlers (TE1 und ggf. TE2)

Gruppenbezeichnung	Bezeichnungsschlüssel	Graphische Darstellung
<b>E-D</b>	E-D-R1	
	E-D-R2	
	E-D-60a	
	E-D-60b	
	E-D-78	
	E-D-92	
	E-D-108	
<b>E-F</b>	E-F-R1	
	E-F-R2	
	E-F-84	
	E-F-99	
	E-F-108	
	E-F-153	
<b>E-P</b>	E-P-R1	
	E-P-R2	
	E-P-71	
	E-P-88	
	E-P-95	
	E-P-129	
	E-P-159	
<b>M-D</b>	M-D-R1	
	M-D-R2	
	M-D-R3	
	M-D-156	
	M-D-408	
	M-D	
	M-D	
<b>M-F</b>	M-F-R1	
	M-F-159	
	M-F-424	
	M-F-437	
	M-F-512	
	M-F-602	
<b>M-P</b>	M-P-R1	
	M-P-R2	
	M-P-78	
	M-P-90	
	M-P-159	
	M-P-176	
	M-P-363	

Wie wurde es festgestellt [24; 36; 51], Beitrag der Dämmung zur Schubübertragung zwischen Schalen einer Sandwichwand kann von größerer Bedeutung sein. Die Größe dieses Beitrags wird durch die Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit des Dämmmaterials sowie der Qualität des Verbunds zwischen der Schale und der Dämmung beeinflusst. Zur realitätsnahen Untersuchung des Schubverhaltens der Dämmung unter Berücksichtigung der beschriebenen Parameter, wird Stahlbeton als Material für die Deckschichten ausgewählt. Dabei soll die Heizedauer minimiert werden und gleichzeitig die erforderliche Steifigkeit der Deckschichten gewährleistet werden. Deswegen wird eine Schalendicke von 70 mm angenommen. Die minimale Betondeckschichtdicke einer Sandwichwand [15] beträgt 70 mm. Hieraus resultiert eine Betondeckung, bei mittlerer Lage der Stahlbewehrung von 35 mm.

Um die temperaturabhängigen Schubeigenschaften der Kernschichtausführung untersuchen zu können, wird ein Schubversuch nach dem Erreichen der angestrebten Temperatur durchgeführt. Die Prüftemperatur ist die Temperatur in der Ebene zwischen der Dämmung und der unteren beflamnten Schale. Die Temperatur während des Versuchs wird an dieser Stelle mit einem Thermomessfühler TE1 (und ggf. TE2) gemessen (siehe Abbildung 28).

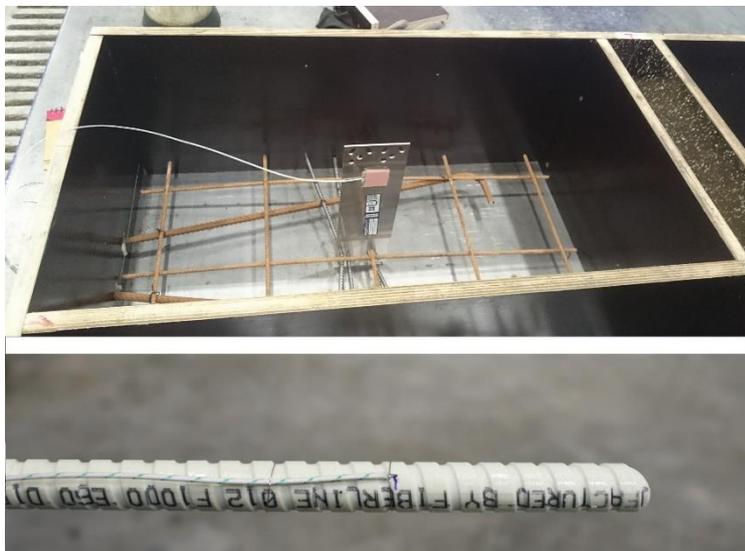


Abbildung 28: Thermoelemente befestigt an den Verbindungsmitteln vor dem Einbetonieren;  
an Flachanker (oben) und an GFK-Verbindungsmittel (unten)

Die Prüftemperaturen werden unter der Berücksichtigung der drei folgenden Grundprinzipien festgelegt:

1. Bestimmung der kritischen Temperatur der jeweiligen untersuchten Kernschichtkomponente. Das Erreichen dieser Temperatur würde zu einem deutlichen Abfall der mechanischen Eigenschaften führen.
2. Bestimmung der temperaturabhängigen Schubeigenschaften der jeweiligen Kernschichtkomponente im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und kritischen Temperatur.
3. Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Versuche von verschiedenen Gruppen durch ähnliche Prüftemperaturen.

### 7.3. Beschreibung der Probekörper

Die Schubversuche werden an den in Tabelle 2 gezeigten Probekörpern durchgeführt. Die Probekörper weisen einen dreischichtigen Aufbau einer Sandwichwand auf. Beide Deckschichten bestehen aus stahlbewehrtem Beton und einer Kernschicht bestehend aus Dämmmaterial mit oder ohne Verbindungsmitteln. Die Kernschicht wurde seitlich um 50 mm ausgespart. Diese Geometrie dient neben der Anpassung an die speziell entwickelte Lasteinleitungskonstruktion, auch zur Minimierung des Randeinflusses auf das Schubverhalten der Kernschicht.

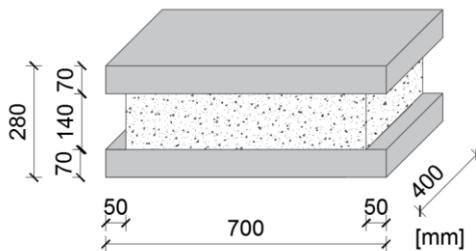


Abbildung 29: Geometrie des Versuchskörpers

Die Abmessungen des Probekörpers orientieren sich an DIN 12090 [52] *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Scherbeanspruchung*. Die Probeabmessungen aus der Norm sind auf eine Dicke von 50 mm des Dämmmaterials begrenzt und haben ein Verhältnis von Breite zu Länge von 1:2. Dieses Verhältnis wurde angestrebt, um zum einen die Abmessungen an die Anforderungen der Norm anzupassen und zum anderen um die Abmessungen des Dämmungsausschnittes dem praxisüblichen Ankerraster anzupassen. Ein schlagartiges Versagen der Dämmung soll nicht zu einem direkten Versagen des Verbindungsmittels führen. Um die beschriebenen Bedingungen zu untersuchen, werden die Abmessungen des Dämmstoffs mit 40 cm x 60 cm angenommen (siehe Abbildung 29). Um den Einfluss eines Biegemoments in dem Bauteil zu minimieren beträgt die Dämmstoffdicke 14 cm und nicht wie bei den Brandversuchen an Sandwichwände 20 cm.

Bei der Auswahl der Versuchskörperabmessungen wurde die Annahme gemacht, dass die Schubkraft, die über die gesamte Fläche des Dämmmaterials übertragen wird, auch allein durch die Verbindungsmittel übertragbar sein soll. Dies entspricht der realitätsnahen Situation einer Sandwichwand, da das Dämmmaterial in der Berechnung nicht berücksichtigt wird. Dies bedeutet, dass ein mechanisches Versagen des Dämmmaterials nicht zu einem Versagen der Verbindungsmittel führen darf. Deswegen basieren die Abmessungen der Versuchskörper auf einem realitätsnahen Ankerraster. Dieses beträgt im Fall des GFK-Verbindungsmittels 30 cm x 40 cm (2 Verbindungsmittel pro Versuchskörper) und im Fall des Flachankers 60 cm x 40 cm (1 Verbindungsmittel pro Versuchskörper).

Alle Prüfkörper weisen die gleichen Abmessungen auf, unterscheiden sich durch die Kombination aus zwei Dämmstoffen und zwei Arten von Verbindungsmitteln. Die Lage, Anzahl, Abmessungen und Einbindetiefe der Verbindungsmittel sind bei allen Versuchskörpern einer definierten Gruppe gleich. Für die Sicherung im Transportzustand weisen die Probekörper der Gruppe M-D je einen GFK-Stab in den Ecken auf. Die Stäbe werden vor Versuchsbeginn durchtrennt, so dass eine Kraftübertragung über die GFK-Stäbe während des Versuchs ausgeschlossen ist.

### 7.3.1. Dämmmaterialien

Es wurden zwei repräsentative, in der Praxis oft verwendete Dämmmaterialien in dem Versuchsprogramm integriert:

- a) Steinwolle-Wärmedämmplatten gemäß DIN EN 13163- Knauf Insulation Betonfertigteil-Dämmplatte TPD-L – 140 mm Platten; (gleiches Material wie bei Großversuchen – Kapitel 6) Zulassung Z-33.4-1571 [44; 53]. Die relevanten Eigenschaften des Herstellers sind der Tabelle 10 zu entnehmen.
- b) Polystyrol-Hartschaum (EPS) nach DIN EN 13163 (Expandiertes Polystyrol) - Joma WDV EPS 035 – 140 mm [54; 55]. Die relevanten Eigenschaften von Hersteller sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 10: Physikalische und chemische Eigenschaften der EPS-Dämmstoff vom Hersteller

Kennwert	Expandiertes Polystyrol	Prüfnorm
JOMA-Wärmedämmprodukte aus EPS-Hartschaum		
Produktname: EPS 035 WDV k/kd		
Verwendungszweck	EPS-Fassadendämmplatte	DIN 4108-10
Lieferdicke	140 mm	-
Wärmeleitfähigkeit	0,034 W/mK (Nennwert) 0,035 W/mK (Bemessungswert)	EN 13163: 2012 +A1:2015, DIN 4108-4
Wärmedurchlasswiderstand - für 140 mm EPS-Platten	4,10 m <sup>2</sup> K/W	EN 13163: 2012 +A1:2015
Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	≤ 2 %	DIN EN 1603
Druckfestigkeit – Druckspannung bei 10% Stauchung	Keine Leistung festgelegt	DIN EN 826
Biegefestigkeit	≥ 100 kPa	DIN EN 12089
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	≥ 100 kPa	DIN EN 1607
Wasserdurchlässigkeit	≤ 0,2 kg/m <sup>2</sup>	DIN EN 12086
Wasserdampfdurchlässigkeit	≤ 70 kPa	
Scherfestigkeit	≥ 50 kPa	DIN EN 12090
Schermodul	≥ 1000 kPa	
Brandverhalten	B1 (schwerentflammbar); als nicht brennend abtropfend/abfallend bewertet	DIN 4102-1:1998-05 DIN 4102-16:1998-05
Erweichungstemperatur	85°C – 100°C	
Zündtemperatur	Ca. 370°C	
Selbstentzündungstemperatur	Ca. 450°C	
Zu vermeidende Bedingungen	Temperaturen > 100°C (Erweichungstemperatur). Bei Temperaturen > 220°C tritt thermische Zersetzung ein.	
Löslichkeit	Unlöslich in Wasser, löslich in verschiedenen organischen Lösungsmitteln und aromatischen Kohlenwasserstoffen	

Tabelle 11: Physikalische und chemische Eigenschaften der Mineralwolle vom Hersteller

Kennwert	Expandiertes Polystyrol	Prüfnorm
Druckfeste Steinwolle-Wärmedämmplatte		
Produktname: Knauf Insulation Dachboden-Dämmplatte TPD-L – 200 mm Platten		
Verwendungszweck	Wärmedämmung Platten, DEO-dm	DIN 4108-10
Lieferdicke	140 mm	-
Wärmeleitfähigkeit	0,035 W/mK (Nennwert) 0,035 W/mK (Bemessungswert)	EN 13163: 2012 +A1:2015, DIN 4108-4
Wärmedurchlasswiderstand - für 140 mm Mineralwolle-Platten	4,00 m <sup>2</sup> K/W	EN 13163: 2012 +A1:2015
Spezifische Wärmekapazität	1030,0 J/kgK	DIN EN 12524
Druckspannung bei 10% Stauchung	≥ 20 kPa	DIN EN 13162
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1	DIN 13162
Brandverhalten	A1	DIN EN 13501-1
Schmelzpunkt	≥ 1000°C	DIN 4102

### 7.3.2. Verbindungsmittel

Bei allen Versuchskörpern hat die Kernschicht eine Dicke von 14 cm, was der freien Länge der Verbindungsmittel zwischen den Betonschalen entspricht.

Für die Verbindungsmittel wurden für diese Versuchsreihe zwei Produkte ausgewählt:

- a) Stahlflachanker – PHILIPP-Flachanker® V4A; Typ FA-2,0-260-80, Blechstärke 2,0 mm; Ankerhöhe 260 mm, Länge 80 mm, Betondeckung zwischen dem Ende des Flachankers und der Betonoberfläche beträgt 10 mm, Zulassung Z-21.8-2013 [56].
- b) GFK –Verbindungsmittel - Schöck Isolink® TA-H-Ø12-30° Durchmesser 12 mm. Länge entspricht der gesamten Versuchskörperdicke, Zulassung Z-21.8-1894 [57].

Eine gute Verankerung der Verbindungsmittel in der Betonschalen ist mit den erforderlichen Verankerungslängen und Randabständen zu den Schalenrändern gewährleistet. Die Verbindungsmittel wurden mit Einhalten der Mindestrandabstände und nach den Empfehlungen der Hersteller in die Betonschalen eingebaut. Die 70 mm dicken Betondeckschichten sind mittig mit Stahlbewehrungsmatten Q188 bewehrt. Die Betonschale, die in den Versuchen als die unbeflammte Schale eingebaut wird, wurde mit zwei Lagen der Stahlmatte bewehrt. In der unbeflammten Schale wurde auch eine Stahlschleife aus Bewehrungsstahl Durchmesser 10 mm eingebaut, die in den Versuchen als Lasteinleitung dient. Die GFK-Verbindungsmittel sind in beiden Schalen mit einer Einbindetiefe von 70 mm eingebaut. Die Flachanker sind in beiden Schalen mit einer Einbindetiefe von 60 mm eingebaut.

Der Flachanker (Produkt der PHILIPP GmbH) besteht aus einem rostfreien Edelstahlblech (siehe Abbildung 28). Das Edelstahlblech hat die Abmessungen: Länge 80 x Höhe 260 mm sowie eine Blechdicke von 2,0 mm. Die Endbereiche des Ankers besitzen Oval- und Rundlöcher. Die Rundlöcher sind für das Einbringen der Verankerungsbewehrung vorgesehen, während die Ovallöcher einen sicheren Verbund mit dem Beton herstellen [58]. Sie sind mit erforderlichen Bewehrungsstäben  $d = 6 \text{ mm}$   $L = 400 \text{ mm}$  nach den Vorgaben des Herstellers in zentraler Position verankert. Pro Anker und Betonschale werden jeweils 4 Bewehrungsstäbe eingebaut. Die relevanten Eigenschaften vom Hersteller sind der Tabelle 12 zu entnehmen. Das Brandverhalten der Flachanker entspricht dem Brandverhalten von Stahl (nichtbrennbar).

Der Traganker FA ist Teil des PHILIPP Sandwichplattenankersystems (nach Angaben aus [58]). Er dient als Traganker und sorgt für die sichere Lasteinleitung des Vorsatzschichtengewichts in die Tragschicht. Die Verwendung kann entweder paarweise bei symmetrischem Einbau in Bauteile als reiner Traganker oder auch als Torsionsanker in Kombination mit dem Traganker MA erfolgen.

Tabelle 12: Physikalische und chemische Eigenschaften der verwendeten Stahl-Flachanker

Kennwert	Edelstahl
Produktname: Stahl Flachanker	
Brandverhalten	A (nach DIN 4102-1:1998-05)
Material	Rostfreier Edelstahl
Festigkeitsreduktion bei ca. 500°C	50 %
Festigkeitsreduktion bei ca. 700°C	2/3
Dichte	ca. 7,85 kg/dm <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit	15 W/mK
Wärmeausdehnungskoeffizient	ca. 0,01 mm/mK

Als GFK-Verbindungsmitel kommen die stabförmigen Schöck Isolink® TA-H der Firma Schöck Bauteile GmbH [45] zum Einsatz. Der Anker besteht aus einem glasfaserverstärkten Kunststoffstab. Der Anker besitzt eine Profilierung in Form eines Trapezgewindes mit 0,6 bis 0,75 mm Profiltiefe und 8 mm Ganghöhe (siehe Abbildung 28). Die Enden des Ankers TA-H sind schräg. Die Wirkungsweise des Ankers beruht auf Ausnutzung des Verbundes zwischen Kunststoffstab und Beton. Der Anker wird zur Herstellung von dreischichtigen Stahlbetonwandtafeln verwendet und dient zur Anbindung der Vorsatzschale an die Tragschicht. Ihre gesamte Länge ist gleich der gesamten Höhe der Versuchskörper, sodass die Einbindetiefe in beide Betonschalen gleich ist (70 mm). Die relevanten Eigenschaften vom Hersteller [59; 60] sind der Tabelle 13 zu entnehmen. Brandverhalten von angewendeten GFK-Verbindungsmitel lassen sich nicht eindeutig klassifizieren, was bereits genauer in Kapitel 6.1 beschrieben wurde.

Tabelle 13: Physikalische und chemische Eigenschaften der verwendeten GFK-Verbindungsmitel

Kennwert	Expandiertes Polystyrol
Produktname: GFK -Verbindungsmiteln - Schöck Isolink® TA-H-Ø12-30°	
Brandverhalten	A2 (nach DIN EN 13501-1)
Nennquerschnitt	113 mm <sup>2</sup>
Nenn Durchmesser	12 mm
Matrixwerkstoff	Vinylester-urethanharz (VEU)
Faserwerkstoff	ECR-Glass
Oberfläche	gerippt (Schutzlack aus VE-Harz)
Dichte	2,2 kg/dm <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul	60000 N/mm <sup>2</sup>
Thermische Wärmeleitfähigkeit (axial)	< 0,7 W/mK
Charakteristische Zugfestigkeit	≥ 1000 N/mm <sup>2</sup>
Kritische Temperatur	400° C
Schmelzpunkt der Fasern	600° C

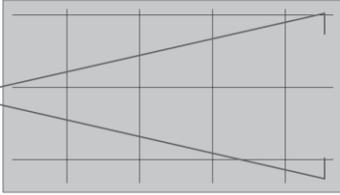
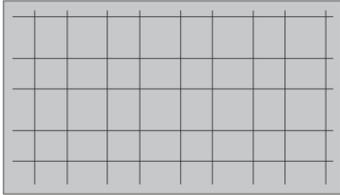
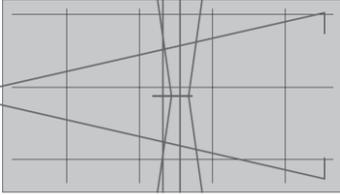
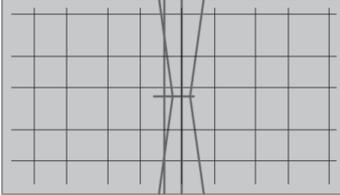
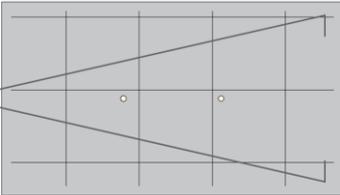
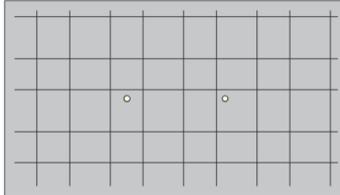
### 7.3.3. Betondeckschichten

Die Betondeckschichten sind in Stahlbetonbauweise hergestellt. Beide Schalen weisen gleiche Abmessungen auf. Die minimale Schalendicke von 70 mm zeigt mehrere Vorteile. Die angestrebte Prüftemperatur wird schneller erreicht, was den Gasverbrauch im Brandversuch deutlich reduziert. Zudem trocknet die dünne Betonschale schneller, wodurch Betonabplatzung während der Beflammung verhindert werden.

Die Stahlbewehrung ist so konzipiert, dass die erforderliche Steifigkeit der Betonschale und einer realitätsnahen Verankerung der Verbindungsmitel gewährleistet werden kann. Die Bewehrung der Betonschalen ist in Tabelle 14 dargestellt. Die horizontale Lage der Stahlmatten kann hierbei geringfügig (max. um 4 cm) abweichen.

Die obere Betonschale ist mit einer Betonstahlmatte Q188A bewehrt. Zusätzlich ist zur Lasteinleitung in der oberen Schale ein Stabstahl mit einem Durchmesser von 10 mm eingebaut. Die Bewehrung der unteren Betonschale besteht aus zwei versetzten Betonstahlmatten Q188A. Hierdurch ist die beflamte Schale zusätzlich ausgesteift. Die Versuchskörper mit Flachanker werden zusätzlich mit vier Verankerungsstäben Durchmesser 6 mm pro Schale bewehrt.

Tabelle 14: Schematische Darstellung der Bewehrung von Betonschalen

Gruppenbezeichnung	Obere Betonschale	Untere Betonschale
<b>E-D und M-D</b>		
<b>E-F und M-F</b>		
<b>E-P und M-P</b>		

#### 7.3.4. Herstellungsprozess

Für die Herstellung (siehe Abbildung 30) der Prüfkörper wurde zuerst die Dämmung auf eine Länge von 600 mm und Breite von 400 mm zugeschnitten. Die Dämmung wurde für den Einbau der Verbindungsmittel vorbereitet. Die Dämmung der Prüfkörper mit GFK-Verbindungsmitteln wurde passend eingebohrt, damit die Verbindungsmittel bei der Herstellung eingesteckt werden konnten. Die Dämmung der Prüfkörper mit Flachanker wurde in Längsrichtung halbiert. Diese Vorgehensweise entspricht der üblichen Ausführung einer Sandwichwand mit diesen Verbindungsmitteln. Ein möglicher Einfluss der Trennung des Dämmstoffs in Längsrichtung auf das Schubverhalten wurde als gering eingeschätzt. Die Aussparungen in den Prüfkörpern wurden während der Betonage mit den speziell vorbereiteten Füllern aus Dämmmaterial gefüllt. Nach der Konditionierung der Prüfkörper, vor dem Versuch wurden diese Füllelemente entfernt.

Das Einölen der Schalung vor der Betonage führt zu einem Verschließen der Luftporen des Betons. Während des Brandversuchs kann der Wasserdampfdruck dieser verschlossenen Poren zu Abplatzungen der Betonoberfläche führen. Um dies zu vermeiden, wurde der Probekörper so hergestellt, dass die zu beflamende Seite offen, ohne Schalung, hergestellt wurde.

1. Zuerst wurden der Lasteinleitungshaken und die Stahlmatte der unteren Schale in die Schalung eingelegt und mit Abstandshaltern lagegesichert. Für den Prüfkörper mit Flachanker wurde die zusätzliche Bewehrung mit der Stahlmatte verbunden. Anschließend wurden die Flachanker ausgerichtet. Nach der Fertigstellung der Bewehrungsarbeiten wurde die untere Schale bis zu einer Höhe von 70 mm betoniert und mit einer Rüttelflasche verdichtet.
2. Die Dämmung wurde in den noch frischen Beton eingedrückt, sodass ein Verbund zwischen Dämmung und Beton entstanden ist. Die GFK-Verbindungsmittel, wurden

durch die vorgebohrten Löcher mit rüttelnden Bewegungen eingesteckt, sodass eine gute Verankerung in der unteren Schale entstanden ist. Die seitlichen Aussparungen wurden mit den Füllelementen verstopft.

3. Anschließend wurde die Bewehrung der oberen Schale eingelegt und mit Abstandshaltern positioniert. Die Prüfkörper mit Flachanker wurden hierbei mit der Zusatzbewehrung verbunden. Die obere Schale wird mit Beton verfüllt und mit einer Rüttelflasche verdichtet. Die Prüfkörper waren nach der Betonage unter einer Kunststoffolie mindestens ein Tag gelagert worden, bevor sie ausgeschalt wurden.



Abbildung 30: Herstellung der Versuchskörper; verschiedene Stadien

Alle Versuchskörper wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern in 5 Chargen hergestellt und untersucht. Je Charge werden 6 bis 8 Bauteile betoniert. Der Betonageplan und die Daten der Betondruckfestigkeitsprüfungen (BDF) sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Betonageplan der Versuchsreihe an Kleinbrandversuchskörper

Gruppe	Dämmstoffmaterial	Betonage	Herstelldatum	BDF nach 28 Tagen	BDF nach ~125 Tagen	Versuchsdatum
<b>E-D</b>	E-D-R1	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	11.09.2018
	E-D-R2	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	07.02.2019
	E-D-60a <sup>1)</sup>	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	25.01.2019
	E-D-60	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	05.02.2019
	E-D-78	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	08.01.2019
	E-D-92	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	10.01.2019
	E-D-108	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	18.12.2018
<b>E-F</b>	E-F-R1	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	11.09.2018
	E-F-R2	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	08.02.2019
	E-F-84	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	24.01.2019
	E-F-99	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	16.01.2019
	E-F-108	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	23.01.2019
	E-F-153	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	08.02.2019
<b>E-P</b>	E-P-R1	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	11.09.2018
	E-P-R2	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	07.02.2019
	E-P-71	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	20.12.2018
	E-P-88	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	09.01.2019
	E-P-95	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	04.12.2018
	E-P-129	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	21.01.2019
	E-P-159	B1	11.04.2018	09.05.2018	13.08.2018	19.12.2018
<b>M-D</b>	M-D-R1	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	11.09.2018
	M-D-R2	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	08.02.2019
	M-D-R3	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	12.02.2019
	M-D-156	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	18.01.2019
	M-D-408	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	06.02.2019
	M-D	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	nicht geprüft
	M-D	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	nicht geprüft
<b>M-F</b>	M-F-R1	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	11.09.2018
	M-F-159	B3	17.04.2018	15.05.2018	20.08.2018	27.11.2018
	M-F-424	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	12.02.2019
	M-F-437	B5	23.04.2018	21.05.2018	27.08.2018	05.12.2018
	M-F-512	B2	13.04.2018	11.05.2018	15.08.2018	22.01.2019
	M-F-602	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	17.01.2019
<b>M-P</b>	M-P-R1	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	11.09.2018
	M-P-R2	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	01.02.2019
	M-P-78	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	11.02.2019
	M-P-90	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	29.01.2019
	M-P-159	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	28.01.2019
	M-P-176	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	14.12.2018
	M-P-363	B4	19.04.2018	17.05.2018	21.08.2018	17.12.2018

<sup>1)</sup> Versuch ungültig wegen Ausfalls der Lasteinleitungskonstruktion

Die Betondruckfestigkeit wurde für jede Charge nach 28 Tagen und nach 124-126 Tagen jeweils mittels 3 Würfeln geprüft. Die Betonwürfel wurden in der gleichen Umgebung wie die Prüfkörper gelagert. Die Versuchsergebnisse der Betondruckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 12390-3 sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Ergebnisse der Betondruckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 12390-3

Betonage	Druckfestigkeit nach 28 Tagen		Druckfestigkeit nach ~125 Tagen	
	Mittelwert	Standard Abweichung	Mittelwert	Standard Abweichung
	[N/mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]	
B1	40,05	± 1,06	41,70	± 1,61
B2	48,92	± 0,79	48,96	± 0,86
B3	43,66	± 0,89	44,71	± 1,00
B4	41,83	± 0,76	42,36	± 1,04
B5	46,04	± 0,73	46,52	± 0,42

### 7.3.5. Konditionierung des Probekörpers

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung mehr als 100 Tage gelagert und gegen Niederschlag geschützt. Dies entspricht den Anforderungen von DIN EN 1363-1 [1]. Hierbei ist vorgegeben, dass ein Probekörper solange gelagert werden muss, bis die Festigkeit und der Feuchtegehalt mit dem von üblichen Bauteilen vergleichbar ist. Die Brandversuche wurden in dem Zeitraum zwischen 224 bis 305 Tagen nach deren Herstellung durchgeführt.

### 7.4. Prüfanordnung und –durchführung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Brandversuche unter erhöhter Temperatur und Referenzversuche unter Raumtemperatur durchgeführt (siehe Abbildung 31). Die Schubversuche an Sandwichwandquerschnitten wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN 12090 [52] entworfen, sodass die Schubeigenschaften der verschiedenen Verbindungsmittel, Dämmmaterialien und deren Kombinationen möglichst einfach untersucht werden konnten. Dazu wurde ein Schubversuchsrahmen konzipiert und gebaut. Mit Hilfe dieses Prüfrahmens wurden die Sandwichwandquerschnitte sowohl unter Raumtemperatur als auch unter erhöhten Temperaturen im kleinen Brandofen des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau an der Technischen Universität Kaiserslautern untersucht. Somit unterscheiden sich lediglich die Temperatur des Versuchskörpers und die Temperatureinflüsse auf die Bestandmaterialien beim Brand- bzw. Referenzversuch.

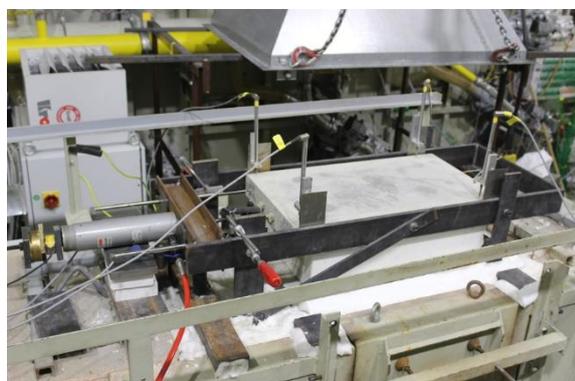


Abbildung 31: Versuchsaufbau von: Brandversuch (links) und Referenzversuch (rechts)

### 7.4.1. Brandversuche

Die Brandversuche wurden in zwei Phasen eingeteilt:

- 1 Phase – Beheizung: Nach dem Aufbau des Probekörpers und dem Anbringen der Messtechnik wurde mit der Beflammung des Brandofens begonnen. Der Versuchskörper blieb in dieser Phase auf Schub unbelastet.
- 2 Phase – Schubversuch mittels der Lasteinleitungskonstruktion

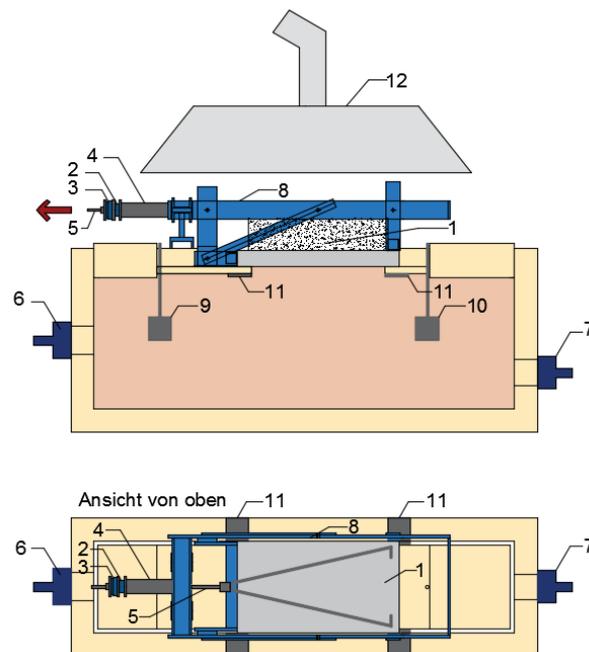


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Versuchskörpers in dem Brandofen;  
1 – Versuchskörper, 2 – Kraftmessdose, 3 – Kalotte, 4 – Hydraulikzylinder, 5 – Lasteinleitungsstab, 6 – Abgasabzug, 7 – Brenner, 8 – Lasteinleitungskonstruktion, 9 – Ofen-Thermoelement B (STE-B), 10 – Ofen-Thermoelement A (STE-A), 11 – Stahlhalterung, 12 - Luftabzug

#### 1. Phase

Der Versuchskörper wurde wie in Abbildung 32 dargestellt in den Brandofen eingebaut. Der Prüfkörper bildete den horizontalen Raumabschluss der Brandkammer. Der Prüfkörper wurde auf zwei Flachstahlprofilen 100 x 20 mm gelagert. Dies ermöglicht eine robuste und verschiebliche Lagerung. Der Prüfkörper und die Lasteinleitungskonstruktion veränderten während der gesamten Versuchsdurchführung ihre Position zueinander nicht. Die horizontale Fuge zwischen der unteren Betonschale und dem Brandofen wurden mit elastischer, nichtbrennbarer Mineralwolle verschlossen, sodass ein direkter Kontakt zwischen der Probekörperdämmung und den Flammen vermieden wurde.

Nach dem Einbau des Prüfkörpers wurde die untere Fläche der unteren Betonschale auf einer Fläche von 600 x 400 mm beflammt. Die Steuerung der Innentemperatur des Brandofens erfolgte mit zwei Thermoelementen STE-A und STE-B. Nach Erreichen der angestrebten Temperatur wurde der Brenner ausgeschaltet und ein programmiertes Kühlprogramm beginnt. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Innentemperatur des Brandofens gesenkt. Gleichzeitig mit dem Ausschalten des Brenners wurde der Schubversuch gestartet.

### Temperaturbelastung:

Ziel der Beheizung des Brandofens war das Erwärmen des Versuchskörpers auf die angestrebte Temperatur, um den Schubversuch unter der angestrebten Temperatur durchführen zu können. Um Betonabplatzungen vermeiden zu können, wurde die Beheizung so langsam wie möglich durchgeführt. Hierdurch kann die Feuchtigkeit der Betonschale entweichen, ohne dabei einen explosiven Druck zu erzeugen. Somit wurde bei allen Versuchen auf eine volle normierte Brandkurve verzichtet. Der Brandofen sowie der Prüfkörper hat eine gewisse thermische Trägheit aufgewiesen, hierdurch war die Temperatur am Start der Schubversuch niedriger als am Ende der Schubversuch. Die Steuerung der Ofentemperatur verfolgte mittels einer freien Temperaturkurve, die in manchen Versuchen modifiziert wurde, um eine möglichst geringe thermische Trägheit zu erzeugen. So sollten Betonabplatzung an der beflamnten Betonschale vermieden werden. Die Beheizung wurde bei jedem Versuch demnächst flexibel angepasst, um ein Kompromiss zwischen Versuchsdauer und minimalisiertem Temperaturunterschied innerhalb eines Schubversuchs zu erzielen.

### 2. Phase

Die Lasteinleitungsstruktur war gegen die untere Betonschale abgestützt, sodass sich ihre Position gegenüber der unteren Betonschale nicht verändern konnte. Die Kraft wurde über einen Prüfzylinder mit einem gelenkigen Anschluss, zentrisch in die obere Schale eingeleitet. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass die Last vollständig auf die obere Schale aufgebracht werden konnte und die tatsächliche relative Verschiebung der Schichten gemessen wurde. Der Zylinder wurde mit einer Handpumpe gesteuert, sodass die Belastung während der Schubversuche weggesteuert durchgeführt wurde. Die Vorschubgeschwindigkeit hat hierbei  $3,0 \pm 0,5$  mm/min betragen. Die Versuche wurden bei einer Verschiebung von 30 mm oder einem offensichtlichen Versagen abgebrochen. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Versuchskörper ein bis drei Tage auskühlen gelassen. Hiernach fand eine optische Prüfung der Probekörper statt, bei welcher das Versagensbild, Beschädigungen der Verbindungsmittel und Brandschäden fotografiert wurden.

#### 7.4.2. Referenzversuche

Im Unterschied zum Versuchsaufbau der Brandversuche wurde bei den Referenzversuchen die Lasteinleitungsstruktur (LEK) nicht auf dem Brandofen, sondern auf einem festen Untergrund aufgebaut.

#### 7.4.3. Messtechnik

Die Schubverformungen des Prüfkörpers wurden während der Schubversuche kontinuierlich aufgenommen. Dazu wurden zwei induktive Wegaufnehmer WA1 und WA2 in dem vorderen Teil des Versuchskörpers angebracht. Diese beiden Wegaufnehmer dienten zur Messung der relativen Verschiebung zwischen der oberen Schale und der Tragschale. Die Verschiebungen der oberen Betonschale wurden mit vier Wegaufnehmern WA3-WA6 in jeder Ecke aufgenommen. Die Lage der Messstellen kann Abbildung 33 entnommen werden. Alle Wegaufnehmer sind starr mit der LEK verbunden. Während der Schubversuche veränderte sich die Position der unteren Betonschale gegenüber der LEK nicht. Die eingeleitete Zugkraft wurde mittels einer 120 kN Kraftmessdose bestimmt.

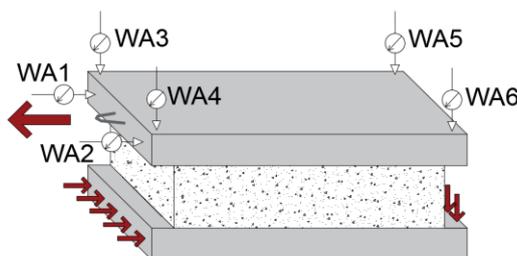


Abbildung 33: Messtechnik zur Aufnahme von Schubverformungen (WA1-2) und vertikaler Verformung (WA3-6). Die Kontaktstelle mit der LEK ist mit Pfeilen angedeutet

Thermomessfühler von Typ K mit einer Genauigkeit von  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  wurden, wie im Kapitel 2 beschrieben, eingebaut. Die Temperatur im Versuchskörper wurde kontinuierlich während beiden Phasen des Brandversuchs aufgenommen. Die Messfrequenz der Verschiebungen betrug 2 Hz und die der Temperaturmessung 1 Hz.

Um einen möglichen Temperatureinfluss auf die Messtechnik auszuschließen, wurden die Temperaturen an den maßgebenden Punkten an Prüfkörper, LEK und Messtechnik, geprüft. Diese Prüfung wurde bei den längsten Versuchen (dem M-D-408) durchgeführt, da hierbei die potenziell höchsten Temperaturen erreicht wurden. Die gemessenen Werte können der Tabelle 17 entnommen werden.

Tabelle 17: Temperaturen von der Messtechnik bei dem langen Versuch M-D-408

Messpunkt	Temperatur
LEK oben	24,5°C
Obere Betonschale	28°C bis 30,5°C
LEK unten hinten	39°C
LEK unten, direkt über der Betonschale	70°C
LEK vorne oben	25°C
Hydraulischer Zylinder	21°C
Kraftmessdose	34°C

Die gemessenen Temperaturen zeigen nur eine Erhöhung, wodurch kein nennenswerter Einfluss auf die Kraft- und Verformungsmessung der Schubversuche resultiert.

Durch die hohe thermische Trägheit der Betonschale, ergibt sich die effektive Prüftemperatur eines bestimmten Versuchs aus dem Mittelwert der zwei maßgebenden Temperaturen. Die Starttemperatur wurde am Anfang und die Endtemperatur nach Beendigung eines Schubversuches (nach 10 min) gemessen. Dabei entspricht die Versuchsdauer von 10 min einer Grenzverschiebung von 30 mm. Der Temperaturanstieg innerhalb der Versuchsdauer eines Schubversuchs ist in den meisten Fällen annähernd konstant. Bei den Versuchskörpern, welche vor dem Erreichen der 30 mm Verschiebung versagen, wurde die Temperatur am Ende des Schubversuchs als Endtemperatur verwendet. Bei Versuchskörper mit GFK-Verbindungs-mitteln wurde die mittlere Temperatur beider Verbindungsmittel jeweils als Start- und Endtemperatur angenommen.

#### 7.4.4. Prüfbeobachtungen

Das Verhalten von Sandwichausschnitten während der Beheizungsphase und des Schubversuchs wurde kritisch, hinsichtlich der üblichen EI Kriterien (Quelle Norm), analysiert. Ein möglicher Beitrag zur Feuerausbreitung und zur Rauchgasentwicklung wurde untersucht. Die untere beflammete Betonschale blieb ganz und dicht in jedem Versuch, außer den Versuchen M-F-512 und M-F-609. In diesen beiden Fällen, war eine lange Beheizungsdauer erforderlich, um die angestrebte Temperatur zu erreichen. Während der Beheizung wurde die Betonschale deutlich geschwächt. Trotzdem brach auch in diesen Fällen die Betonschale erst unter einer höheren Schublast in der zweiten Phase.

Die potenzielle raumabschließende Funktion der unteren Betonschale und des Sandwichquerschnittes wurde kritisch analysiert. Bei den Versuchen mit einer längeren Beheizungsphase (> 60 min) waren meistens drei bis vier thermisch bedingte Risse in dem oberen Teil der beflaminten Betonschale zu beobachten (siehe Abbildung 34 links). Bei den Versuchen mit GFK-Verbindungsmiteln, waren auf der unteren Seite der beflaminten Schale Spuren einer intensiven Verdampfung und Vergasung zu sehen (siehe Abbildung 34 rechts). Dies deutete darauf hin, dass trotz einer beschädigten Verankerung, die GFK-Verbindungsmitel eine nennenswerte Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit beibehielten. Dieses Verhalten konnte auch in früheren Brandversuchen an Sandwichwänden beobachtet werden. Der während eines Brandversuchs entstehende Wasserdampf gelangt über die geschmolzenen GFK-Verbindungsmitel an die Oberfläche, wodurch der innere Druck abgebaut wurde.



Abbildung 34: Risse in der unteren Betonschale, exemplarisch für Versuch M-F-512 (links). Spuren der GFK Verbindungsmitel auf der unteren Seite der beflaminten Schale des Versuchs E-P-129 (rechts)

Es konnte festgestellt werden, dass die raumabschließende Funktion einer sehr dünnen Betonschale von 70 mm in jedem Versuch eingehalten wurde. Bei Versuchen mit höherer Prüftemperatur (> 100°C) war ein intensiver Austritt von Wasserdampf an der oberen Seite und am Dämmstoffrand zu erkennen.

Die thermisch isolierende Funktion der Sandwichwandausschnitten wurde ebenso eingehalten. Die Temperatur auf der oberen Seite der unbeflammten oberen Betonschale erreichte bei den längsten Versuchen (~120 min Beheizung) maximal 32°C. Die Temperatur wurde in diesem Fall mit einem Laserthermometer geprüft.

## Temperaturanstieg

Die Temperatur in dem Ofen wurde so gesteuert, dass die Probekörper ohne eine thermische Beschädigung deren Solltemperatur erreichten. Um einen dynamischen Temperaturanstieg der Brennkammer zu vermeiden und das Risiko einer Betonabplatzung zu vermeiden, wurde der Temperaturanstieg händisch gesteuert. Die Ofeninnentemperatur (besonders bei niedrigen Temperaturen) ist stark von der prozentualen Leistung des Brenners abhängig. Geringe Wärmeleistung führen meist zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung im Ofen. Bei einer längeren Versuchsdauer und einer höheren Brennerleistung, wurden diese Ungleichheiten deutlich ausgeglichen. Mittels langer Konditionierungszeiten der Prüfkörper und einer sensiblen Steuerung der Brennerleistung, konnten bei allen Probekörpern Betonabplatzungen verhindert werden. Unabhängig von den unterschiedlichen Ofeninnentemperaturen stieg die Temperatur in den Prüfkörpern (TE1 und ggf. TE2) gleichmäßig und mit großer Verzögerung im Vergleich zu Ofeninnentemperatur an. Die hohe thermische Masse der beflamnten Betonschale wirkte wie ein Dämpfer, wodurch die Solltemperatur nach einer gewissen Zeit stabil erreicht werden konnte. Die einzige Störung in der Temperatureinstiegslinie ist der Temperaturbereich von  $100 \pm 10^\circ\text{C}$ . In dieser Phase der Erwärmung begann das Wasser der Betonschale des inneren Prüfkörpers zu kochen. Erst nachdem das gesamte Wasser dieser Schale vollständig verdampft war, stieg die Temperatur weiter an. Dieser Effekt wurde jedoch nicht bei allen Versuchen beobachtet, was mit einem ungleichmäßigen Feuchtegehalt der verschiedenen Prüfkörper erklärt werden kann. Der Einfluss des verdampfenden Wassers auf die Temperatur einer Sandwichwand, wurde bereits in der Versuchsreihe an Sandwichwänden untersucht [27].

Die während der Prüfung gemessenen Temperaturen in der Brandkammer und im Prüfkörper, sowie die horizontalen und vertikalen Verformungen der oberen Betonschale, sind in Anhängen B bis G graphisch dargestellt.

## 7.5. Versagensbilder der Verbindungsmittel

### 7.5.1. Flachanker

Alle Versuche der Gruppe Flachanker, versagten durch Beulen des Blechs in der freien Länge. Die Verankerung der Flachanker im Beton wurde hierbei nicht beschädigt. Die Ausrichtung des Beulens erfolgt in unterschiedliche Richtungen. Die verwendeten Flachanker erwiesen sich trotz ihrer kleinen Abmessungen, als eine steife Verbindung für den Versuchsaufbau, sodass in allen Versuchen die untere Betonschale vor dem Versagen des Blechs gerissen ist. Durch das Aufsetzen der Betonschale auf die thermische Belastung wurde die unterste Schicht der beflamnten Betonschale krümelig. Dies resultierte in einer Verringerung der Dicke der beflamnten Schale. Dies wiederum führte zur Verringerung der Biegesteifigkeit der Betonschale in den nachfolgenden Schubversuchen.



Abbildung 35: Charakteristisches Versagensbild eines Flachankers; im EPS Versuch E-F-84 (links) und in der Mineralwolle Versuch M-F-R1 (rechts)

Es werden zwei charakteristische Versagensbilder beobachtet (siehe Abbildung 35). Das erste Versagensbild, das bei allen Versuchen der Gruppe M-F und bei dem Versuch E-F-154 festgestellt wurde, ist durch eine relativ ausgerundete Biegeform des Flachankers gekennzeichnet, wobei dem Blech eine größere Verdrehung widerfährt. Das zweite Versagensbild, das bei allen Versuchen der Gruppe E-F außer E-F-154 festgestellt wurde, zeigte eine relativ eckige Biegeform des Blechs, wobei dem Blech eine geringere Verdrehung widerfährt, da sie durch das steifere Material (EPS) seitlich gehalten war. Im Schubversuch E-F-154 war das EPS fast komplett geschmolzen und konnte daher seine stabilisierende Funktion nicht mehr erfüllen. In den Versuchen mit geringen und höheren Prüftemperaturen konnte kein Unterschied in der Biegeform des Flachankers festgestellt werden.

#### 7.5.2. GFK-Verbindungsmitel

Obwohl die Temperatur keinen eindeutigen Einfluss auf die Kraft-Verschiebungsverläufe der Thermoanker aufgezeigt hat, wurde ein Unterschied der Versagensart der Thermoanker beobachtet. Die GFK-Verbindungsmitel der Referenzversuche versagten meistens durch ein Ausknicken der Fasern an dem gedrückten Rand der Einspannung der GFK-Anker im Beton. Dabei entstanden Längsrisse in den Thermoankern, die über die gesamte Länge der Thermoanker verliefen.

Mit der steigenden Prüftemperatur versagten die GFK-Verbindungsmitel zunehmend im unteren erhitzten Bereich der freien Länge. Das deutet darauf hin, dass die mechanischen Eigenschaften der Verbindungsmitel reduziert wurden. Daher wurden diese anfälliger für das Druckversagen und die Bildung von Längsrissen.

Um die Versagensmechanismen zu analysieren wurden vier Probekörper direkt nach dem Versuch, im verformten Zustand untersucht. Dazu wurde die Mineralwolle auf einer Seite entfernt, sodass die Verbindungsmitel in dem verformten Zustand (wenn die Längsrisse noch geöffnet sind) zu sehen waren (siehe Abbildung 36).



Abbildung 36: Vergleich der Versagensbilder verformter GFK-Verbindungsmitel direkt nach dem Schubversuch

Die GFK-Verbindungsmitel (M-P-R2) mit einer großen freien Länge hatten die Tendenz im Verankerungsbereich zu versagen – durch lokales Stabilitätsversagen oder durch Zugversagen der Fasern, wobei auch jeweils Längsrisse beobachtet wurden. Mit steigender Prüftemperatur steigt die Tendenz, dass sich beim Versagen der GFK-Verbindungsmitel zunehmend mehrere Längsrisse überwiegend im unteren Bereich bildeten. Im Versuch M-P-158 konnte anhand der Biegelinie des Stabes erkannt werden, dass die Stäbe im oberen Bereich der Einspannung im Beton fast keine Verdrehung aufgewiesen haben, im unteren Bereich wies der Stab dagegen eine große Verdrehung zusammen mit zahlreichen Längsrissen auf. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die einseitige Temperaturzunahme zu einer Änderung der Versagensmechanismen führte und dies zu einem schnelleren Versagen der GFK-Verbindungsmitel führte.

Untersuchungen an den verformten Verbindungsmiteln direkt nach Versuchsende waren bei den Versuchen M-P-176 und M-P-363 aufgrund der erhöhten Temperatur nicht möglich. Die Abbildung 37 und Abbildung 38 stellen die Verbindungsmitel nach Versuchsende im abgekühlten Zustand ein Tag nach dem Versuch dar. Bei der Bewertung der Beschädigung der Verbindungsmitel muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur im Prüfkörper nach dem Versuchsende weiter gestiegen ist. Demnächst waren die maximalen erreichten Temperatur im Versuch M-D-178 220°C und im Versuch M-P-363 460°C.



Abbildung 37: Versagensbild der GFK-Verbindungsmitel nach dem Abkühlen des Versuchskörpers (M-P-178). Die Stäbe sind teilweise verkohlt und die Längsrisse konzentrieren sich im unteren Bereich.

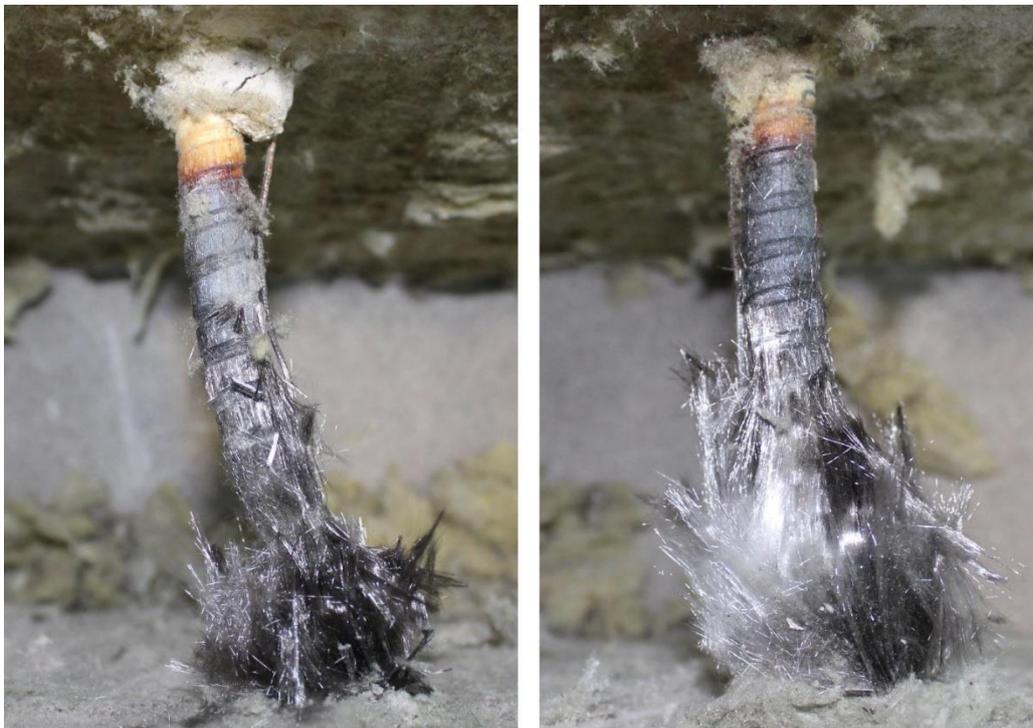


Abbildung 38: Versagensbild der GFK-Verbindungsmitel nach dem Abkühlen des Versuchskörpers (M-P-363). Komplett geschmolzenes Harz und befreite verkohlte Faser im unteren Bereich des Stabes.

### 7.5.3. Mineralwolldämmstoff

Die Mineralwollplatten weisen einen Schichtaufbau auf. Die Versuchskörper dieser Gruppe versagten in allen Versuchen durch die Ausbildung einer horizontalen Versagensfuge in der Mineralwolle. Bei einigen Versuchen versagte die Mineralwolle in der Grenzschicht zur oberen Betonschale. Bei der Betonage wurde die Mineralwolle in den Frischbeton der untere Schale eingedrückt. Der auf diese Weise hergestellte Verbund von mäßiger Qualität konnte die Ursache sein, dass wenn die Versuchskörper auf Verbund versagten, dies in der oberen Grenzschicht der Wärmedämmung stattgefunden hat. Bei anderen Versuchen bildete sich ein horizontaler Riss zwischen den einzelnen Schichten der Mineralwolle aus. Nach den Versuchen unter 400°C Prüftemperatur wurde eine eindeutig thermische Beschädigung der Mineralwolle beobachtet (siehe Abbildung 39). Dabei war ein kühlender Einfluss der Verbindungsmittel zu sehen, da die Mineralwolle dort weniger verbrannt aussah. In der Untersuchung des abgekühlten Versuchskörpers war die Mineralwolle in diesem Bereich weich und krümelig. Obwohl die mechanischen Eigenschaften des verbrannten Dämmstoffs beeinträchtigt wurden, konnte keine Abhängigkeit zwischen einer thermischen Beschädigung und der Lage der Versagensriss festgestellt werden.



Abbildung 39: Thermische Beschädigung des Dämmstoffes nach dem Abkühlen des Versuchskörpers; Längsschnitt durch den Versuchskörper M-F-437 (links) und Versuchskörper E-P-129 (rechts)

### 7.5.4. EPS Dämmung

Die EPS Dämmung versagte in den meisten Versuchen der Gruppe E-D auf Verbundversagen zwischen Dämmstoff und der unteren Betonschale. In den Gruppen E-P und E-F sorgten die Verbindungsmittel dafür, dass auch nach dem Versagen des EPS der lichte Abstand der Betonschalen nicht vergrößert wurde. In den Versuchen dieser Gruppen versagte der EPS-Dämmstoff durch eine Kombination aus Schubrisen und Verbundversagen. Bei Versuchen bei 100°C und mehr, wurde das Schmelzen des unteren Bereichs des EPS nach dem Abkühlen des Probekörpers beobachtet. Das EPS wurde während der Versuchsdurchführung deutlich weicher und duktiler. Das Versagen war in diesen Fällen verzögert, sodass die Dämmung noch lange danach die Schubkraft übertragen konnte. Bei einer Prüftemperatur über 150°C schmolz sie über die Hälfte der Kernschicht. Da die Temperatur des Versuchskörpers nach Versuchsende noch eine gewisse Zeit weiter stieg, war es nicht möglich festzustellen, ob das Schmelzen während des Versuchs oder danach stattgefunden hat. Der gleiche kühlende Effekt wurde analog zur Mineralwolle beobachtet (siehe Abbildung 39), der EPS-Dämmstoff blieb an den Verbindungsmitteln teilweise nicht geschmolzen.

## 7.6. Prüfergebnisse

Die gemessenen Werte der horizontalen und vertikalen Verschiebung der oberen Betonschale relativ zur unteren Betonschale wurden bei bestimmten Prüftemperaturen innerhalb der Versuchsgruppen und zwischen den Versuchsgruppen analysiert.

Die Schubverformung des Prüfkörpers ist als Mittelwert von beiden gemessenen horizontalen Verformungen (Wegaufnehmer WA1 und WA2) angegeben und wird als relative Verschiebung bezeichnet. Die aufgenommene Kraft und relative Verschiebung wurden anschließend zur Erstellung der Kraft-Relativverschiebungsdiagramme verwendet. Die vertikalen Verschiebungen der oberen Betonschale (Wegaufnehmer WA3 – WA6) dienten zur Kontrolle der Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsergebnisse. Bei dem verwendeten Einzelschubversuchsstand war es nicht möglich das Auftreten eines durch eine exzentrische Lasteinleitung in die Probekörper verursachten Biegemoments in der Kernschicht zu vermeiden. Bei allen Versuchen wurde ein Absenken im Bereich der Lasteinleitung und Heben des weiter von der Lasteinleitung entfernten Teils beobachtet. Die maximalen vertikalen Verschiebungen betragen in den meisten Fällen 5-6 mm. Bei Versuchskörpern mit GFK-Verbindungsmitteln wurde der Wert von 1-2 mm nicht überschritten. Bei Versuchskörpern mit Flachankern erreichten die vertikalen Verschiebungen Maximalwerte von 6-8 mm, nach dem Versagen in manchen Fällen von 20 mm. Generell zeigten die gemessenen Werte, dass wenn eine gleichmäßig verteilte Steifigkeit vorhanden war (Gruppen E-D, E-P, M-D, M-P), die obere Schale geringere vertikale Verschiebungen aufgewiesen hat. Wenn die Steifigkeit der Kernschicht mittig konzentriert war (Gruppen E-F und M-F), tendierten die Versuchskörper dazu, größere vertikale Verschiebungen zu erreichen.

### 7.6.1. Tastversuchsreihe und Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Es wurden zwei Versuchsreihen als Referenz unter Raumtemperatur durchgeführt, wobei die erste Reihe (R1) als Tastversuchsreihe diente.

Dazu wurde zunächst ein Prüfkörper aus jeder Gruppe unter Raumtemperatur getestet. Ziel der Tastversuche war die Überprüfung der entwickelten Lasteinleitungskonstruktion (LEK) und ihrer Funktionalität. Weiterhin sollte die Stabilität der LEK während des Versuchs geprüft werden. Die LEK sollte in ihrer Position gegenüber der unteren Betonschale nicht verändert werden. Die Sensibilität der Versuchsergebnisse auf eine mögliche Schiefstellung der LEK sollte untersucht und bewertet werden. Die Funktionsfähigkeit der Krafteinleitungskonstruktion konnte bestätigt werden, wenn die exakte Ausrichtung an dem Prüfkörper gewährleistet war.

In den Tastversuchen (R1) zeigte sich, dass die Vorschubgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Versuchsergebnisse aufgewiesen hat. Die Belastungsgeschwindigkeit der Schubversuche wurde so eingestellt, dass die Probekörper maximal 5 Minuten nach Versuchsbeginn versagten (in der Anlehnung an die Prüfbedingungen für Auszugsversuche an Verbindungsmittel von ETAG-001 [61]). Dabei wurde die Vorschubgeschwindigkeit nicht konstant gehalten. Insbesondere die Versuchskörper mit der EPS Dämmstoff reagierten sehr empfindlich auf die Vorschubgeschwindigkeit. Nach DIN EN 12090 [52] ist auf die bewegliche Haltevorrichtung die Kraft so aufzubringen, dass eine Schubverformung der geprüften Dämmmaterialien mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $3 \pm 0,5$  mm/min erreicht wird. Diese Prüfgeschwindigkeit wurde für alle weiteren Versuche angewendet. Es war zu beobachten, dass geringere Vorschubgeschwindigkeiten bei Versuchsbeginn zu einem Entlastungseffekt der

Versuchskörper mit EPS-Dämmung (E-D-R1, E-F-R1 und E-P-R1) führten. Dieser Effekt wurde nicht bei den Versuchskörpern mit Mineralwolle beobachtet. Dies wird durch den Vergleich der Versuche M-D-R1 und M-D-R2 bestätigt. Die Referenzversuche der ersten Versuchsreihe (R1) unterscheiden sich von den Referenzversuchen der zweiten Reihe (R2) und allen anderen Versuchen in der Vorschubgeschwindigkeit. In Anhängen B bis G sind die Versuchsdauer-Vorschub Diagramme von jedem Versuch zusammengestellt.

#### 7.6.2. Prüfergebnisse der Gruppe E-D

Nachfolgend wird das Schubtragverhalten unter erhöhter Temperatur der Probekörper der einzelnen Gruppen vorgestellt und analysiert. Die Auswertung des Schubtragverhaltens erfolgt anhand von Kraft-Relativverschiebungsdiagrammen sowie anhand von Beobachtungen, die während der Versuchsdurchführung und nach dem Abkühlen gemacht wurden.

Bei allen Schubversuchen der Gruppe E-D versagte der Verbund zwischen EPS-Dämmstoff und Beton, direkt oberhalb der oberen Kante der beflamnten Schale. Der Probekörper E-D-78 versagte als einziger in der Grenzschicht zwischen der oberen Betonschale und dem Wärmedämmstoff. Die Untersuchung der abgekühlten Versuchskörper nach Versuchsende zeigte, dass der Frischbeton nur zu einem geringen Teil in die Poren des EPS eingedrungen war. Dies führte zu sehr glatten Betonflächen somit zu einem schwachen Haftverbund zwischen EPS und Beton. Dabei wies das EPS in dem unteren Bereich keine Beschädigungen auf. Dies kann die deutlich geringere Schubsteifigkeit und das frühe Versagen von E-D-78 erklären. Obwohl alle Prüfkörper im Verbund zwischen Dämmstoff und Beton versagten, konnte ein erhöhter Verbund bei dem Versuch E-D-60 beobachtet werden, wo der untere Bereich des EPS durch die erhöhte Temperatureinwirkung weicher und teilweise geschmolzen war. Dies führte wiederum zu einer Verbesserung des Verbunds. Bei den Versuchen E-D-92 und E-D-108 schmolz der untere Bereich des EPS (nach Versuchsende in abgekühltem Zustand) und das EPS im unteren Bereich wurde weicher. Daher zeigten die Prüfkörper ein duktileres Tragverhalten. Nach Erreichen der Höchstlast versagten diese graduell. Nach dem Überschreiten der Höchstlast wurde eine deutliche Zunahme der Verformung im hinteren Teil des Probekörpers beobachtet. Die Seiten und der vordere Teil des Probekörpers konnte mit einer großen Verformung die Schubbelastung weiterhin übertragen. Das EPS zeigte in diesem Temperaturbereich eine größere Verformbarkeit und ein duktileres Schubverhalten. Die Versuchskörper bis hin zu einer Prüftemperatur von 92°C versagten schlagartig, während die zwei letzten Versuche ein duktileres Schubtragverhalten aufgewiesen haben.

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungslinien aller Brandversuche zusammen mit Referenzversuchen sind in Abbildung 40 dargestellt.

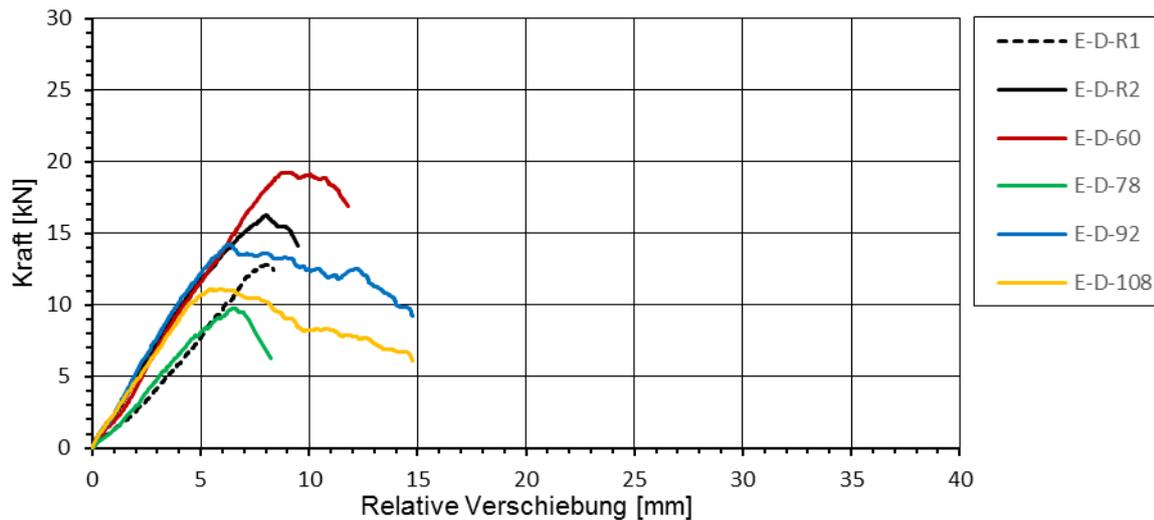


Abbildung 40: Kraft – Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe E-D

Alle Versuche zeigen eine ähnliche Schubsteifigkeit, Ausnahme ist der vorbeschädigte Versuchskörper E-D-78. Beim Versuch E-D-R1 erzeugt die unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeit eine geringere Schubsteifigkeit.

Die Versuchskörper dieser Gruppe versagen unterhalb einer Verschiebung von 30 mm. Da die Versagensmomente in diesem Fall einfach zu identifizieren ist, können die Vergleichsdiagramme der Versagenslasten und Versagensverschiebungen erzeugt werden.

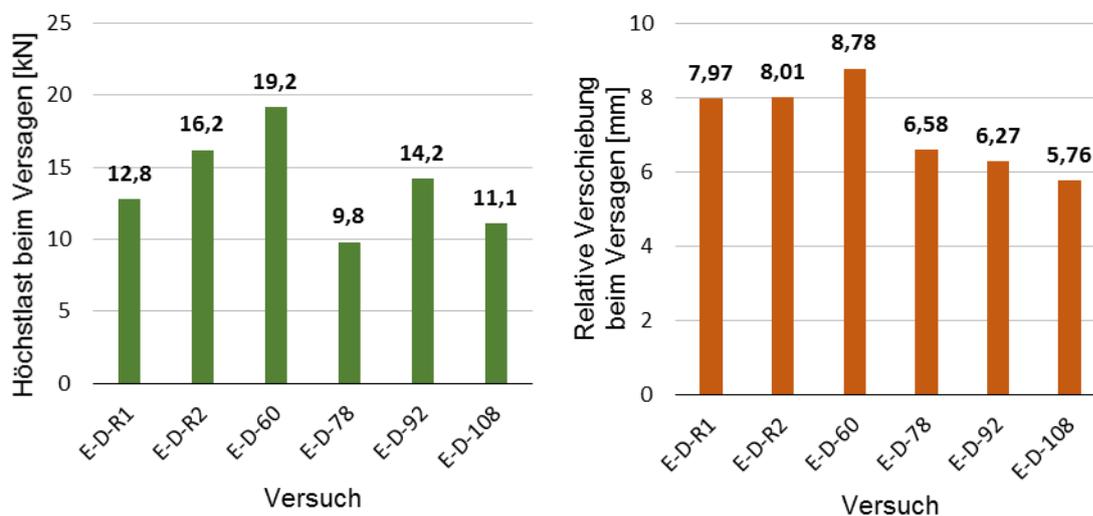


Abbildung 41: Vergleichsdiagrammen der Versagenslasten (links) und Versagensverschiebungen (rechts) der Gruppe E-D

In den Diagrammen ist erkennbar, dass EPS unterhalb einer Temperatur von 60°C eine geringe Erhöhung der Höchstlast zeigt. Unter höheren Temperaturen versagt der Probekörper bei geringeren Lasten und Verformungen. Wenn alle Versuchsbedingungen gleich sind, folgen gleiche Kraft-Verschiebungslinien.

### 7.6.3. Prüfergebnisse der Gruppe E-F

Bei den Versuchskörpern dieser Gruppe, sowie bei den Versuchen der Gruppe M-F, bildete sich während der Schubversuche der Biegeriss auf der beflamten Schale. Die Verankerung

der Flachanker im Beton wurde in keinem Versuch beschädigt, wobei der Biegeriss direkt hinter dem Flachanker in Querrichtung durch die Schale verlief.

Bei allen Versuchen versagte zuerst der Verbund zwischen EPS-Dämmstoff und Beton, direkt oberhalb der oberen Kante der beflamten Schale – gleich wie bei der Gruppe E-D. Ausnahme war hier der Versuch E-F-R2, wo das EPS durch eine Kombination von Verbundversagen und Schubversagen versagte. Bei Referenzversuchen und dem Versuch E-F-84 versagte der EPS-Dämmstoff schlagartig und bei Brandversuchen ab 99°C Prüftemperatur zeigte sich ein duktileres Verhalten und versagte graduell. Bei dem Brandversuch E-F-108 war der EPS-Dämmstoff teilweise im unteren Bereich geschmolzen. Trotz dem teilweise Schmelzen des EPS versagte der Flachanker durch typisches eckiges Beulen (siehe auch Kapitel 7.5.1). Dies zeigt, dass das weichere aber immer noch präsente EPS stabilisierend für die Flachanker wirkt. Nach dem Abkühlen war auf 50% der Fläche das EPS mittig bis zu einer Tiefe von 1 cm geschmolzen. Bei dem Brandversuch E-F-154 EPS Dämmstoff war bereits während des Schubversuchs der EPS-Dämmstoff teilweise geschmolzen. Bei der Untersuchung des abgekühlten Versuchskörpers wurde festgestellt, dass die Biegeform des Flachankers ausgerundet und typisch wie bei den Versuchen mit Mineralwolle (Gruppe M-F) war. Zusätzlich war der EPS-Dämmstoff in der Nähe der Flachanker nicht geschmolzen, was die abkühlende Wirkung der Flachanker bestätigte.

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungslinien aller Brandversuche zusammen mit Referenzversuchen sind in Abbildung 42 dargestellt.

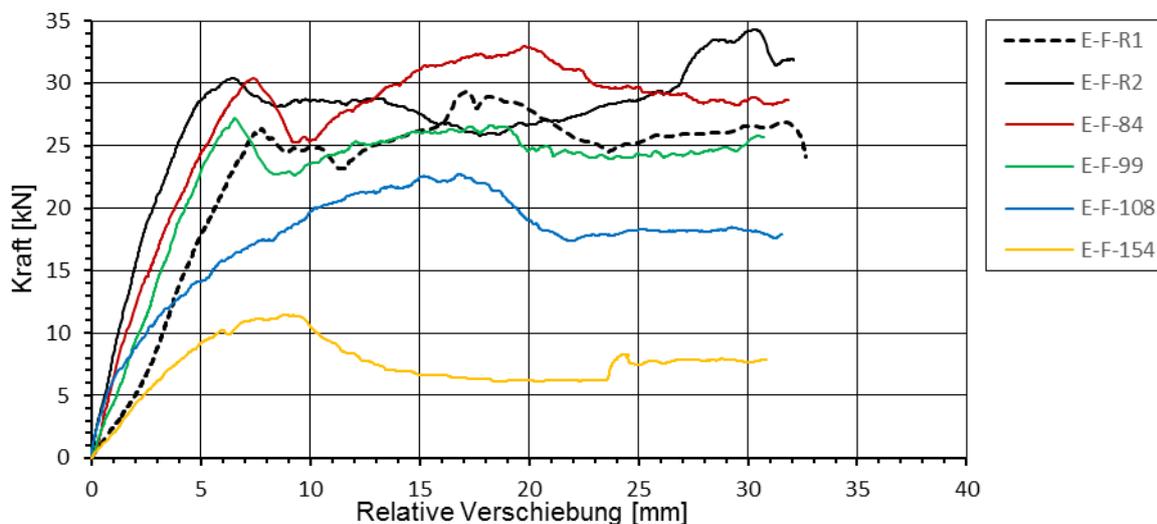


Abbildung 42: Kraft – Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe E-F

Nach dem Versagen des EPS-Dämmstoffs haben die Flachanker die Schubkraft weiter getragen, bis diese endgültig durch Beulen versagten.

Die beschriebenen unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten beim Versuch E-F-R1 resultierte im Versatz der Kraft-Relativverschiebungslinie im Vergleich zu E-F-R2. Daher wird der Versuch E-F-R2 als gültiger Referenzversuch angenommen. Im Prüftemperaturbereich bis zu 154°C sind die Unterschiede im Schubtragverhalten auf den EPS-Dämmstoff zurückzuführen. Die geringfügige Reduktion der Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit in den Versuchen bis zu einer Prüftemperatur ab 99°C wurde mit steigender Temperatur beobachtet. Diese Tendenz stimmt mit den Erkenntnissen der Gruppe E-D überein. Bei höheren Prüftemperaturen (108°C und 154°C), kommt es vermehrt zum Schmelzen des EPS-Dämmstoffs, dies

ähnelt dem Schubverhalten der Gruppe M-F. Bei der Schubsteifigkeit und der Schubfestigkeit der Flachanker wurde mit steigender Temperatur kein eindeutiger Unterschied festgestellt.

#### 7.6.4. Prüfergebnisse der Gruppe E-P

Bei allen Versuchen versagte zuerst der Verbund zwischen dem EPS-Dämmstoff und dem Beton, direkt oberhalb der oberen Kante der beflamten Schale – analog zur Gruppe E-D.

Ausnahme war der Versuch E-P-88, bei dem das EPS durch eine Kombination von Verbundversagen und Schubversagen versagt hat. Beim Versuch E-P-71 zeigte der EPS-Dämmstoff ein schlagartiges Versagen analog zu den Referenzversuchen. Bei höheren Prüftemperaturen (88°C und 95°C) zeigte der EPS-Dämmstoff ein duktileres Tragverhalten. Nach dem Versagen wurde weiterhin eine gewisse Schubkraft über den Dämmstoff übertragen. Bei höheren Prüftemperaturen (129°C und 159°C) war der EPS Dämmstoff teilweise geschmolzen. Wobei die Untersuchung des abgekühlten Versuchskörpers E-P-159 zeigte, dass die EPS-Dämmung fast vollständig geschmolzen war. In diesem Fall stabilisierte der Restdämmstoff die Seiten des Versuchskörpers während des Schubversuchs. Die stabilisierende Wirkung auf die GFK-Verbindungsmitel war in diesem Fall auch ausgeschlossen.

In den Referenzversuchen und im Brandversuch E-P- 71 versagten die GFK-Verbindungsmitel durch Bildung von Längsrissen über die gesamte freie Ankerlänge und einem lokalen Druckversagen der Stäbe direkt an der Einspannung im Beton. Der Stab blieb in der freien Länge intakt und nach der Entlastung schließen sich die Risse wieder. Mit steigender Prüftemperatur ändert sich die Versagensart der GFK-Verbindungsmitel von einzelnen Längsrissen über die gesamte freie Länge zu mehreren Längsrissen im unteren Bereich nahe der beflamten Betonschale. Bereits beim Versuch E-P-88 wurden mehrere Längsrisse beobachtet. Die Anzahl und Dichte von Längsrissen stieg mit zunehmender Prüftemperatur weiter an. Beim Versuch E-P-129 versagten die GFK-Verbindungsmitel aufgrund mehrerer Längsrisse und dem Druckversagen der Stäbe im unteren Bereich, wobei in dem oberen Bereich eine eindeutige Einspannung im Beton festgestellt werden konnte. In keinem der Versuche dieser Gruppe war das Harz der GFK-Stäbe geschmolzen noch lagen die Glasfasern frei. Lediglich beim Versuch E-P-159 ist eine Verkohlung im unteren Bereich festgestellt worden, wie es auf der Abbildung 44 dargestellt ist. In dem unteren Bereich des Stabes haben sich zahlreiche Längsrisse gebildet.

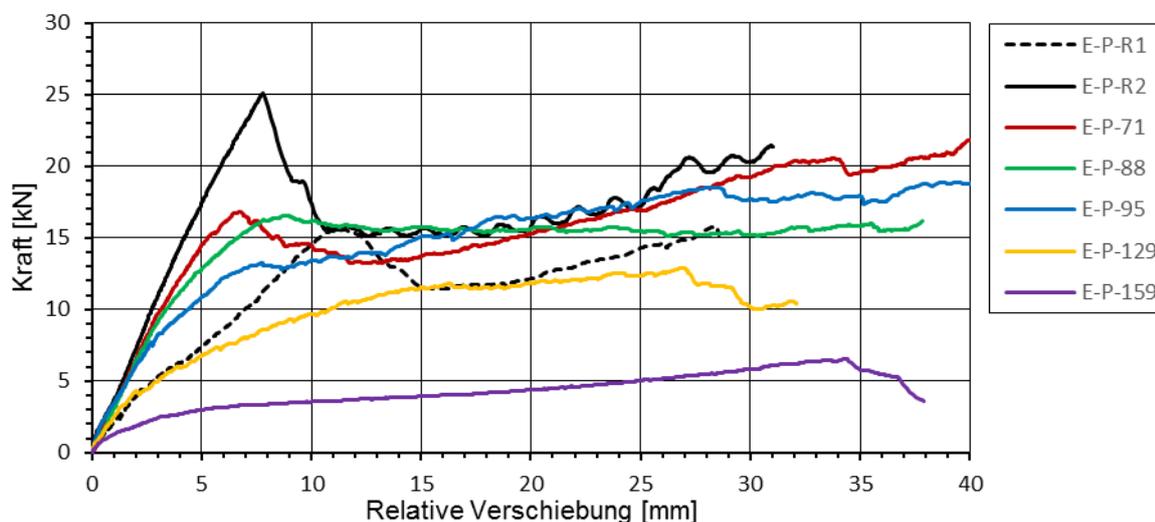


Abbildung 43: Kraft – Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe E-P

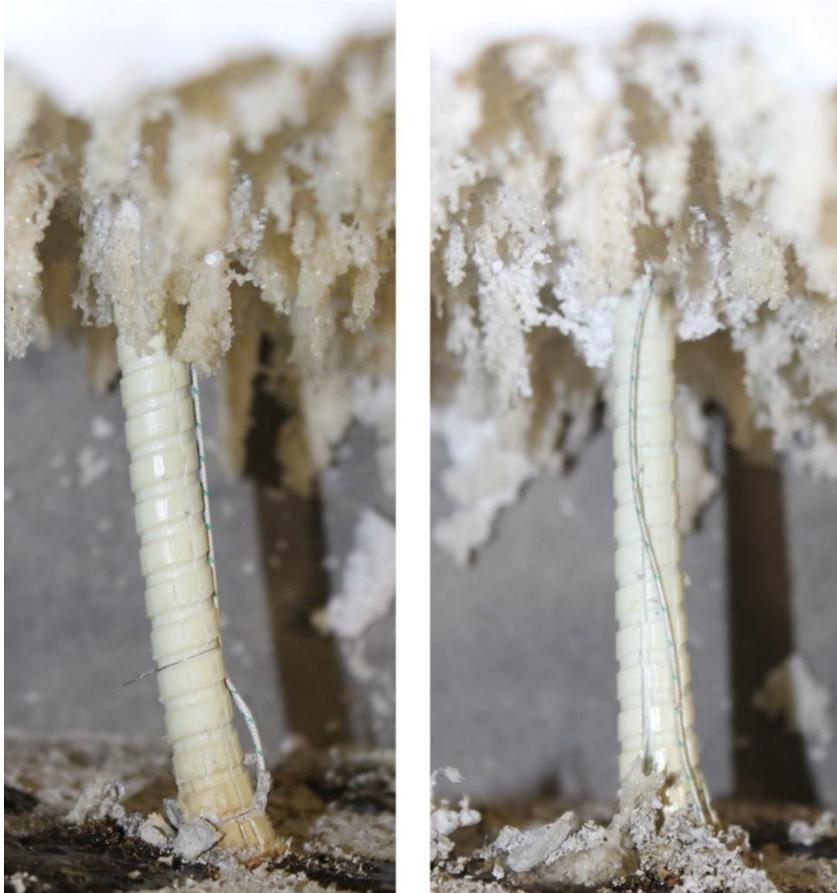


Abbildung 44: Verkohlung im unteren Bereich wegen der thermischen Beanspruchung beim Versuch E-P-159

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungslinien aller Brandversuche sind zusammen mit den Referenzversuchen in Abbildung 43 dargestellt.

Nach dem Versagen des EPS-Dämmstoffs tragen die GFK-Verbindungsmitel die Schubkraft weiter ab, bis diese endgültig versagen. Die beschriebene unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeit des Versuchs E-P-R1 resultierte in einer geringeren Schubsteifigkeit im Vergleich zum Versuch E-P-R2. Daher ist der Versuch E-P-R2 als gültiger Referenzversuch definiert. Im Prüftemperaturbereich bis zu 159°C sind die Unterschiede im Schubverhalten auf den EPS-Dämmstoff zurückzuführen. Die geringfügige Abminderung der Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit der Versuche bis zu einer Prüftemperatur von 95°C ist mit steigender Temperatur zu beobachten. Diese Tendenz stimmt mit den Erkenntnissen der Gruppe E-D überein. Bei höheren Prüftemperaturen (129°C und 159°C), wo es verstärkt zum Schmelzen des EPS-Dämmstoffs gekommen ist, ähnelt das Schubtragverhalten dem der Gruppe M-P. Eine eindeutige temperaturbedingte Beschädigung der GFK-Verbindungsmitel wird erst bei einer Prüftemperatur von 159°C festgestellt. Da in diesem Temperaturbereich der EPS-Dämmstoff den Großteil der Schubkraft überträgt, ist es nicht möglich, eine klare Aussage zur Abminderung der Schubsteifigkeit oder Schubtragfestigkeit der GFK-Verbindungsmitel mit steigender Temperatur zu treffen.

#### 7.6.5. Prüfergebnisse der Gruppe M-D

Allgemein ist die Schubfestigkeit der Mineralwolle sehr gering im Vergleich zu anderen untersuchten Gruppen. Von den sechs hergestellten Prüfkörper, wurden zwei während der

langen Lagerungszeit im Labor beschädigt. In der Gruppe wurden drei Referenzversuche und zwei Brandversuche unter Prüftemperaturen (156°C und 408°C) durchgeführt um den maßgebenden Temperaturbereich abzudecken. Dabei zeigte die Mineralwolle im Versuch M-D-156 keine anschauliche thermische Beschädigung, wobei im Versuch M-D-408 war sie über die praktisch (ohne der obersten 1 cm Schicht auf der oberen Seite) gesamte Höhe der Kernschicht verkohlt.

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungskurven der beiden Brandversuche sind zusammen mit den Referenzversuchen in Abbildung 45 dargestellt.

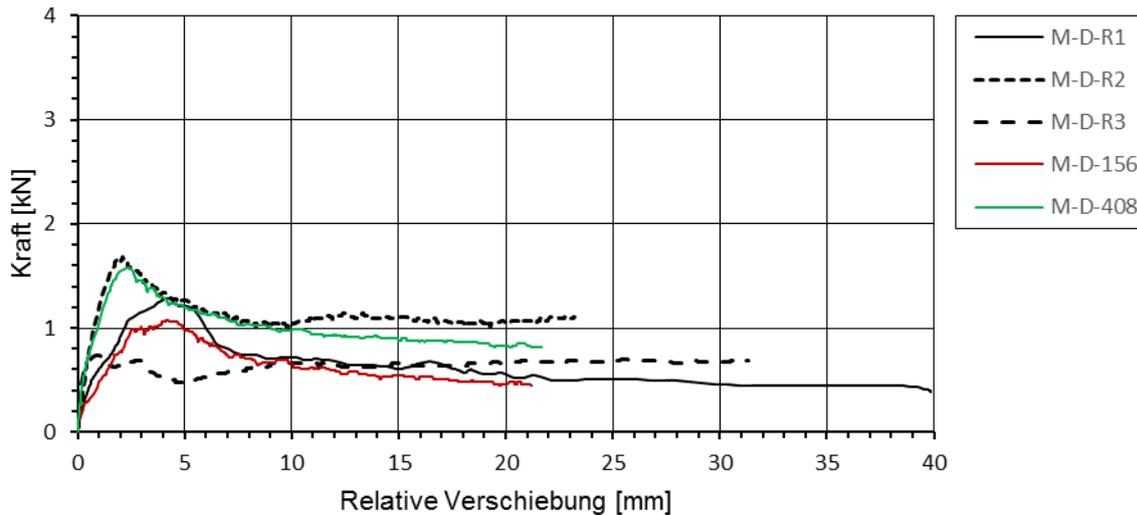


Abbildung 45: Kraft-Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe M-D

Die Prüfkörper M-D-R2, M-D-R3 und M-D-408 versagen schlagartig überwiegend im oberen Bereich der Dämmplatte. Im Versuch M-D-R3 verfolgt die Kraft-Relativverschiebungskurve den gleichen Verlauf, bis der Probekörper frühzeitig versagt. Die Prüfkörper M-D-R1 und M-D-156 versagen graduell in überwiegend unterem Bereich der Dämmplatte. Dabei konnte keine eindeutige Tendenz in dem Versagensbild der Scherrisse beobachtet werden.

Eine mögliche Erklärung der unterschiedlichen Verläufe der Kraft-Relativverschiebungskurven kann auf die unterschiedliche lokale Orientierung der verrollten und gepressten Fasern der Mineralwolle zurückgeführt werden. In jedem Prüfkörper sind die Platten der Mineralwolle in deren Originaldicke eingebaut worden, wobei die Schichten der Mineralwolldämmung näherungsweise parallel horizontal verlaufen. Die lokale Variierung der Faserauslegung konnte zu Schwachstellen im unteren bzw. oberen Bereich der Platte führen, was bei diesem Versuchstand zu unterschiedlichen Verläufen der Kraft-Verschiebung Diagrammen führte. In dem untersuchten Bereich kann kein Einfluss unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten auf das Schubtragverhalten der Mineralwolle festgestellt werden. Die Prüfkörper der Gruppe M-D haben praktisch keine Empfindlichkeit auf erhöhte Temperaturen gezeigt. Die Versuche zeigen zwar zwei unterschiedliche Kraft-Relativverschiebungsverläufe, aber diese charakteristischen Verläufe werden auch bei den Referenzversuchen beobachtet. In Abhängigkeit der Temperatur konnte deshalb keine eindeutige Änderung der Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit festgestellt werden. Außerdem wird festgestellt, dass der Beitrag der Mineralwolle zum Schubtragverhalten im Vergleich zu anderen Komponenten der Kernschicht einer Sandwichwand vernachlässigbar gering ist. Die Mineralwolle kann jedoch, anders als EPS-Dämmung, ihre Form bis zu hohen Temperaturen behalten und dadurch eine Stabilisierung für die Verbindungsmittel im Brandfall leisten.

### 7.6.6. Prüfergebnisse der Gruppe M-F

Bei den Versuchen dieser Gruppe, sowie bei den Versuchen der Gruppe E-F, bildete sich während der Schubversuche ein Biegeriss in der beflamten Schale. Die Verankerung der Flachanker im Beton wurde in keinem Versuch beschädigt, wobei der Biegeriss direkt hinter dem Flachanker in Querrichtung durch die Schale verlief. In den zwei Versuchen M-F-437 und M-F-424 kam es neben der Bildung eines Biegerisses zu einer großen Verwölbung der unteren beflamten Schalen nach oben. Beide Versuchskörper versagten trotzdem endgültig durch Beulen der Flachanker. Der Versuch M-F-424 wurde veranlasst, um das relativ steife Verhalten der Prüfkörper M-F-437 bei vergleichbarer Temperatur zu bestätigen. Beide Prüfkörper zeigen ein relativ ähnliches Kraft-Relativverschiebungsverhalten, wobei der Prüfkörper bei Versuch M-F-424 unmittelbar nach dem Knick der Linie in Abbildung 46 von einem Biegeversagen der Schale in eine Phase höherer Schubsteifigkeit und nachfolgend in einem Beulversagen der Flachanker endet. Alle Versuche mit Prüftemperaturen bis zu 437°C versagten durch Beulen der Flachanker. Dabei wurde eine ausgerundete Biegelinie beobachtet (siehe auch Kapitel 7.5.1). Dies deutet darauf hin, dass die Mineralwolle im Vergleich zu EPS-Dämmung eine geringere Stabilisierung der Verbindungsmittel gewährleistet. In Versuchen M-F-512 und M-F-609 wurde dagegen die untere Betonschale soweit durch die lange Aufheizung beschädigt, dass die Prüfkörper in einem reinen Biegeversagen der Schale ohne Beulen der Flachanker endeten. Die Verankerung der Verbindungsmittel blieb in beiden Schalen durchgehend intakt.

Bei den Versuchen, die durch ein endgültiges Beulen des Flachankers versagten, bildete sich zuerst ein horizontaler Schubriss im unteren Bereich der Mineralwolle. Diese Versagensart wurde in allen Versuchen unabhängig von den unterschiedlichen Temperaturen und dem Grad der thermischen Zerlegung der Mineralwolle beobachtet. Ausschließlich bei den Versuchen M-F-R1 und M-F-159 wurde keine thermisch bedingte Beschädigung der Dämmung sichtbar. Dagegen war bei Versuchen M-F-437 und M-F-424 die Dämmung über fast die gesamte Höhe verkoht (eine obere Schicht von 1 cm anschaulich nicht verkoht). Dadurch, dass die Schubsteifigkeit der Mineralwolle im Vergleich zu der der Flachanker vernachlässigbar ist, ist das Versagensmoment der Dämmung jedoch nicht auf dem Kraft-Relativverschiebungsdiagramm bemerkbar.

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungslinien aller Brandversuche sind zusammen mit dem Referenzversuch in Abbildung 46 dargestellt.

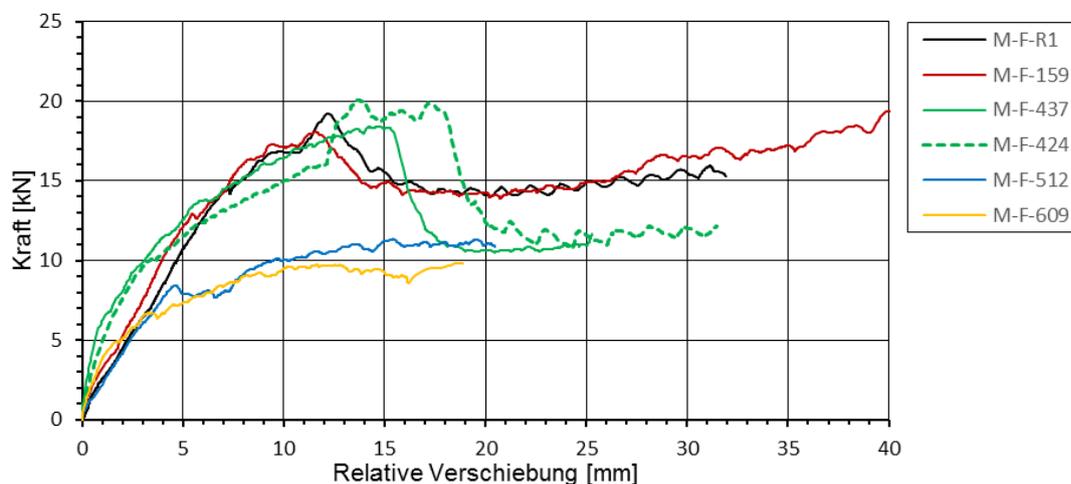


Abbildung 46: Kraft-Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe M-F

Nach dem Versagen des Mineralwoll-Dämmstoffes nehmen die Flachanker die Schubkraft auf, bis ein endgültiges Beulen oder Brechen der unteren Schale auftritt.

Die Ergebnisse der Gruppe M-D haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten im Referenzversuch keine nennenswerten Unterschiede im Schubverhalten der Mineralwolle verursachen. Aufgrund dieser Erkenntnisse und um die Anzahl von Brandversuchen zu maximieren, wurde auf den zusätzlichen Referenzversuch in der Gruppe M-F verzichtet. Daher wurde der Versuch M-F-R1 als maßgebender Referenzversuch angenommen.

Die Prüfkörper der Gruppe M-F zeigten praktisch keinen Einfluss der erhöhten Temperaturen auf die erreichten Schubfestigkeiten. Alle Versuche, die durch Beulen des Flachankers versagt haben, erreichten vergleichbare Versagenslasten. Die zwei Versuche M-F-437 und M-F-424 zeigen zwar ein unterschiedliches Kraft-Relativverschiebungsverhalten im Bereich bis zu 5 mm, aber die endgültige erreichte Last liegt auf dem Niveau der zwei ersten Versuche dieser Gruppe. Die unterschiedlichen Verläufe resultierten aus der relativ größeren Biegung der unteren Schale während der Schubversuchsphase. Die zwei Versuche mit den höchsten Temperaturen M-F-512 und M-F-609 verfolgen zwar die gleiche Kraft-Relativverschiebungskurve wie die des Referenzversuchs, aber bei der Verschiebung unter 5 mm kommt es zu einem Biegeversagen der unteren Schale, sodass die endgültigen Traglasten deutlich geringer ausfielen. Wobei bei den Versuchen M-F-437 und M-F-424 eine oberflächliche Verkohlung des Flachankers nur im unteren Bereich erkennbar war, waren bei den Versuchen M-F-512 und M-F-609 die Zeichen einer thermischen Verkohlung über die gesamte Höhe zu sehen. Bedingt dadurch, dass in diesen Versuchen die Flachanker nicht im Beulen versagten, konnte kein Einfluss der Temperatur auf ihre Schubeigenschaften festgestellt werden.

#### 7.6.7. Prüfergebnisse der Gruppe M-P

Bei allen Versuchen der Gruppe M-P versagte zuerst die Mineralwolle-Dämmung durch Bildung eines horizontalen Schubrisses. Der Schubriss bildete sich in meisten Fällen in der Dämmschicht. Bei den Versuchen (M-P-78, M-P-158, M-P-363) formte sich der Riss im oberen Bereich, wohingegen bei den Versuchen (M-P-R1, M-P-90, M-P-176) sich im unteren Bereich der Dämmschicht bildete. Ausnahme bildet der Versuch M-P-R2, bei dem die Mineralwolle durch eine Kombination von Verbundversagen und Schubversagen im oberen Bereich versagt hat. Dementsprechend konnte keine eindeutige Korrelation zwischen der thermischen Beanspruchung der Mineralwolle und der Schubrisslage ermittelt werden.

In allen Versuchen wurde ein Schubversagen der Verbindungsmittel erreicht. Wie im Kapitel 7.5.2 beschrieben, versagten die GFK-Verbindungsmittel entweder durch Längsrisse und/oder durch ein lokales Druck- und Zugversagen der Fasern in den Einspannbereichen. Wobei hier festgestellt werden konnte, dass sich bei den Versuchen unter erhöhter Temperatur mehrere Längsrisse in den GFK-Verbindungsmitteln, welche sich näher zur beflamnten Schale befanden, bildeten. Anders beim Referenzversuch: Hier bildeten sich in jedem Verbindungsmittel eine oder mehrere Längsrisse gleichmäßig über die gesamte freie Länge.

Dagegen wurden bei dem Versuch M-P-78 vermehrte Längsrisse im unteren Teil der Verbindungsmittel beobachtet (sowie bei jedem weiteren Versuch außer M-P-363), wobei die Oberfläche über die gesamte freie Länge mit einem glänzenden Harz bedeckt war. Dahingegen war im Versuch M-P-90 die Oberfläche der Verbindungsmittel nur in der oberen

Hälfte der freien Länge glänzend bedeckt. Während bei dem Versuch M-P-158 keine thermische Beschädigung der Verbindungsmittel festgestellt wurde, verkohlten bei dem Versuch M-P-176 die untersten 3 cm an der Einspannung in der beflamten Schale, sodass die Fasern in diesem Bereich nicht mehr von dem umgebenden Harz geschützt wurden. Die schwersten Beschädigungen der Verbindungsmittel wurden im Versuch M-P-363 beobachtet. In dem Fall war nur noch in den obersten 2 cm das helle Harz an den Glasfasern zu sehen. Die Verbindungsmittel waren fast über die gesamte Länge des Verbindungsmittels verkohlt und das Harz im unteren Bereich komplett geschmolzen. Die unbeschützten, befreiten Glasfasern behielten aber eine Verbindung (Kontinuität) mit den oberen Teilen der Verbindungsmittel, die immer noch in der unteren Betonschale verankert waren. Diese im Vergleich zu den anderen Versuchen dieser Gruppe ungewöhnliche Beobachtung wurde nicht direkt nach dem Schubversuch, sondern erst einen Tag später an den abgekühlten Versuchskörpern gemacht. Mit diesen Ergebnissen wurde aber festgestellt, dass das Schubverhalten im ganzen testbaren und relevanten Temperaturbereich untersucht wurde. Die Prüftemperaturen über 363°C verursachen ein Schmelzen der Verbindungsmittel teilweise bereits während des Schubversuchs und sie wurden deswegen nicht weiter analysiert.

Im getesteten Temperaturbereich bis zur Prüftemperatur 176°C wurde keine thermische Beschädigung der Mineralwolle festgestellt. Lediglich bei dem Versuch M-P-363 war eine Verkohlung der Mineralwolle im Inneren der Dämmschicht erkennbar.

Die erzeugten Kraft-Relativverschiebungslinien aller Brandversuche sind zusammen mit Referenzversuchen in Abbildung 47 dargestellt.

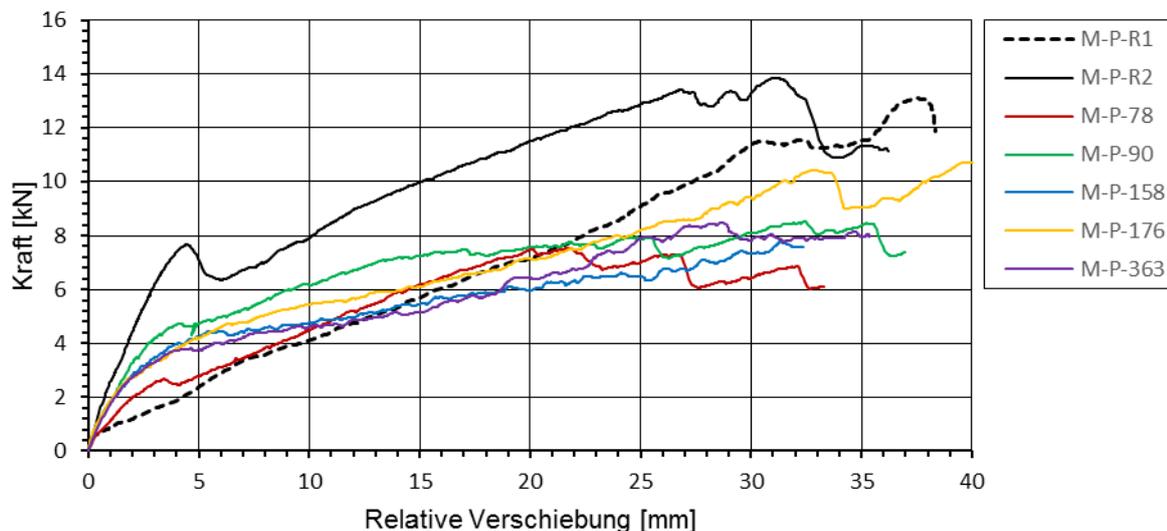


Abbildung 47: Kraft-Relativverschiebung Verhalten der Versuchsgruppe M-P

Aufgrund einer fehlerhaften Ausrichtung der Krafteinleitung in Referenzversuch M-P-R1 hat sich die obere Schale am Anfang des Versuchs verdreht. Dies führte zu einem frühzeitigen Versagen der Dämmung. Durch das ungewollte Verdrehen der Oberschale kam es zu einem Verlust der Schubsteifigkeit der Dämmung in Versuch M-P-R1. Beim zweiten Referenzversuch M-P-R2 erzeugter Schubbeitrag der Dämmung hat einen Versatz der Kraft-Relativverschiebungskurve zu deren von Versuch M-P-R1 und anderen Versuchen dieser Gruppe verursacht. Hier ist es zu erkennen, dass die Schubsteifigkeiten von beiden Versuchen im Bereich nach dem Versagen der Dämmung sehr ähnlich sind.

Schubversagen der Dämmung ist erkennbar am Lastabfall im vorderen Teil der Kraft-Relativverschiebungskurven, bei ca. 4 mm Verschiebung. Das genaue Versagensmoment der Dämmung schwankt für die verschiedenen Versuche. Bei den höheren Prüftemperaturen wird der mechanische Beitrag der Mineralwolle zur Stabilisierung der Verbindungsmittel abgemindert aufgrund der lokal reduzierten Zusammendrückbarkeit der Dämmung. Dieser Einfluss konnte in den Versuchen der Gruppe M-D ohne Verbindungsmittel nicht gemessen werden.

Es lässt sich beobachten, dass mit steigender Prüftemperatur, die Schubsteifigkeit der Versuchskörper nach dem Versagen der Mineralwolle reduziert wird. Dies lässt sich mit Hilfe der Neigung der Kurve erkennen, wobei der Versatz der Kurve auf der vertikalen Achse bei verschiedenen Versuchen unterschiedlich bleibt. Die Unterschiede im Beitrag der Dämmung an der Schubübertragung nach deren Versagen konnte durch unterschiedliche Ausbildung der Schubrisse verursacht werden.

Im Weiteren, kann beim Versuch M-P-78 kein Verlust der Schubsteifigkeit im Vergleich zu den Referenzversuchen festgestellt werden. Beim Versuch M-P-90 ist der Verlust der Schubsteifigkeit minimal in den vorderen Teil des Diagramms, aber die Verbindungsmittel fangen früher an zu versagen. Bei den höheren Prüftemperaturen wird ein deutlicher Abfall der Schubsteifigkeit beobachtet, wobei die erreichte Traglast bei 30 mm vergleichbar ist. Auch im Versuch M-P-363, wo die Prüftemperatur nahe an der kritischen Temperatur ist (vergleiche Tabelle 13), wird keine bedeutende Abminderung der Schubfestigkeit festgestellt.

#### 7.6.8. Analysen und Vergleich verschiedener Gruppen

Die zwei untersuchten Dämmstoffmaterialien zeigen ein unterschiedliches Schubverhalten auf. Außer der unterschiedlichen Größenordnung der Schubsteifigkeiten und Schubfestigkeiten, weisen sie eine unterschiedliche stabilisierende Kraft auf die Verbindungsmittel auf. Dessen Einfluss ist eindeutig an dem Vergleich der Biegeformen der Flachanker zu beobachten. Das Beulen ist bei Versuchen mit Mineralwolle bei einer Relativverschiebung zwischen 11,8 – 15,3 mm und mit EPS-Dämmung zwischen 16,2 – 19,9 mm aufgetreten (Vergrößerung der Versagensverformung im Schnitt um ca. 33%). Höhere Versagenslasten und Relativverschiebungen werden im Fall von Versuchskörpern mit EPS-Dämmung erreicht. Dies kann zum einen der höheren Schubsteifigkeit des EPS und zum anderen der Stabilisierung der Flachanker in der freien Länge durch die EPS-Dämmung zurückgeführt werden. Der Vergleich des Schubtragverhaltens der zwei Gruppen M-F und E-F ist in Abbildung 48 dargestellt. Die Versuche E-F-154 und M-F-512 verfolgen identische Kraft-Relativverformungslinien bis zu einem gewissen Punkt, wo die beflamnte Betonschale von Versuch M-F-512 anfängt zu brechen. Die Kraft steigt im Versuch E-F-154 weiter an bis zum Beulen des Flachankers. Obwohl die Versuchskörper unterschiedliche Versagensarten erzeugen, kann beobachtet werden, dass das Schubtragverhalten der Versuchskörper mit geschmolzenem EPS-Dämmstoff dem der Versuchskörper mit Mineralwolle ähnelt. Diese Erkenntnis ist auch durch das Verhalten des Versuchs E-F-108 bestätigt. Im Fall der Gruppe E-F fängt bei einer Prüftemperatur 108°C die EPS-Dämmung an zu schmelzen, was zu einem deutlichen Absenken der Schubsteifigkeit führt und die Kraft-Relativverschiebungslinie ähnelt denen der Versuche M-F-437 und M-F-424.

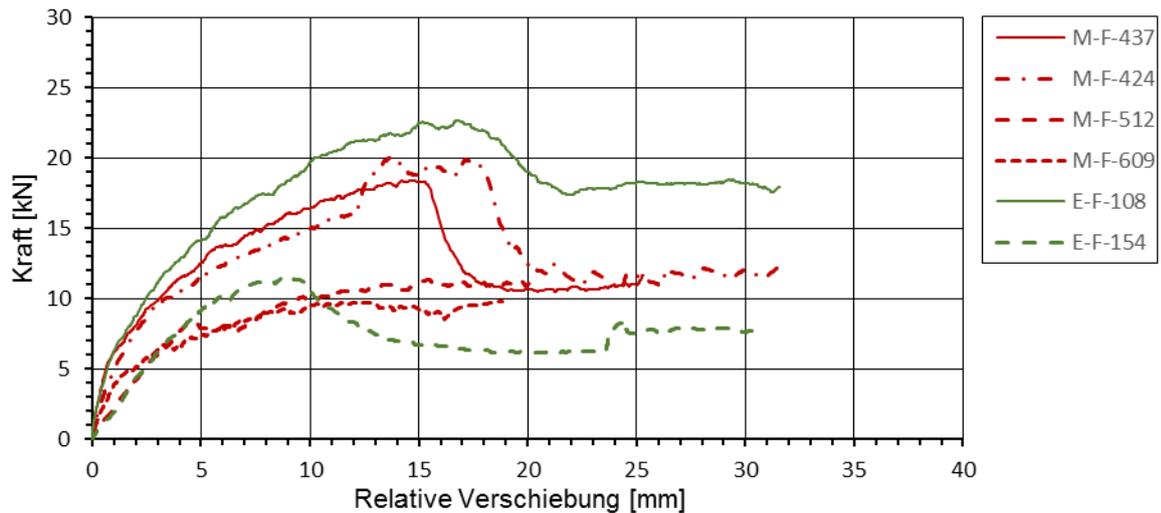


Abbildung 48: Vergleich der Kraft-Relativverschiebungslinien der Gruppen M-F und E-F

Der Vergleich des Schubtragverhaltens der zwei Gruppen M-P und E-P ist in Abbildung 49 dargestellt. Da die Mineralwolle einen sehr geringen Beitrag zur Schubkraftübertragung leistet, ist ein Vergleich mit dem Versuch der Gruppe E-P möglich, wo der EPS-Dämmstoff fast vollständig geschmolzen ist und somit von der Schubkraftübertragung ausgeschlossen ist. Es kann festgestellt werden, dass das Schubverhalten aller drei Versuche mit Mineralwolle annähernd gleich ist und analog zu Versuch E-P-159. Der Versatz der erreichten Kraft zwischen den Versuchsgruppen kann auf die stabilisierende Wirkung der Mineralwolle zurückgeführt werden. Bei Versuch E-P-159 ist die Dämmung praktisch nicht vorhanden, während bei den Versuchen mit Mineralwolle der Dämmstoff bei einer Schubverformung gleichzeitig noch zusammengedrückt werden muss.

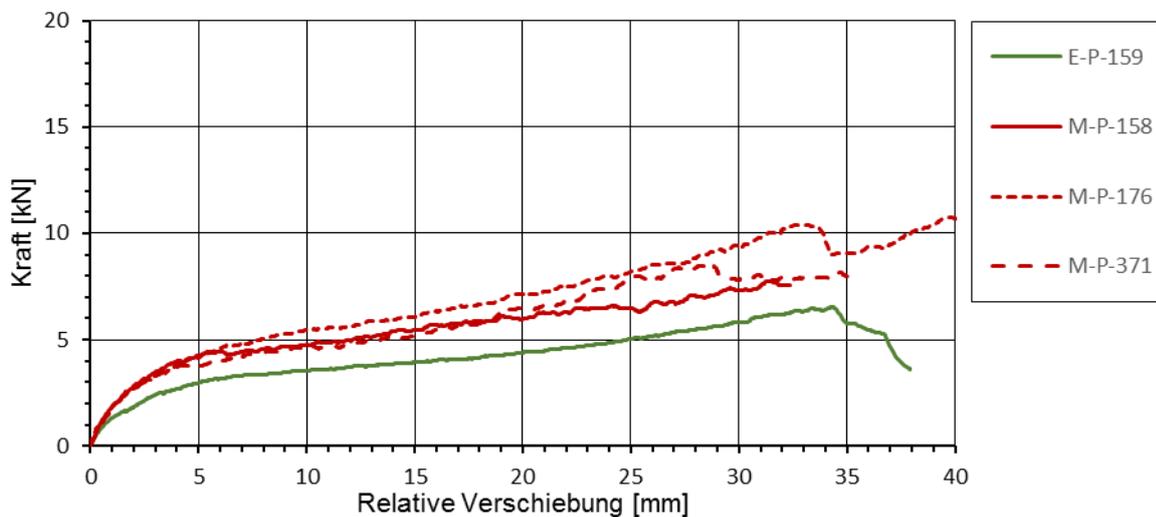


Abbildung 49: Vergleich der Kraft-Relativverschiebungslinien der Gruppen M-P und E-P

## 7.7. Brandverhalten der Kernschichten einer Sandwichwand im Brandfall

In der Versuchsreihe der Kleinbrandversuche an Sandwichwandquerschnitten wurde das Schubtragverhalten bzw. Brandverhalten der aus verschiedenen Komponenten ausgeführten Kernschichten untersucht. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus Kapitel 7.6 in Bezug auf das Brandverhalten und den Feuerwiderstand der ganzen Sandwichwand betrachtet und bewertet. Die Kernschichten, abhängig vom verwendeten Verbindungsmittel und Dämmstoff sowie deren Kombination, weisen eine Schubkraftübertragung von unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Dauer unter Brandbeanspruchung auf. Diese Erkenntnisse werden nachfolgend besprochen. Zusätzlich werden schematische Darstellungen des Schubtragverhaltens für die jeweiligen Kernschichtkomponenten dargestellt, die auf den aufgenommenen Lasten und Versuchsbeobachtungen basieren.

Die Verankerung aller Verbindungsmitteltypen wurde in keinem Versuch beschädigt bzw. hat nicht versagt. Die Verbindungsmittel selbst haben in der Zwischenschicht versagt. Tatsächlich aber treten die in den Kleinversuchen erzeugten Relativverschiebungen der Schichten im Brandfall nicht auf. Die im Großbrandversuch beobachteten Relativverschiebungen der Schichten waren im Vergleich zu den Verschiebungen beim Versagen in den Kleinbrandversuchen sehr klein, obwohl im Großbrandversuch die weichste der untersuchten Ausführungen (GFK+Mineralwolle) verbaut wurde.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Verankerung der Verbindungsmittel in einer brandbeanspruchten Wand versagt wird aufgrund der Beobachtungen in den Kleinbrandversuchen als gering eingeschätzt. Selbst große Relativverschiebungen die zum Versagen der Verbindungsmittel geführt haben (also außerhalb der beobachteten Größenordnung der Verformungen in Großbrandversuchen) führten nicht zu einer Beschädigung der Verankerung. Aus diesem Grund wurde das Auszugtragverhalten der Verbindungsmittel in diesem Forschungsprojekt nicht weiter analysiert.

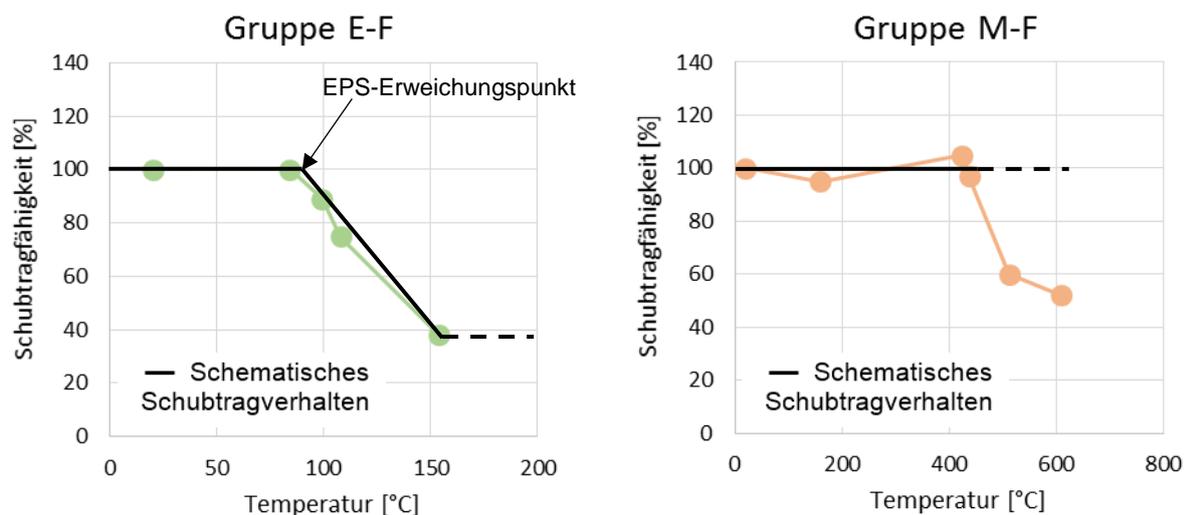


Abbildung 50: Schematische Darstellung des temperaturabhängigen Schubtragverhaltens des Flachankers und erreichten Versagenslasten im Verhältnis zu der Versagenslast der Referenzversuch; mit EPS-Dämmung (links) und mit Mineralwolle (rechts)

Das temperaturabhängige Schubtragverhalten der Flachanker anhand der erreichten Versagenslasten werden im Verhältnis zu dem Versagenslast des Referenzversuchs in der

Abbildung 50 dargestellt. Die getesteten Flachanker haben in dem verwendeten Versuchsaufbau praktisch keine Empfindlichkeit gegenüber den getesteten Temperaturen (gemessen an dem Verbindungsmittel, zwischen Kernschicht und der beflamten Schale) bis 609°C gezeigt. In den Versuchen M-F-512 und M-F-609 (Gruppe M-F) hat die beflamte Schale versagt und nicht die Verbindungsmittel. Die hohen Lasten (ca. 50% von den auf Beulen versagten Versuchskörpern), die trotz Versagen der Betonschale erreicht wurden, sowie intakte Verbindungsmittel und deren intakte Verankerung, lassen auf ein gutes mechanisches Verhalten bis 609°C schließen. Um den möglichen Einfluss der thermischen Beanspruchung auf das Schubtragverhalten der Flachanker zu erfassen, müssten die Betonschalen der Versuchskörper eine höhere Dicke besitzen. Die Abminderung der Schubtragfähigkeit im Fall des Versuchskörpers mit EPS-Dämmung (Gruppe E-F) ab 99°C lässt sich lediglich auf den Schubtragfähigkeitsabfall der EPS-Dämmung zurückzuführen.

In den dünnen Betonschalen (die hier 7 cm und weniger aufweisen) kommt es in Kombination mit relativ schubsteifen Verbindungsmitteln (wie Stahl-Flachanker und Manschetten) unter Brandbeanspruchung zu Zwangsspannungen infolge von Temperaturdehnungen. Beobachtet wurde bei allen Versuchen mit Flachankern, dass die beflamte Betonschale immer gerissen ist. Eine Beeinträchtigung der raumabschließenden Funktion konnte nicht beobachtet werden. Die Stahl-Flachanker unterlagen beim Versagen plastischen Verformungen, so dass die beim Abkühlen zusätzliche Spannungen in den Wänden verursachen können.

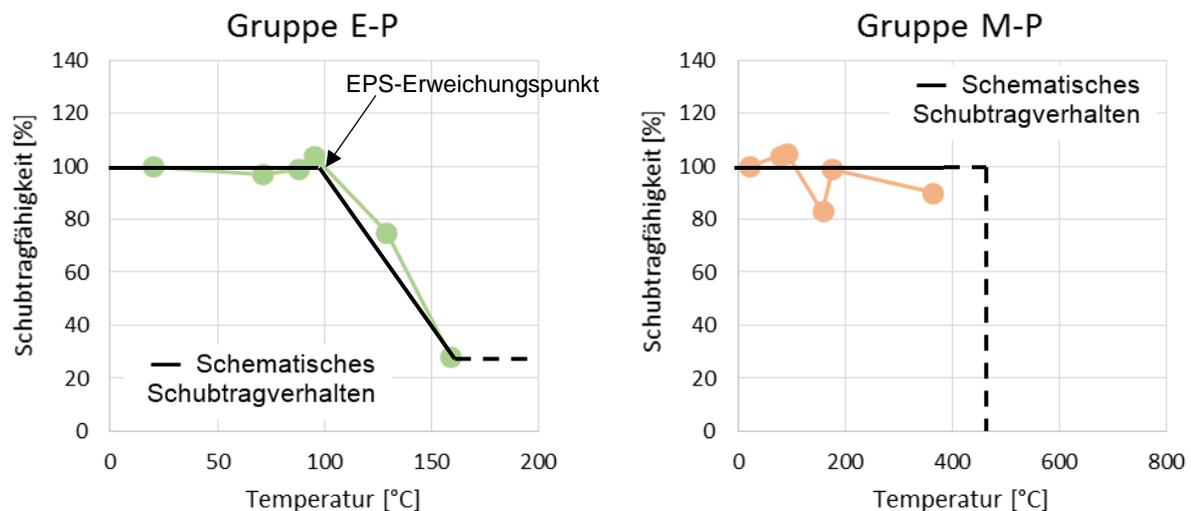


Abbildung 51: Schematische Darstellung des temperaturabhängigen Schubtragverhaltens der GFK-Verbindungsmittel und erreichten Lasten bei 20 mm Relativverschiebung im Verhältnis zu dem Referenzversuch; mit EPS-Dämmung (links) und mit Mineralwolle (rechts)

Das temperaturabhängige Schubtragverhalten der GFK-Verbindungsmitteln anhand der erreichten Lasten bei 20 mm Relativverschiebung werden im Verhältnis zu der analogen Last vom Referenzversuch in der Abbildung 51 dargestellt. Die Analyse wurde bei der 20 mm Relativverschiebung durchgeführt, um die Ungleichheiten infolge unterschiedlichem Verhalten der EPS-Dämmung von der Schubtragverhalten der GFK-Verbindungsmittel zu eliminieren. Die thermische Beanspruchung hatte Einfluss auf die Versagensart der GFK-Verbindungsmittel, da sich bereits bei leicht erhöhter Temperatur (ab ca. 80°C) mehrere Längsrisse im erhitzten Teil der Anker bildeten. Versuche bei Raumtemperatur zeugten bevorzugend einen Längsrisse über die gesamte Länge. Im Versuch sind nahe der Temperatur des Schmelzpunktes des Harzes die Glasfasern intakt geblieben und stehen immer noch in Verbindung mit

dem verankerten Teil in der beflammten Schale. Damit lässt sich feststellen, dass das Schubverhalten der angewendeten GFK-Verbindungsmitel von den thermischen Eigenschaften des Harzes abhängig ist. Im Praxisfall muss bei der Bewertung des Brandverhaltens einer Sandwichwand mit Verbindungsmittel aus faserverstärktem Kunststoff im Brandfall vor allem der Schmelz- bzw. Erweichungspunkt und die Temperatur ihrer thermischen Zersetzung bedacht werden. Die GFK-Verbindungsmitel zeigten prinzipiell elastisches Verhalten, so dass sie nach dem Versuchsende und Abkühlen wieder zur ursprünglichen Form übergegangen sind.

In den Versuchen mit GFK-Verbindungsmiteln wurde keine Abminderung der Schubsteifigkeit bei steigenden Temperaturen bei Versuchen mit EPS-Dämmung (Gruppe E-P) und leichte nicht eindeutige Abminderung bei Versuchen mit Mineralwolle (Gruppe M-P) beobachtet. In dieser Analyse wurde der Versuch M-P-R1 als Referenz genommen, da der Versuch M-P-R2 ein übermäßig großer Beitrag der Dämmung zeigte, bedingt durch den Rissverlauf in der Mineralwolle (vergleiche Kapitel 7.5.3). Außerdem haben die GFK-Verbindungsmitel, welche bei Temperaturen nahe der Zersetzungstemperatur des Harzes untersucht wurden, ähnliches Schubtragverhalten wie die Versuche mit niedrigeren Temperaturen gezeigt. Bis zum Erreichen ihres Schmelzpunktes behalten sie annähernd konstante Schubsteifigkeiten und Schubfestigkeiten. Die Angaben des Herstellers über die Temperaturbeständigkeit der Glasfaser von 600°C (Schmelzpunkt der Glasfaser) wurden bis zu einer Temperatur von ca. 460°C bestätigt (die maximal erreichte Temperatur im Versuch M-P-363). Die Schubtragfähigkeit der Verbindungsmittel geht aber bereits bei ca. 363°C verloren, infolge der thermischen Zersetzung des Harzes. Die Abminderung der Schubtragfähigkeit im Fall der Versuchskörper mit EPS-Dämmung (Gruppe E-F) ab 95°C lässt sich lediglich an den Schubtragfähigkeitsabfall der EPS-Dämmung und ihrer stabilisierenden Wirkung zurückzuführen.

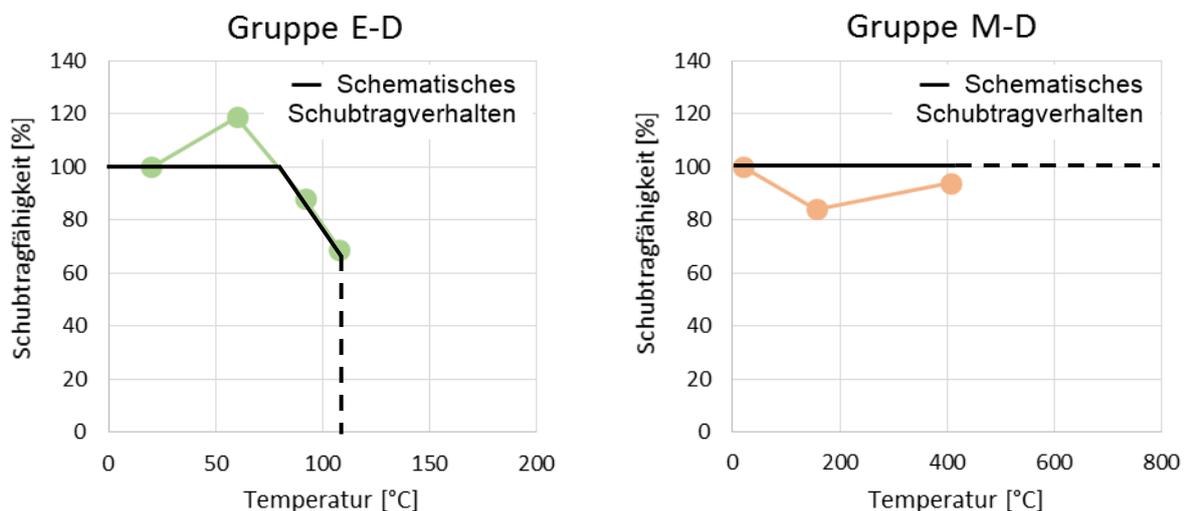


Abbildung 52: Schematische Darstellung des temperaturabhängigen Schubtragverhaltens der Dämmstoffe und erreichten Versagenslasten im Verhältnis zu der Versagenslast der Referenzversuch; mit EPS-Dämmung (links) und mit Mineralwolle (rechts)

Das temperaturabhängige Schubtragverhalten der Dämmstoffe anhand der erreichten Versagenslasten werden im Verhältnis zu der Versagenslast des Referenzversuchs in der Abbildung 52 dargestellt. Bei der Betrachtung des Brandverhaltens der Dämmstoffmaterialien in Sandwichwänden sind die erreichte Temperatur und der Schmelzpunkt der Materialien entscheidend für ihren mechanischen Beitrag zur Biegesteifigkeit einer Wand. Dabei hat das

Kochen und Verdampfen des freien Wassers im Beton und in der Dämmung einen sehr wichtigen Einfluss darauf. Bei einer Temperatur von ca. 100°C wird die gesamte Dicke des porösen Dämmstoffes auf 100°C erhitzt, ebenso auch bei größeren Kernschichtdicken (20 cm). Dies kann die gesamte Dämmschicht in einer sehr kurzen Zeit (5 min) beschädigen, wenn sie temperaturempfindlich bei Temperaturen unter 100°C ist. Zusätzlich wird dadurch die unbeflammte Betonschale über die gesamte Verdampfungszeit mit durch den aufsteigenden Wasserdampf erhitzt. Nach der vollständigen Verdampfung wird die thermisch dämmende Funktion der Dämmung wieder aktiviert (beobachtete geringe Temperaturabfälle in Großversuch 2), solange sie noch vorhanden ist. Die Verdampfung des freien Wassers trägt maßgeblich zum Wärmeübertrag zur unbeflammten Schale bei.

Die getestete Mineralwolle (Gruppe M-D) zeigte eine generelle Unempfindlichkeit ihrer mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen. In der Abbildung 52 wurden für jeweiligen Verhältnisse die Referenzversuche genommen, die in gleichen Versagensart versagt haben (interlaminares Riss oder Ablösen des Verbunds – vergleiche Kapitel 7.6.5). Ihr Beitrag zur Schubübertragung und Stabilisierung der Verbindungsmittel ist jedoch vernachlässigbar gering. Die EPS-Dämmung weist einen im Vergleich großen Widerstand gegen Schubverformung und Zusammendrücken auf. Dieser wird aber mit Erreichen der Erweichungstemperatur geringer und das Tragverhalten nimmt deutlich ab, welches dann mit fortschreitendem Schmelzen nicht mehr zum Tragen kommt.

Bei schmelzenden Dämmmaterialien (z. B. EPS) kann die Erhitzung der Verbundfläche zum Beton zu einer Verbesserung des Verbundes führen. Somit wäre das bekannte Problem mit der ungleichmäßigen Qualität des EPS/Beton-Verbundes bei erhöhten Temperaturen zwischen 60°C bis 92°C gelöst. Dabei kann der Dämmstoff zäher werden, so dass er bei steigenden Relativverschiebungen nicht schlagartig auf Schub versagt. Dieses Verhalten wird aber schnell mit zunehmender Zersetzung bei höheren Temperaturen des Dämmstoffes begleitet (Gruppe E-D). Die Zersetzung könnte in realen Sandwichwänden noch mehr ausgeprägt sein, da in großformatigen Wänden die Temperatur und der Wasserdampf nicht direkt entweichen können. Das führt zu einer intensiveren Erweichungsphase des EPS-Dämmstoffes, bevor sie anfängt zu schmelzen. Bis das Schmelzen auftritt, behält das EPS seine mechanischen Eigenschaften. Sobald der Wasserdampf austritt, eliminiert er den Beitrag dieser Materialien an der Schubtragübertragung, obwohl bei den Versuchen mit Verbindungsmitteln ein abgeminderter Beitrag wurde sogar bis Temperaturen von über 150°C beobachtet wurde. Außerdem hat der nachgiebige EPS-Dämmstoff eine bedeutende Empfindlichkeit auf die Verformungsgeschwindigkeit gezeigt. Bei langsam steigenden Verformungen hat sich der verformte Dämmstoff bis zu einem gewissen Grad relaxiert. Deswegen kann bei kurzen und nicht voll entwickelten Bränden (bzw. wenn die Temperatur in der Kernschicht nicht den Schmelzpunkt erreicht) die EPS-Dämmung größere Verformungen aufnehmen ohne zu versagen. Die durch Brand und durch thermische Biegung beanspruchten Sandwichwände besitzen deshalb immer noch große Biegesteifigkeit (infolge des vorhandenen Sandwicheffekt), die bei der Anprallbelastung aktiviert werden kann. Bis der Schmelzpunkt des EPS-Dämmstoffes erreicht wird, zeigten sich die mechanischen Eigenschaften als nicht abgemindert (sogar verbesserter Verbund). Danach geht die Schubübertragung zwar verloren, aber der Verbund wird zäher, was sich positiv bei der Stoßbelastung auswirkt.

Das mechanische Verhalten der jeweiligen Dämmmaterialien überschneidet sich mit dem von den Verbindungsmitteln, wobei die zwei Komponenten die Schubkraft unabhängig

voneinander übertragen. Die Dämmung wirkt zusätzlich zum thermischen Beitrag zur Feuerbeständigkeit einer Sandwichwand und der eigenen Schubübertragung, aussteifend auf die vorhandenen Verbindungsmittel. So wurde eine stabilisierende Funktion durch das feste Material der EPS-Dämmung gegen Beulen der Flachanker (auch bei teilweisem Schmelzen des EPS-Dämmstoffs auf der beflamten Seite) beobachtet. Der feste Dämmstoff (EPS) verzögerte das Versagen der Flachanker und änderte ihr Versagensbild. Dieser Effekt kann von großer Bedeutung sein, da die größten thermischen Verformungen der Sandwichwände in den ersten 30 min auftreten. Die in dieser Brandbelastungszeit immer noch intakte Dämmung kann dadurch das Versagen der Verbindungsmittel eine gewisse Zeit lang verhindern, trotz der schnell wachsenden Relativverschiebungen der Betonschichten. Auf der anderen Seite hält der versagte Flachanker auch trotz des abgeminderten Abstands der Betonschalen (aufgrund der plastischen Verformungen der Anker), was sich auf das Schubverhalten des erhitzten Dämmstoffs positiv auswirkt. Somit könnten die Anstoßbelastungen im Brand potenziell auch nach dem Versagen der Verbindungsmittel effektiv durch Sandwichwände absorbiert werden.

Obwohl die Mineralwolle allein eine vernachlässigbar kleine Schubsteifigkeit besitzt, weist sie in Kombination mit relativ nachgiebigen GFK-Verbindungsmittel einen bedeutenden Einfluss auf die Schubkraftübertragung der Kernschicht auf. In den ersten ca. 10 mm der Relativverschiebung regelt der Schubrissverlauf und deren Ausrichtung den Beitrag der Mineralwolle zum Schubverhalten der Verbindungsmittel. Beispielsweise ist die gesamte Schubübertragung auf die Verbindungsmittel zugewiesen, wenn die Mineralwolle Schrägrisse bildet und so dann kein Widerstand gegen Zusammendrücken der Kernschicht bei weiterer Schubverformung besitzt. Wenn aber die Mineralwolle auch nach ihrem Versagen die Betonschalen effektiv auseinanderhalten kann, ermöglicht sie eine zusätzliche Stabilisierung der Verbindungsmittel. Die Mineralwolle kann ihre Form auch bei deutlich erhöhten Temperaturen ( $> 400^{\circ}\text{C}$ ) behalten und dadurch als eine gewisse Stabilisierung der Verbindungsmittel dienen. Zusammenfassend zeigen die Materialausbildung und ihr Schichtaufbau praktisch einen höheren Einfluss auf die Schubkraftübertragung als andere Faktoren wie z. B. die thermische Beanspruchung, der Verbund zum Beton oder die Verformungsgeschwindigkeit.

## **8. Auswirkung des Brandverhaltens der Kernschichten auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand**

### **8.1. Analyse der Wärmeübertragung in einer Sandwichwand im Brandfall**

Um den tatsächlichen mechanischen und thermischen Beitrag der zusätzlichen Schichten einer Sandwichwand (Vorsatzschale und Kernschicht) zur statischen Tragfähigkeit im Brandfall bewerten zu können, müssen deren Eigenschaften zeitlich mit dem Brandverhalten der gesamten Wand verbunden werden. Auf diese Weise ist es möglich die tatsächliche Auswirkung der beobachteten Eigenschaften der Kernschichten auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand abschätzen zu können.

Die thermischen und mechanischen Eigenschaften verschiedener Kernschichtkomponenten wurden unter unterschiedlichen, für die bestimmten Komponenten relevanten, Temperaturen untersucht. Diese sind in den angewendeten Temperaturbereichen aber für verschiedene Gruppen unterschiedlich, so dass deren gegenseitige Auswirkung aufeinander und auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand im Brandfall nicht direkt abgeleitet werden kann. Um die in der Versuchsreihe an Kleinversuchskörpern gewonnenen Erkenntnisse auf die

Ebene einer Sandwichwand übertragen zu können, müssen die jeweiligen Prüftemperaturen der Versuchsreihe aus Kapitel 7 (Kleinversuche) mit den eigentlichen Temperaturen in einer Sandwichwand unter Brandbeanspruchung (Großversuche) gegenübergestellt werden.

Um die experimentell bestimmten Eigenschaften der Kernschicht mit dem Feuerwiderstand einer Sandwichwand zu verbinden, wird ein numerisches Modell erstellt. Die Temperaturen zwischen der beflamten Betonschale und der Kernschicht können somit in einem Sandwichwandquerschnitt numerisch ermittelt werden. Das primäre Ziel dieser numerischen Untersuchung ist die Ermittlung der Temperatur zwischen der beflamten Betonschale und Kernschicht mit realitätsnahen Wärmeflussbedingungen eines Sandwichquerschnittes.

Wie bereits in experimentellen Untersuchungen in Schmitt u. a. 2017 [36] festgestellt wurde, beeinflusst die Geschwindigkeit und Dauer des Aufheizens grundsätzlich nicht die Eigenschaften der Kernschicht. Entscheidender Einflussparameter ist die Temperatur der Verbindungsmittel und der Dämmung. Aus diesem Grund wird die Verknüpfung des Kernschichtbrandverhaltens mit dem Brandverhalten der Sandwichwand durch die in der Kernschicht erreichte Temperatur als entscheidendes Kriterium angesehen.

### Beschreibung des thermischen Modells

Um den Temperaturverlauf über die Wanddicke einer Sandwichwand unter Brandbeanspruchung numerisch zu ermitteln, wurde ein 2D Modell im Programm Heat2 6.0 erstellt. Für jede untersuchte beflamte Betonschalendicke (4, 7, 10, 12, 14 und 16 cm) wurde ein Modell gewählt, das sich aus zwei Betondeckschichten und einer Kernschicht zusammensetzt. Die zwei dünnen Schalendicken (4 oder 7 cm) wurden zusätzlich zu den üblichen Betonschalendicken simuliert, da sie in aktuellen Forschungsarbeiten zu Sandwichelementen Anwendung finden.

In jedem Modell beträgt die übliche Kernschichtdicke 6 cm und die unbeflammte Betonschalendicke 7 cm. Die Dicken der unbeflammten Schale und der Kernschicht haben einen untergeordneten Einfluss auf die Wärmeübertragung durch die beflammte Schale als die thermischen Eigenschaften ihrer Materialien. Die Kernschicht besitzt einen vielfach höheren Widerstand als die Betondeckschichten und bildet die größte Barriere für den Wärmeabfluss. Es werden aber die Modelle der gesamten Sandwichwandquerschnitten simuliert, da die Präsenz und der Widerstand der zusätzlichen Schichten (Kernschicht und unbeflammte Schale) den Wärmeabfluss von der beflamten Betonschale stark verhindert und dadurch den Temperaturverlauf über die Dicke deutlich verändert. Somit können die realitätsnahen Wärmeabflussbedingungen für die beflammte Schale abgebildet werden.

Vereinfachend werden über die Branddauer (180 min) konstante thermische Materialeigenschaften angenommen. Für die Deckschichten aus Beton werden nach DIN 206 eine Stahlbewehrung von 1%, eine Rohdichte von  $2300 \text{ kg/m}^3$ , eine Wärmeleitfähigkeit  $2,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und eine Wärmespeicherzahl von  $2,3 \text{ MJ/(ml}\cdot\text{K)}$  angesetzt. Für die Kernschicht aus Mineralwolle werden eine Rohdichte von  $60 \text{ kg/m}^3$ , eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und eine Wärmespeicherzahl von  $0,0618 \text{ MJ/(ml}\cdot\text{K)}$  angesetzt. Die konvektiven Wärmeübertragungskoeffizienten wurden in Hulin u. a. 2016 [33] mit  $h_{\text{beflammt}} = 40 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  und  $h_{\text{unbeflammt}} = 25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  ausgewählt, da diese Werte in diesem Fall die besten Übereinstimmungen zwischen experimentellen und numerischen Untersuchungen an dünnen hochfesten Betonschalen geliefert haben. Diese Werte werden auch für die hier beschriebenen Simulationen

angenommen. Die Annahme solch relativ hoher Werte wirkt sich positiv auf die Sicherheit der durchgeführten Analyse aus. Hohe konvektive Wärmeübertragungs-Koeffizienten bedeuten, dass mehr Wärme an der beflamnten Betonschale übertragen wird und die Temperaturen in der Kernschicht schneller steigen.

In der Analyse werden mehrere Annahmen und Vereinfachungen angenommen. Vor allem die über die Branddauer konstanten thermischen Materialeigenschaften. Wobei die thermischen Eigenschaften in Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt, der Verdampfung und der chemischen Zersetzung der Materialien stehen. Nach Wierig 1963 [20] wird die Wärmedämmung der Bauteile während eines Brandes stark durch den Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Zunächst werden erhebliche Wärmemengen zur Verdampfung des Überschusswassers benötigt, die allerdings beim Kondensieren wieder frei werden. Eine Vernachlässigung dieses Effektes in dieser vereinfachten Analyse führt zu Ergebnissen auf der sicheren Seite, da allgemein mit der Brandzeit höhere Temperaturen im Beton erreicht wurden. Die höher angenommene Wärmeleitfähigkeit des Betons resultiert in voraussichtlich überschätzten Temperaturen in der späteren Phase (>1 Stunde) der Brandbeanspruchung. Im Weiteren, wurde die in Großversuchen beobachtete rasche Aufheizung der gesamten Kernschichtdicken mit kochendem Wasser auf 100°C in dieser Analyse nicht berücksichtigt, da die Wärmeübertragung in der unbeflammten Schale nicht im Fokus dieser Analyse steht. Es wurden auch keine Verbindungsmittel berücksichtigt. Deren Einfluss auf den Wärmefluss in der beflamnten Betonschale ist in dieser Betrachtung als vernachlässigbar einzuschätzen. Die potenzielle Betonabplatzung wird von der Analyse auch ausgeschlossen.

Die Untersuchung soll zur theoretischen Verbindung der untersuchten Eigenschaften der Kernschicht mit dem Brandverhalten einer Sandwichwand dienen. Deswegen kann die Simulation zur qualitativen Abschätzung des Temperaturverlaufs benutzt werden. Der Einsatz von verschiedenen hoch wärmeleitfähigen Verbindungsmittel, sowie unterschiedlichen Dicken der Schichten und deren Eigenschaften, können die genauen Temperaturanstiege während der Branddauer modifizieren. Dabei ist zu erwähnen, dass die Temperaturen auf der unbeflammten Seite in den Großversuchen durchaus gering geblieben sind (vergleiche Kapitel 6.7). Deswegen kann die Untersuchung der genauen Wärmeübertragung durch die durch Brand erhitzte Kernschicht und der unbeflammten Schale nicht durchgeführt werden.

Die thermische Belastung auf der brandbeanspruchten Seite der Sandwichwand bildete die übliche Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 13501-2 [4]:

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

Dabei ist:

$t$ - die Zeit des Brandbeginns, in Minuten (min)

$T$ - die mittlere Brandraumtemperatur, in Grad Celsius (°C)

Nur die Betonschale, die in dem jeweiligen Model der Brandbeanspruchung ausgesetzt wurde, wies eine variierende Dicke auf. Eine Wärmeübertragung parallel zur Richtung der Wandebene war ausgeschlossen. Die Anfangstemperatur sowie die Temperatur auf der unbeflammten Seite betragen jeweils 20°C.

## Ergebnisse

Die numerisch ermittelten Temperaturgradienten in Sandwichwänden sind in der Abbildung 53 dargestellt; exemplarisch für eine beflammete Schale (links) mit einer Dicke von 10 cm und eine beflammete Schale (rechts) mit einer Dicke von 20 cm. Aus dem Bild lässt sich entnehmen, dass bei der dünneren beflamten Schale (10 cm) die Kernschicht den größten Teil (ca. 70 %), wobei die beflamte Schale nur ca. 29 % des gesamten Temperaturunterschiedes zwischen beflamter und unbeflammter Seite übernimmt. Bei der dickeren beflamten Schale (20 cm) ist der Temperaturgradient über die Kernschicht ca. 22 % wobei über die beflamte Schale allein ca. 78% des kompletten Temperaturunterschiedes zwischen Innen- und Außen-seite anfallen. Dies ist die Folge der großen Wärmespeicherkapazität der dickeren Betonschale. In beiden Fällen ist die unbeflammte Schale effektiv durch anderen Schichten gedämmt und so wird die unbeflammte Seite der Wand nur geringfügig erwärmt.

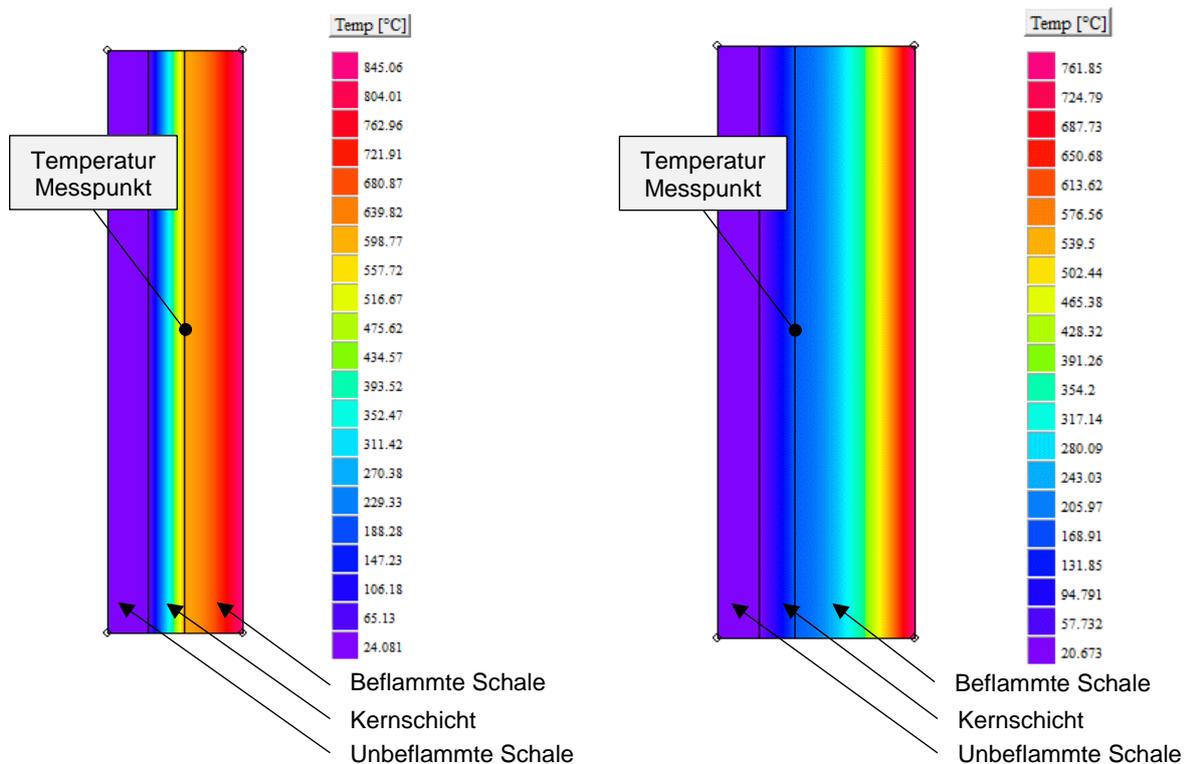


Abbildung 53: Temperaturverlauf über den Sandwichwandquerschnitt, exemplarisch nach 3 Stunden Brandbeanspruchung; mit 10 cm Tragschalendicke (links) und 20 cm Tragschalendicke (rechts)

Der Temperaturverlauf über den Sandwichquerschnitt wurde für alle 5 min einer dreistündigen (180 min) Brandbelastung ermittelt. Die ermittelten Temperaturen in der Betontragschale zwischen Dämmung und Betonoberfläche wurden zur Erstellung von Temperatur-Branddauer-Diagrammen benutzt und in der Abbildung 54 dargestellt.

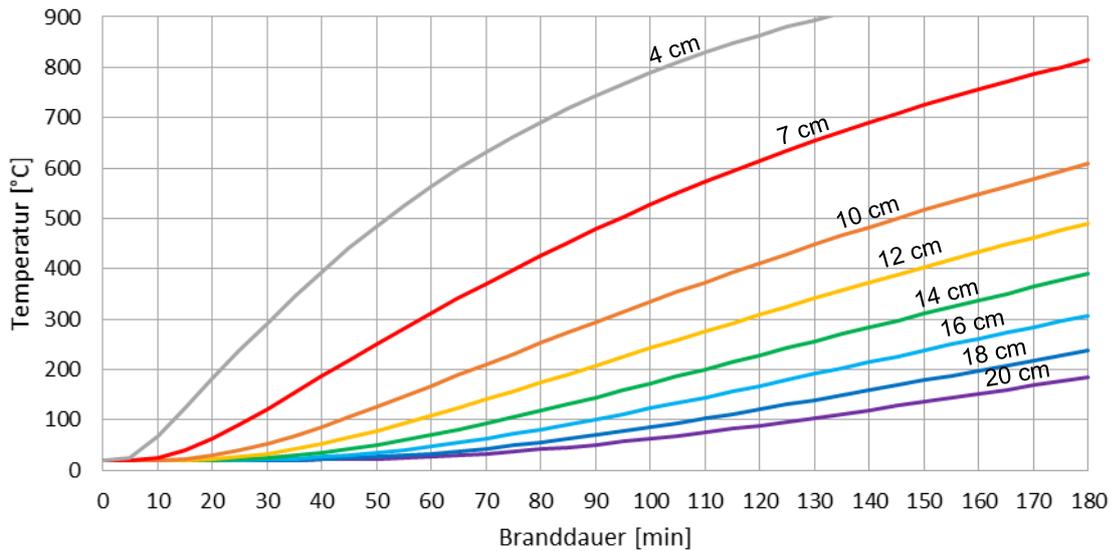


Abbildung 54: Temperaturanstiege an der inneren Seite der beflamten Betonschale (zwischen Beton und Kernschicht) für verschiedene Dicken der beflamten Betonschale

Die Plausibilität der ermittelten Ergebnisse des Wärmeübertrages durch den Sandwichquerschnitt können durch einen Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur bestätigt werden. In der Abbildung 55 sind der Temperaturverlauf in Schwerbetonwänden (Raumgewicht von rund  $2400 \text{ kg/m}^3$ ) in Abhängigkeit von der Wanddicke aus Wierig 1963 [20] (links), sowie ein aus analogenischen Daten von durchgeführten Simulationen an Sandwichquerschnitten erstelltes Diagramm (rechts) dargestellt. Das Bild aus Wierig 1963 [20] fasst die in Brandversuchen an Betonwänden zurzeit gesammelten Erkenntnisse zusammen. Es werden nur Anhaltspunkte angegeben, da die Steuerungen bei Temperaturmessungen im Wandinneren besonders infolge unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehaltes, verschiedener Zuschlagsstoffe und unterschiedlicher Raumgewichte sehr groß sind.

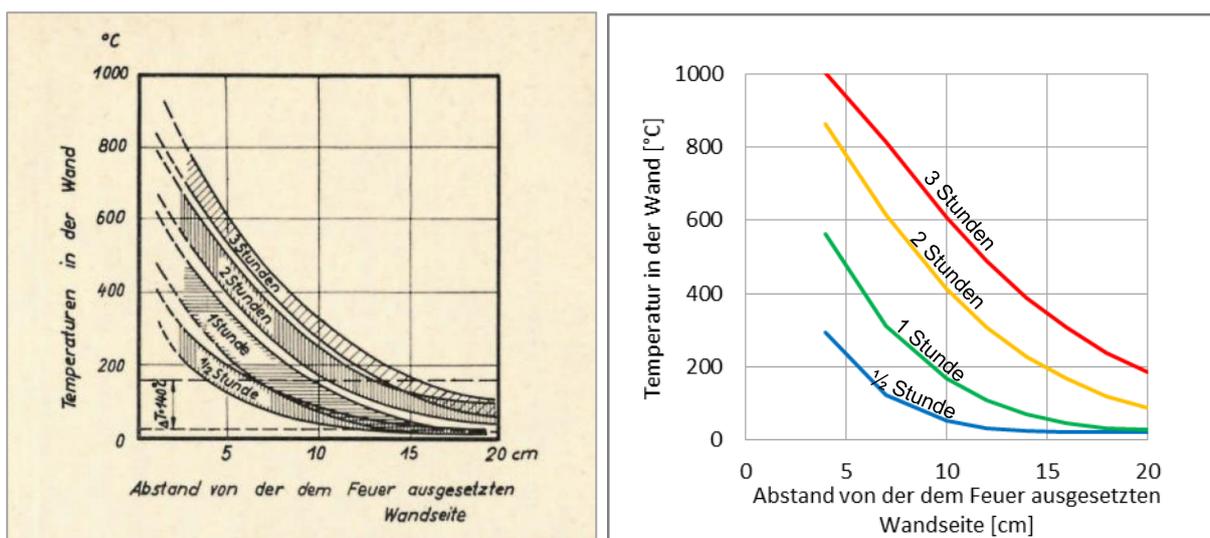


Abbildung 55: Temperaturverlauf in Schwerbetonwänden ( $R=2300 \text{ kg/m}^3$ ) verschiedener Dicke im Normenbrand nach  $\frac{1}{2}$ , 1, 2 und 3 Stunden

Beim Vergleich der Diagramme aus der Literatur (links) mit dem Diagramm mit den Simulationsdaten (rechts) wird erkenntlich, dass bei kürzeren Branddauern die Temperaturen

auf der dem Feuer abgekehrten Seite der beflamten Betonschale gut übereinstimmen. Bei höheren Branddauern (von 2 und 3 Stunden) werden die Temperaturen in den Simulationen an Sandwichquerschnitten deutlich höher. Dieser Effekt ist besonders bei dünnen Betonschalen ausgeprägt. Bei Wänden mit einer Dicke von 10 cm wird nach 2 Stunden Brand in den anhand der Simulationen über 400°C erreicht, während nach Wierig 1963 [20] die Temperatur bei 170°C bis 260°C liegt. Bei längerer Branddauer wird dieser Unterschied noch größer. Analog wird, für eine Wand mit einer Dicke von 20 cm nach 2 Stunden Brand in den Simulationen eine Temperatur von ca. 90°C erreicht, während nach Wierig 1963 [20] die Temperatur bei ca. 40°C bis ca. 100°C liegt. Dieser Unterschied kann zum größten Teil durch die unterschiedlichen Wärmeabflussbedingungen auf der dem Feuer abgekehrten Seite der beflamten Betonschale verursacht werden. Bei Wierig 1963 [20] sind die brandbelasteten Betonwände auf der unbeflammten Seite ungeschützt, sodass der Wärmeabfluss prinzipiell nicht verhindert wird. Bei den für dieses Forschungsprojekt durchgeführten Simulationen wird die beflamte Betonschale mit zusätzlichen Schichten einer Sandwichwand thermisch gedämmt. Dies bremst deutlich den Wärmeabfluss und führt bei dünneren Schalen und längeren Branddauern zu deutlich erhöhten Temperaturanstiegen in der Kernschicht. Somit können die ermittelten Ergebnisse zur zeitlichen Verknüpfung der Kernschichteigenschaften und der Branddauer benutzt werden.

Aus der Abbildung 55 kann noch entnommen werden, dass die beflamte Schale einer Sandwichwand im Vergleich zu einzelnen Betonschalen von gleicher Dicke grundsätzlich heißer wird. Höhere Temperaturen über den Querschnitt führen zu einer höheren Erwärmung der Bewehrung und dadurch zu einer schnelleren Beeinträchtigung ihrer tragenden Funktion. Gleichzeitig wird der Beton durch höhere Temperaturen stärker beschädigt. Es kann also die tragende Funktion einer Wand (R) beeinträchtigt werden. Die dämmende Funktion (I) wird noch zusätzlich mit Hilfe der anderen Schichten der Wand unterstützt, so dass die Temperatur auf der unbeflammten Seite der Wand gering bleibt. Das kann zu einer schnelleren Schwächung der beflamten Schale führen. Wenn die Vorsatzschale einer Sandwichwand beflammt wird, stellt dies für das Tragverhalten der Wand eine untergeordnete Bedeutung dar. Im ungünstigsten Fall wird die Vorsatzschale soweit beschädigt, dass ihr Beitrag zur Tragwirkung verloren geht. Die unbeflammte Tragschale wird jedoch weiter von der noch vorhandenen Dämmung geschützt, wodurch die Erwärmung der Tragschale verzögert wird. Wenn aber das Feuer auf der Seite der Tragschale ausbricht, wird sie stärker erhitzt als eine analogische Betonschale ohne Vorsatz- und Kernschicht. In einem solchen Fall kann die schnellere thermische Beeinträchtigung der tragenden Schicht eine potenzielle Gefahr darstellen. Wegen des mehrschichtigen Aufbaus einer Sandwichwand wird sie jedoch durch die vorhandene Sandwichtragwirkung und der Vorsatzschale ausgesteift. In den Großbrandversuchen 1 und 3 wurden jedoch keine übermäßigen Beschädigungen der beflamten Tragschalen beobachtet.

## 8.2. Kernschichteigenschaften und Feuerwiderstand einer Sandwichwand

Anhand des Diagramms aus der Abbildung 54 werden in diesem Kapitel die Kernschichteigenschaften mit den in der Kernschicht erreichten Temperaturen während der Branddauer zeitlich abgestimmt. So kann deren Einfluss auf den Feuerwiderstand ermittelt werden. In dieser Analyse werden die in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Materialien analysiert. Da sie aber die üblichen und repräsentativen Ausführungen von Sandwichwänden

darstellen, kann nach diesem Beispiel das Verhalten von anderen Materialien qualitativ extrapoliert werden.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse über die charakteristischen Temperaturen bezüglich des Brandverhaltens der Flachanker mit der in der Kernschicht erreichten Temperatur sind in Abbildung 56 dargestellt.

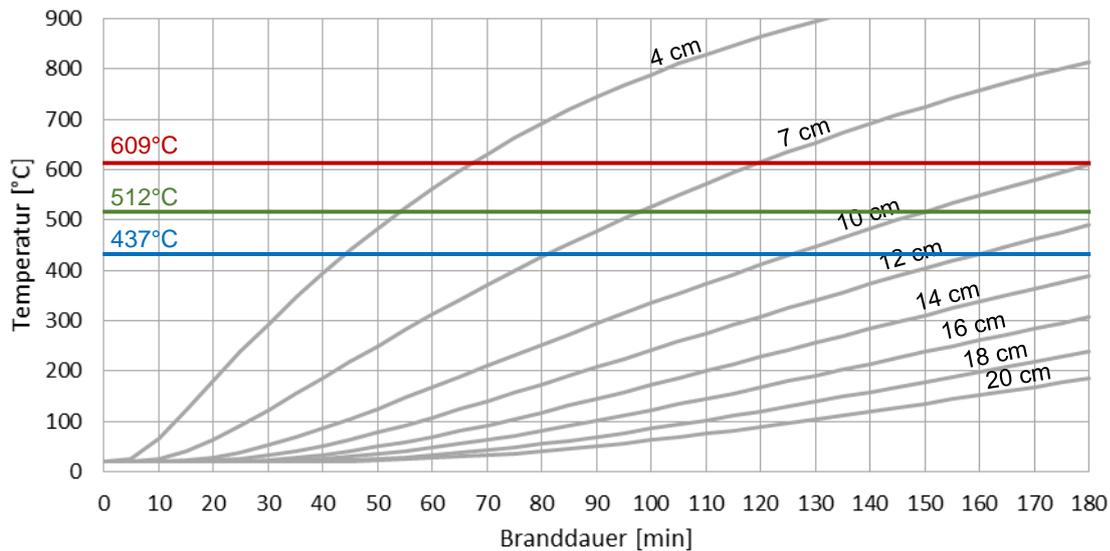


Abbildung 56: Charakteristische Temperaturen für Schubtragverhalten der Flachanker verglichen mit Temperaturen in der Kernschicht in Abhängigkeit der Branddauer und der Dicke der beflamnten Betonschalendicke

Die experimentell ermittelten Werte bestätigen unveränderte Schubübertragungseigenschaften der Flachanker bis zu einer Temperatur von 437°C (blaue Linie). Nämlich die höchste Prüftemperatur, bei der die Flachanker auf Beulen versagt haben, liegt bei 437°C. Daraus resultiert (anhand des Bildes) eine Branddauer von ca. 80 min für Betonschalen mit einer Dicke von 7 cm, bei welchem ein Versagen auf Beulen zu erwarten ist und eine sichere und zuverlässige Schubübertragung gewährleistet ist. Bis zu dieser Branddauer kann infolge der Schubübertragung durch die Flachanker, die den Widerstand einer Wand gegen eine Anstoßbelastung und Stabilitätsversagen erhöhen, mit einer bedeutenden Sandwichtragwirkung und erhöhter Biegesteifigkeit gerechnet werden. Allerdings kam es während der Beflammung des Sandwichquerschnittes bis zu einer Temperatur von 609°C bzw. 512°C in der Kernschicht zur Schwächung der beflamnten Schale, so dass Beulen nicht erzeugt werden konnte und die Betonschalen gebrochen wurden. In beiden Fällen wurde weder der Flachanker noch seine Verankerung im Beton beschädigt. Dabei wurden trotzdem Versagenslasten von ca. 50% der Referenzversuch erreicht. Dadurch kann es bis 609°C (rote Linie) mit guten mechanischen Eigenschaften des Flachankers gerechnet werden. Wie aus der Abbildung 56 entnommen werden kann, gewährleistet eine Dicke der beflamnten Betonschalen gleich oder größer als 10 cm, dass diese Temperatur erst nach 180 min der Branddauer erreicht wird. Bei so einer langen Beflammung muss aber mit starker Beeinträchtigung der beflamnten Schale gerechnet werden. Die experimentell erzeugte erhebliche thermische Beschädigung der beflamnten Schale bei 512°C (grüne Linie) wird nach der Branddauer von ca. 98 min für Betonschalen mit einer Dicke von 7 cm bzw. ca. 54 min für Betonschalen mit einer Dicke von 4 cm erreicht. Die bei dieser Branddauer auftretenden thermischen Beschädigungen der dünneren beflamnten Schalen (4, 7 bzw. potenziell 10 cm) und der dabei

entstehenden Spannungskonzentrationen können zu erheblichen Spannungskonzentrationen führen und die Anwendung solch steifer Flachanker in dünnen Betonschalen im Brandfall unzuverlässig machen. Bei der Berücksichtigung der Schubübertragung durch Kernschichten bei solch relativ hohen Temperaturen muss auf die vorhandene Beschädigung der thermisch empfindlichen Dämmstoffe Rücksicht genommen werden.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse über die charakteristischen Temperaturen bezüglich des Brandverhaltens der GFK-Verbindungsmitel mit der in der Kernschicht erreichten Temperatur sind in Abbildung 57 dargestellt.

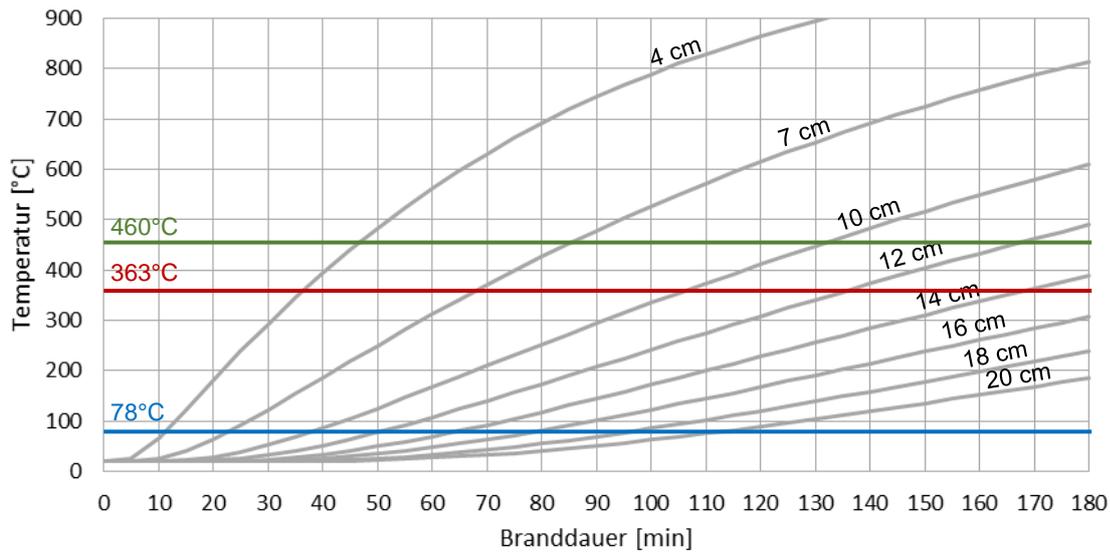


Abbildung 57: Charakteristische Temperaturen für Schubtragverhalten der GFK-Verbindungsmitel verglichen mit Temperaturen in der Kernschicht in Abhängigkeit der Branddauer und der beflamten Betonschalendicke

Ab einer Prüftemperatur von 78°C (blaue Linie) wurde ein Wechsel der Versagensart der GFK-Verbindungsmitel beobachtet. Bereits ab dieser Temperatur bilden die auf schubbeanspruchten GFK-Stäbe bevorzugt mehrere Längsrisse auf der beflamten Seite, da die mechanischen Eigenschaften des Harzes abgemindert werden. Die Stäbe unter Raumtemperatur hingegen bildeten bevorzugt einen Riss über die gesamte Länge. Die Tendenz zu vermehrten Längsrissen im beflamten Bereich wird mit steigender Temperatur immer ausgeprägter. Die daraus resultierende Branddauer variiert von ca. 23 min für 7 cm Schalen, über ca. 37 min für 10 cm Schalen und bis ca. 113 min für 20 cm Schalen, in der eine unveränderliche Versagensart angenommen werden kann. Der Wechsel der Versagensart sollte bei der Ermittlung des entsprechenden Schubwiderstands der GFK-Verbindungsmitel ab der zugehörigen Branddauer berücksichtigt werden. Dieser Einfluss soll in der statischen Berechnung der Sandwichwände im Brand berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde für die getesteten GFK-Verbindungsmitel eine gute Schubübertragung bis zu einer Prüftemperatur von 363°C (rote Linie) beobachtet. Die Abminderung der Versagenslasten bis zu dieser Temperatur unter Berücksichtigung des ungleichmäßigen Schubverhaltens der Dämmung und generellen Versuchsbeobachtungen waren von vernachlässigbaren Größen. Die daraus resultierende Branddauer variiert von ca. 67 min für 7 cm Schalen, über ca. 116 min für 10 cm Schale und bis zu einer Branddauer von über 180 min für Schalen, die mindestens eine Dicke von 16 cm aufweisen. Die in der Kernschicht erreichte Temperatur von ca. 460°C (grüne Linie) führte zu einem vollständigen Schmelzen des Harzes im Großteil des Verbindungsmitels.

Dadurch geht die weitere Schubübertragung der Verbindungsmittel verloren. Die zur Erreichung dieser Temperatur in der Kernschicht erforderliche Branddauer beträgt ca. 86 min für 7 cm Schalen, 133 min für 10 cm Schalen und 167 min für 12 cm Schalen. Für dickere Schalen wird dieser Zustand in der Kernschicht innerhalb von 180 min Branddauer nicht erreicht. Bei der Berücksichtigung der Schubübertragung durch Kernschichten bei solch relativ hohen Temperaturen muss (wie bei Flachanker) auf die vorhandene Beschädigung der thermisch empfindlichen Dämmstoffe Rücksicht genommen werden.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse über die charakteristischen Temperaturen bezüglich des Brandverhaltens der Dämmmaterialien mit der in der Kernschicht erreichten Temperatur sind in Abbildung 58 dargestellt.

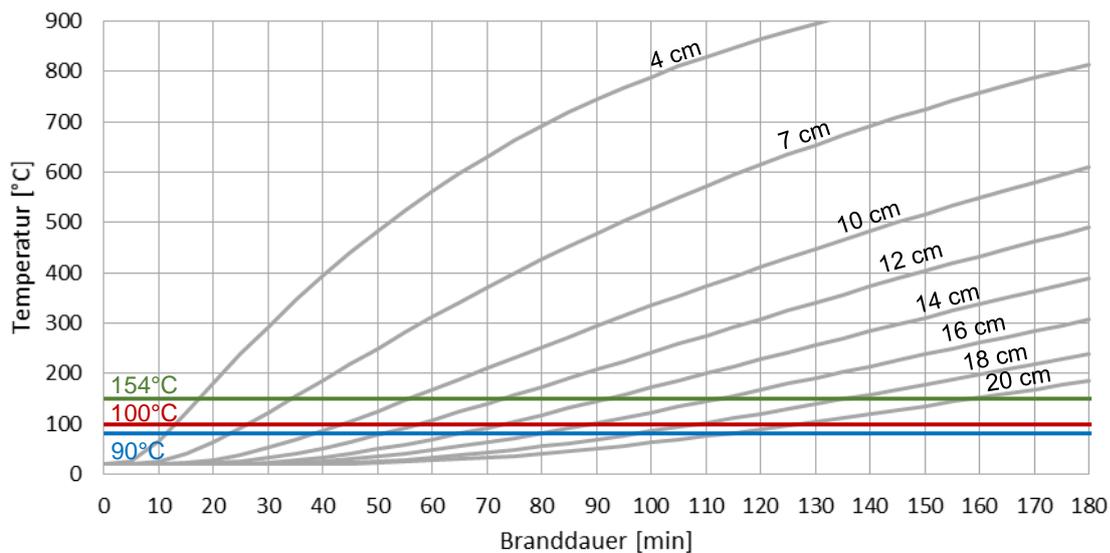


Abbildung 58: Charakteristische Temperaturen für Schubtragverhalten der Dämmstoffe verglichen mit Temperaturen in der Kernschicht in Abhängigkeit der Branddauer und der beflamnten Betonschalendicke

Der entscheidende Effekt der Erwärmung der Dämmschicht wurde bei 100°C beobachtet. Das zum Kochen gebrachte freie und verbundene Wasser der beflamnten Schale entweicht und durchdringt die poröse Dämmschicht. Die dazu erforderliche Branddauer variiert von 26 min für 7 cm Schalen, über 44 min für 10 cm Schalen und bis zu 125 min für 20 cm Schalen. Die auf diese Temperatur empfindlichen Dämmmaterialien können somit in sehr kurzer Zeit thermisch zerlegt werden. In den Großversuchen wurde bei diesen Temperaturen eine Erwärmung der gesamten Kernschicht beobachtet, da in einer sehr kurzen Zeit (5 bis 10 min) auch die unbeflammte Schale mit heißem Wasserdampf erhitzt wurde. Dies soll in der genauen Ermittlung des Wärmeflusses über die Sandwichwand im Brand berücksichtigt werden. Da die meisten thermischen Biegeverformungen der Wände in den ersten 30 min der Branddauer auftreten, können die festen Dämmmaterialien (wie die getestete EPS) effektiv zur Schubübertragung zwischen den Betonschichten beitragen. Die Mineralwolle leistet zwar einen vernachlässigbar geringen Beitrag zur Schubübertragung, bleibt aber ihre Festigkeit über diese Temperatur erhalten und nach der vollständigen Verdampfung des freien Wassers kann wieder teilweise ihre thermisch dämmende Funktion aktiviert werden.

Die EPS-Dämmung zeigte erste Anzeichen des Schmelzens bereits ab ca. 90°C. Diese Temperatur tritt nach Abbildung 58 um ca. 2 min bei 7 cm Schalen und bei dickeren Schalen mit einer Dicke von zum Beispiel 20 cm um ca. 10 min früher auf als das Erreichen der 100°C.

Bis zu dieser Branddauer kann eine volle Schubübertragung durch den EPS-Dämmstoff in der statischen Berechnung im Brandfall mit eingerechnet werden. Außer einer fortschreitenden Erweichung der EPS-Dämmung über diese Temperatur wird der Dämmstoff zudem zäher, so dass er große Verformungen aufnehmen kann ohne schlagartig seine gesamte Schubübertragung zu verlieren. Es kann aber die Behauptung aufgestellt werden, dass wegen der zusätzlichen Duktilität in diesem Temperaturbereich die Anstoßbelastung effektiv absorbiert werden kann. Das vollständige Schmelzen der EPS-Dämmung der Kernschicht wurde in den Versuchen bei 154°C beobachtet. Daraus lässt sich eine Branddauer von ca. 34 min für 7 cm Schalen, ca. 55 min für 10 cm Schalen und ca. 157 min für 20 cm Schalen bestimmen. Bis zu dieser Branddauer kann es mit einem gewissen Grad des zusätzlichen Widerstands gegen Anstoßbeanspruchung gerechnet werden. Ab dieser Branddauer gilt die EPS-Dämmung als nicht vorhanden, sodass die Schubübertragung (ähnlich wie bei Mineralwolle) allein durch die Verbindungsmittel gewährleistet werden kann. Gleichzeitig kann mit Schmelzen der EPS-Dämmung jegliche Aussteifung der Verbindungsmittel ausgeschlossen werden.

### 8.3. Nachrechnung von Großversuche

Die Erkenntnisse aus den Kleinbrandversuchen an Sandwichquerschnitten und der thermischen Simulation der Wärmeübertragung durch die beflamnte Schale einer Sandwichwand werden in diesem Kapitel mit den Beobachtungen der Großbrandversuche validiert. Durch die Temperatur in der Kernschicht werden zunächst die Großversuche und die Kleinversuche verbunden.

Die in den Kleinversuchen untersuchten Kernschichten wurden mit einer Schubverformung beansprucht, die die Relativverschiebung der Betonschalen einer Sandwichwand gegeneinander simulieren soll. Zuerst wurde aber festgestellt, dass die beobachteten Relativverschiebungen der Betonschalen in Großbrandversuchen (Versuchen 1 und 3) in einer geringen Größenordnung liegen. Die aufgenommene Verformung wurde größtenteils durch Verdrehung des Querschnitts infolge thermischer Biegung verursacht. Die tatsächliche Verschiebung der frei hängenden Vorsatzschale infolge der Senkung wurde nicht aufgenommen, da die Verformung infolge der Verdrehung eine Größenordnung höher liegt. Die mechanische Verbindung der Betonschalen hat über die gesamte Versuchsdauer und ebenfalls nach dem Abkühlen der Wände funktioniert. Deswegen kann behauptet werden, dass die im Brand auftretenden Schubverformungen auf die Verbindungsmittel deutlich geringer sind als die in den Kleinbrandversuchen erzeugten Versagensverformungen (11-25 für Flachanker und ca. 24 mm für die GFK-Verbindungsmittel). Deswegen sollte bei der Bewertung der Auswirkung des Kernschichtbrandverhaltens auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand besonders auf das Schubtragverhalten der Kernschicht unter geringeren Verformungen geachtet werden.

Die drei durchgeführten Großbrandversuche unterscheiden sich in der Dicke der beflamnten Schale (Trag- oder Vorsatzschale beflamnt) und der Dicke der Dämmschicht. Die aufgenommenen Temperaturen und Verformungen auf der unbeflamnten Seite, sowie die Beobachtungen bezüglich des Kernschichtbrandverhaltens, werden mit den Erkenntnissen aus Kapitel 8.2 verglichen.

In allen drei Großbrandversuchen wurden die Sandwichwände der vollen Brandbelastung über eine Dauer von 120 min ausgesetzt. Die dabei erzeugten Versagensarten der GFK-Verbindungsmittel unterscheiden sich je nach Grad der thermischen Beschädigung abhängig von der Dicke der beflamnten Schale.

Die GFK-Verbindungsmitel in Versuch 1 und 3 wiesen im mittigen Bereich der beflamnten Schale der Wand eindeutige Spuren einer Verkohlung auf. Deren Versagensbild entsprach dem Beschädigungszustand, der auch in den Versuchen M-P-176 und M-P-363 beobachtet wurde. Die starke Verkohlung wurde auf einem längeren Teil des Stabes festgestellt als beim Versuch M-P-176. Die Stäbe waren aber immer noch formfest und das Harz ist nicht vollständig geschmolzen wie dies bei Versuch M-P-363 beobachtet wurde. Hingegen waren die GFK-Verbindungsmitel im Großversuch 2 deutlich stärker beschädigt. Deren Versagensbild entsprach am meisten dem vom Kleinversuch M-P-363.

Diese Erkenntnisse stimmen mit der Analyse aus Kapitel 8.2 überein. Die Temperatur von 460°C, bei welcher die derartige Verkohlung der Verbindungsmitel wie im Großversuch 2 festgestellt wurde, wird anhand des Diagramms aus der Abbildung 59 für die 7 cm dicke, beflamnte Schale nach 85 min Branddauer auftreten. Dabei ist das Diagramm in Abbildung 59 ein Auszug vom Diagramm aus Abbildung 54 für 7 cm und 14 cm dicke Schalen. In der Simulation ergab die Änderung der Dicke der unbeflamnten Schale keinen Temperaturunterschied auf der unbeflamnten Seite der beflamnten Schale. Deswegen wurden die Simulationsergebnisse aus der Analyse in Kapitel 8.2 in dieser Nachrechnung verwendet. Unter der Berücksichtigung, dass die beflamnte Vorsatzschale weniger als 7 cm betrug (infolge der Betonabplatzung), sollten nach dieser Zeit die Verbindungsmitel den starken Beschädigungen unterliegen.

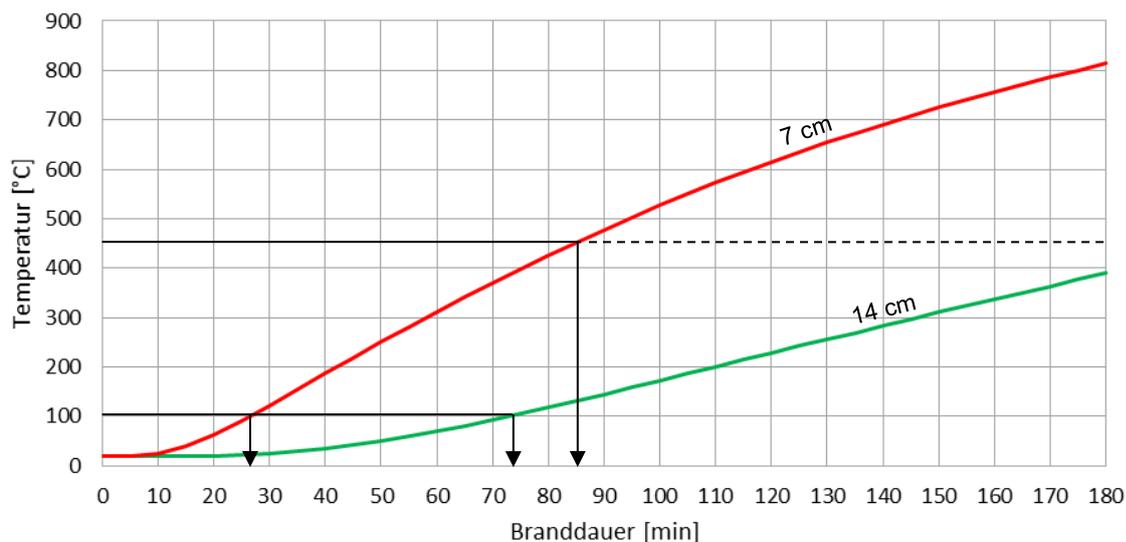


Abbildung 59: Temperaturanstiege an der inneren Seite der beflamnten Betonschale mit markierten charakteristischen Temperaturen von Großversuchen

Dies kann mit den Ergebnissen aus Versuch 2 der Abbildung 60 bestätigt werden. Ein Knick in der Kurve der horizontalen Durchbiegung in Versuch 2 ist auf dem Diagramm nach 80 min klar zu sehen. Die Verbindungsmitel beginnen zu diesem Zeitpunkt zu schmelzen und die Verbindung der Vorsatzschale löst sich teilweise von der Tragschale ab. Das resultiert in einer Umlagerung der Spannungen in beiden Betonschichten, so dass die ausgedehnte beflamnte Vorsatzschale und die unbeflamnte Tragschale nicht mehr zusammenwirken können. Somit wird die Durchbiegung der äußeren Schale verringert, was auf dem Diagramm zu sehen ist.

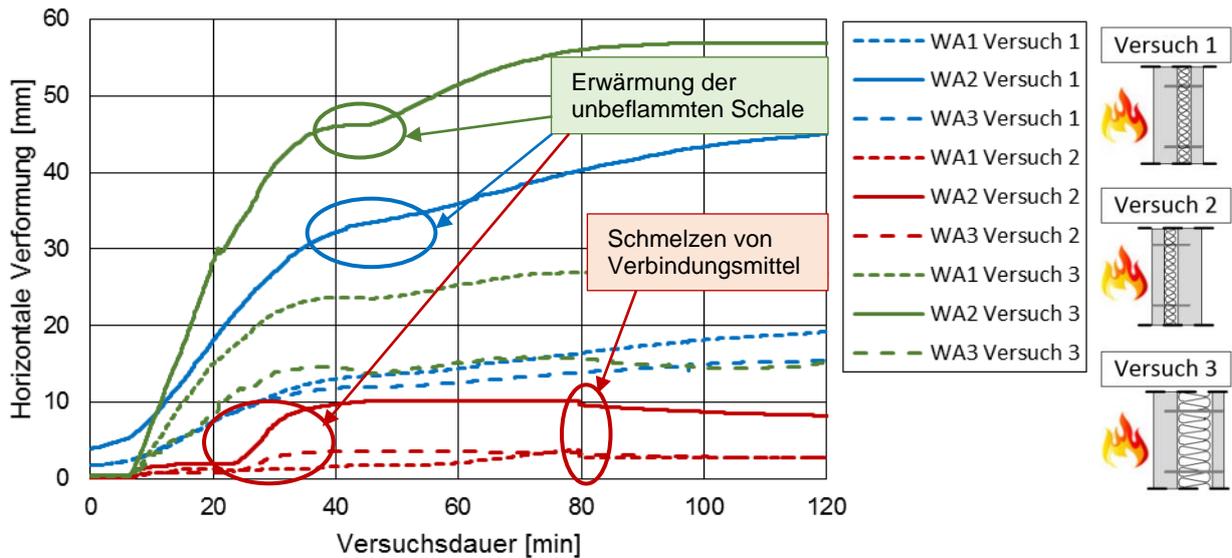


Abbildung 60: Horizontale Verformungen in Großbrandversuchen mit markierten charakteristischen Phasen

Bei den Versuchen 1 und 3 wurden solche Verringerungen der horizontalen Verformungen nicht beobachtet, da die Verbindung der Betonschalen wirksam blieb. Die Kernschicht könnte lediglich in diesen Fällen anhand der Abbildung 59 nach 120 min bei 14 cm dicken Tragschalen eine Temperatur von ca. 240°C erreichen. Das stimmt mit den Beobachtungen der Beschädigungsbilder der Verbindungsmittel aus den Versuchen M-P-176 und M-P-363 überein.

Anhand der Abbildung 59 kann der Wärmefluss über die beflamnte Schale in einer Sandwichwand ermittelt und mit den gemessenen Temperaturen in der Kernschicht verglichen werden. Vor allem die charakteristische Temperatur von 100°C (Siedepunkt des Wassers) kann ermittelt werden. Anhand der Simulationen wird bei der beflamnten Schale mit 7 cm Dicke die Temperatur von 100°C in der Kernschicht nach ca. 26 min erreicht. Die aufgenommene Temperatur in Versuch 2 zwischen Kernschicht und unbeflammter Betonschale (vergleich Abbildung 61 (links)) erreicht nach sehr schneller Anstiegszeit von 5 min das Niveau von 100°C bereits nach über 25 min. Da die Temperatur in der Kernschicht auf der unbeflammten Seite gemessen wurde, musste das Sieden des Wassers auf der beflamnten Seite schon früher angefangen haben. Der genaue Zeitpunkt des Beginns des Siedens stimmt mit den theoretischen Daten gut überein.

Anhand der Simulationen der beflamnten Schale mit der Dicke von 14 cm wird die Temperatur von 100°C in der Kernschicht nach ca. 74 min erreicht. Auch die aufgenommene Temperatur in den Versuchen 1 und 3 zwischen der Kernschicht und der unbeflammten Betonschale (vergleich Abbildung 61 (links)) wird das Niveau von 100°C bereits nach ca. 45 min erreicht. Da die beflamnten Vorsatzschalen gleiche Dicken besitzen, tritt der Siedepunkt fast gleichzeitig auf. Die geringfügige Verspätung im Versuch 3 wird durch die dickere Dämmschicht verursacht. Das bedeutet, dass das kochende freie Wasser früher anfängt zu verdampfen und in einem kurzen Zeitraum von ungefähr 10 min die gesamte Kernschicht durchdringt. Der Unterschied der theoretischen und der gemessenen Branddauer bis zum Erreichen der 100°C liegt an der schnelleren Penetration der beflamnten Schale durch den Wasserdampf. Bei dünneren Schalen (7 cm in Versuch 2) wurde das freie Wasser annähernd gleichzeitig im gesamten Querschnitt zum Kochen gebracht. Bei dickeren Querschnitten der beflamnten Schale (14 cm in Versuchen 1 und 3) konnte die Wassermenge im gesamten

Querschnitt der beflamten Schale schneller als simuliert zum Kochen gebracht werden, weil das Wasser aus der beflamten Seite den Querschnitt früher penetriert hat.

Der Wärmefluss über den Sandwichquerschnitt beeinflusst auch gravierend das Durchbiegungsverhalten. Die Erwärmung der unbeflammten Schale (überwiegend durch den Wasserdampf) findet nach den Versuchsergebnissen ab einer Branddauer von 45 min (in Versuchen 1 und 3) bzw. von 25 min (in Versuch 2) statt.

Die auf diese Weise erwärmte unbeflammte Schale (in Versuchen 1 und 3) dehnte sich thermisch aus, sodass diese Ausdehnung die Ausdehnung der beflamten Schale aufgeholt hat. Dies resultierte in einer Abminderung der thermischen horizontalen Durchbiegung. Dieser Prozess ist klar in Abbildung 60 widergespiegelt. Die horizontalen Verformungskurven der Versuche 1 und 3 gingen in eine Phase des langsameren Verformungsanstiegs nach 40 min über, dementsprechend nach der Erwärmung der unbeflammten Schale durch den Wasserdampf. Anders wurde im Versuch 2 die horizontale Durchbiegung größtenteils durch die thermische Erwärmung der unbeflammten Schale verursacht. Die Wand hat dementsprechend nach 25 min die Phase der intensiven Durchbiegung angetreten. Der Einfluss der Erwärmung der unbeflammten Schale bleibt aber leicht erkennbar. Bei der Erstellung von genaueren thermischen Modellen der Sandwichwand muss dieser Einfluss berücksichtigt werden, da der heiße Wasserdampf der wichtigste Wärmeträger in Sandwichwänden darstellt.

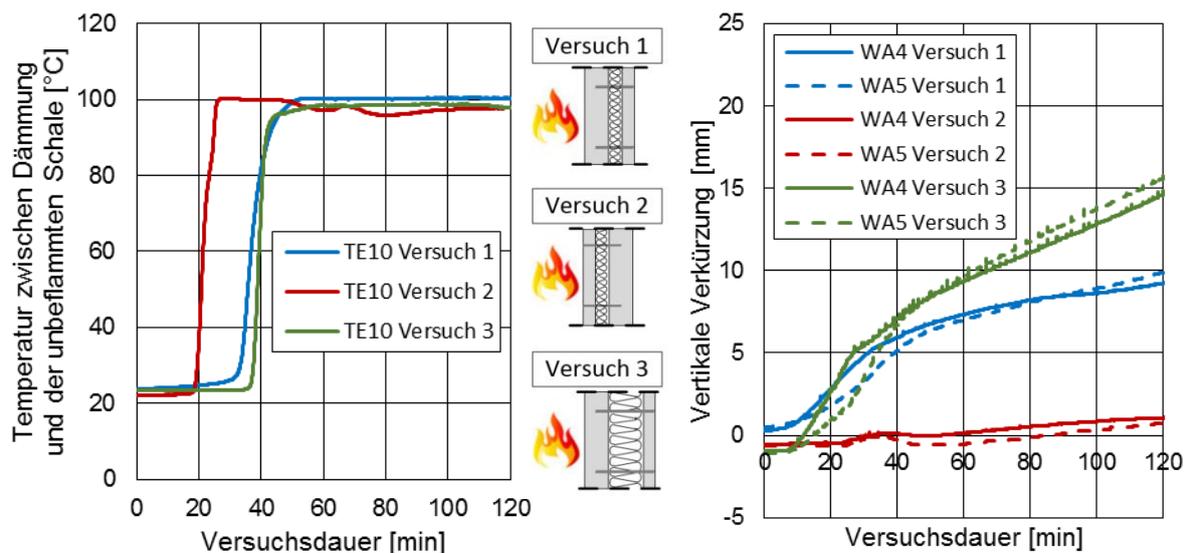


Abbildung 61: Ergebnisse der Großbrandversuche; Temperaturanstieg auf der unbeflammten Seite der Kernschicht (links); Vertikale Verformungen der Sandwichwände (rechts)

Die vertikalen Verformungen der Wände aus den Großbrandversuchen aus Abbildung 61 bestätigen die Erkenntnisse des numerischen Modells, nach welchem auch die dickere Dämmschicht im Brandfall zu einem größeren Temperaturgradienten führt. Die um ca. 5 mm (50 %) größere Ausdehnung der beflamten Tragschale in Versuch 3 als in Versuch 1 wurde durch die dickere Dämmschicht in Versuch 3 verursacht. Die 20 cm dicke Dämmschicht hat den Wärmeabfluss aus der Tragschale verhindert, was zu höheren Temperaturen und größeren Ausdehnungen der Wand führte. Die Tragschale in Versuch 2 wurde mit Hilfe der Dämmschicht und der Vorsatzschale thermisch gegen das Feuer geschützt. Das führte, wie auch in den numerischen Simulationen ermittelt, zu einer geringeren Erwärmung und Ausdehnung (2 mm) der geprüften Wand.

Das verwendete Modell zeigt an mehreren überprüften Stellen gute Übereinstimmung mit den experimentell erfassten Daten. Die Nachrechnung bestätigt, dass die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Kernschicht und dadurch die vorhandene Sandwichtragwirkung anhand der Temperatur in der Kernschicht im Brandfall ermittelt werden können. Um die Genauigkeit des numerischen Modells zu erhöhen sollen die genauen feuchtigkeitsgehaltabhängigen thermischen Eigenschaften der Materialien vertieft analysiert und in das Modell integriert werden. Außerdem soll der Einfluss der Erwärmung des Sandwichquerschnittes infolge Austritt der Wasserdampf genau abgebildet werden, um die genauere Temperaturgradient über den Wandquerschnitt zu erzeugen. Da in den durchgeführten Großbrandversuchen der Temperaturanstieg auf der unbeflammten Seite geringfügig blieb, wurde auf die genauere Analyse des Wärmeflusses in diesen Forschungsvorhaben verzichtet.

## 9. Vorschlag eines Klassifizierungskonzeptes

Die hohe Formbeständigkeit der Sandwichwände wurde in mehreren Arbeiten in der Literatur (siehe Kapitel 5.4) und im Rahmen dieses Forschungsprojektes bestätigt. Die Ergebnisse der sporadischen in der Literatur auffindbaren und kostenaufwendigen Brandversuche an Sandwichwänden sind üblicherweise auf die Erkenntnisse zu dem jeweiligen Wandsystem inklusive der verwendeten Materialien und Verbindungsmittel begrenzt. In diesem Kapitel wird trotzdem ein Versuch zur Erstellung eines allgemeingültigen Vorschlags eines Klassifizierungskonzeptes gemacht. Grundlage dafür sind die innerhalb dieses Forschungsvorhaben durchgeführten Brandversuche sowie weitere Angaben aus der vorhandenen Literatur. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Versuche an Kernschichtkomponenten hatten zum Ziel möglichst allgemeingültige Aussagen über das Verhalten der herkömmlichen Typen der Dämmung und Verbindungsmittel im Brandfall zu liefern. Die Analyse beinhaltete nicht nur das thermische Verhalten aller Schichten einer Sandwichwand, sondern auch deren temperaturabhängiges Schubtragverhalten.

Die Bewertung des Feuerwiderstands einer Sandwichwand anhand der Brandversuchsergebnisse soll nach den Kriterien aus der DIN EN 13501-2 [4] erfolgen. Der Feuerwiderstand des Bauteils wird auf Zeit geprüft. Nach dem Erreichen der angenommenen Zeit wird festgestellt, ob die Funktionen für eine vorher festgesetzte Zeitdauer erfüllt wurden. Die Funktionalitäten des Bauteils, das als Brandwand dienen soll, sind in vier Kategorien aufgeteilt:

- Tragfähigkeit (R)

Ob und wie lange die Tragfähigkeit einer Konstruktion im Brand erhalten bleibt, wird bei tragenden Bauteilen unter Brandbeanspruchung und unter Last geprüft. Das Bauteil darf ebenso nicht durch starke Deformationen gefährdet sein. Die Exzentrizität, die durch die Durchbiegung der einseitig dem Feuer ausgesetzten schlanken Wand hervorgerufen wird, darf nicht zum Einsturz der Wand führen. Deswegen wird die Tragfähigkeit des Bauteils nach erreichter Verformung und der Verformungsgeschwindigkeit bewertet. Sowohl der Lastabtrag über die gesamte Versuchsdauer, als auch die Einhaltung der Verformungskriterien ist Bedingung zur Erfüllung des Kriteriums „R“

In der üblichen statischen Praxis wird die Vorsatzschale bzw. Kernschicht rechnerisch nicht zum Lastabtrag hinzugezogen. Da sich dieser Beitrag sowohl positiv als auch negativ auf die Standsicherheit der Wand im Brandfall auswirken kann, soll deren Einfluss auf das Biegetragverhalten der Wände berücksichtigt werden.

Auf der einen Seite kann die effektive Verbindung der Betonschalen durch die Schubübertragung die gesamte Biegesteifigkeit der Wand erhöhen. Das Endergebnis wäre eine höhere Biegesteifigkeit der Sandwichwand unter normaler Belastung als auch unter Brandbelastung, die sich aus der Sandwichtragwirkung ergibt. Dadurch können höhere Lasten durch die Wand übertragen werden bzw. können Wände ihre Standfähigkeit im Brandfall beibehalten. Auf der anderen Seite können steife Verbindungen der Betondeckschichten zu einer größeren Durchbiegung der Wand im Brandfall führen. Der Unterschied zwischen stark ausgedehnter beflamelter Schale und nicht ausgedehnter unbeflammter Schale resultiert in einer Durchbiegung der Wand in Richtung der Beflammung, was auch in den Brandversuchen beobachtet wurde. Auch eine gewisse Reduzierung der aufgenommenen Verformungen infolge des Versagens der Verbindungsmittel und der nachfolgenden Entkopplung der Betonschalen wurde beobachtet. Die Auswirkung des Sandwicheffekts (positiv oder negativ auf die thermische Durchbiegung der Wand im Brandfall) hängt von der spezifischen Geometrie der Wand, den Dicken der Schichten und deren relativen Steifigkeiten ab. Des Weiteren lässt sich die Branddauer, ab welcher es zur Reduzierung der Kernschichteigenschaften kommt, mit der Dicke der beflamten Schale beeinflussen.

Die Verbindung der Betonschalen soll eine zuverlässige dauerhafte Verbindung der Schalen gewährleisten. Aber eine relativ steife Verbindung, vor allem im Vergleich zur Steifigkeit der brandbeanspruchten Betonschale, muss genauer in Betracht genommen werden, da dies zu einer größeren Durchbiegung und Schwächung der Schalen führen kann. Die formfesten Dämmmaterialien, die eine nennenswerte Schubübertragung liefern (wie EPS), wirken positiv in der ersten Phase der Brandentwicklung und bewirken eine Aussteifung bis sie ihren Erweichungspunkt erreichen. Somit können die intensiv wachsenden thermischen Verformungen graduell aufgenommen werden. In der letzten Phase des Brandes wird der mechanische Beitrag wegen des Schmelzens des EPS ausgeschlossen. Die plötzlich versagenden Verbindungsmittel und Dämmungen können nicht nur die Biegesteifigkeit einer Wand verringern, sondern auch durch die Entkopplung der Schalen zur plötzlichen Verringerung der thermischen Durchbiegung führen. Eine sehr steife Verbindung der Schalen kann aber auch zu sehr großen Durchbiegungen der Schalen führen. Aus diesem Grund sind nachgiebige Verbindungsmittel günstiger. Da die Relativverschiebungen im Brandfall im Allgemeinen kleiner (abhängig von der Geometrie) als die Versagensverformungen von direkt auf Schub beanspruchten Verbindungsmittel sind, leistet die Schubsteifigkeit der Verbindungsmittel einen maßgebenden Beitrag zur Tragfähigkeit einer Wand im Brandfall.

Wie in den Simulationen nachgewiesen wurde, wird die mittlere Temperatur in der beflamten Schale einer Sandwichwand größer als in einer einzelnen Betonwand mit gleicher Dicke. Dies wird durch den verhinderten Wärmeabfluss von der beflamten Schale durch die Dämmschicht verursacht. Dieser Unterschied wird größer mit lang andauernder Brandbelastung. Dadurch wird der Feuerwiderstand der beflamten Schale im Vergleich zu einer Betonwand ohne zusätzliche Schichten wegen der beschleunigten Erhitzung der Bewehrung und des Betons reduziert. Gleichzeitig wird aber die beflamte Schale mit der unbeflammten Schale ausgesteift. Die genaue Auswirkung dieses Einflusses auf den Feuerwiderstand einer Sandwichwand hängt im Weiteren von der Seite der Beflammung ab (Beflammung der Vorsatz- oder der Tragschale). Falls die Vorsatzschale dem Feuer ausgesetzt ist, wird die Tragschale effektiv thermisch isoliert. Der Feuerwiderstand der beflamten Schale lässt sich jedoch durch die Lage, des Bewehrungsgrads sowie durch die Schalendicke beeinflussen.

Die Durchbiegung einer Sandwichwand im Brandfall wird durch thermische Verwölbung der einzelnen Schalen sowie durch den Temperaturunterschied zwischen den Schalen verursacht. Dabei spielt die Biegung der beflamten Schale maßgebende Rolle. Bei Sandwichwänden mit steifen Tragschalen und im Verhältnis zur Tragschale weicheren Vorsatzschalen, spielt die Seite der Beflammung sowie die thermische Biegung der beflamten Schale eine entscheidende Rolle. Die Beflammung der steiferen Tragschale führt zur größeren Biegung der gesamten Wand als die Beflammung der weicheren Vorsatzschale.

- Raumabschluss (E)

Ein raumabschließendes Bauteil darf im Brandfall keine heißen Gase durchlassen. Diese Funktionalität der Sandwichwand kann vor allem durch Schwächungen der Schalen gefährdet werden. Besondere Aufmerksamkeit muss zur konstruktiven Ausführung der Fugen zwischen Sandwichwandtafeln gelegt werden. Besonders bei dünnen Schalen sollen die Fugen möglichst profiliert werden, damit zwei benachbarte Schalen wie Nut und Feder ineinandergreifen. Die dichte Verbindung muss auch bei den erheblichen thermischen Verformungen den Raumabschluss gewährleisten. In den Bereichen möglicher Öffnungen oder Türen muss der Eingriff von heißen Gase in die Kernschicht verhindert werden.

Wie es bei den durchgeführten Versuchen beobachtet wurde, können weitgehende Spannungsumlagerungen thermische Verformungen der Wand in den Sandwichwänden verursachen. Eine Kombination von steifen Verbindungsmitteln und relativ dazu dünneren Schalen, kann durch erhebliche Spannungskonzentrationen und thermische Zersetzung des Betons zum Versagen der Schalen führen. Dabei entsteht eine Gefahr des Wanddurchbruchs und der Feuerausbreitung.

- Wärmedämmung (I)

Im Allgemeinen leisten die Sandwichwände gute thermische Isolierung aufgrund deren geschichteten Aufbaus und der eingebauten Dämmschicht. Bei den Brandversuchen ist die kritische Temperaturerhöhung auf etwa 140°C über die Ausgangstemperatur festgelegt, wobei an einzelnen Stellen eine Überschreitung bis auf etwa 180°C gestattet wird.

In den durchgeführten Brandversuchen an Sandwichwänden hat der Temperaturanstieg 50-60% des zulässigen Werts von 140°C bzw. der maximale Temperaturanstieg nur 34-54% der zulässigen 160°C erreicht. Das bestätigt die Erkenntnisse aus der Literatur (Kapitel 5.4), dass die Sandwichwände eine erhöhte wärmedämmende Funktion besitzen. Das wurde für das nichtbrennbare Dämmmaterial Mineralwolle experimentell nachgewiesen. Bei den schwerentflammaren Materialien wie expandiertes (EPS) oder extrudiertes Polystyrol (XPS), weißt die Wand zuerst hervorragende dämmende Eigenschaften auf, bis der Schmelzpunkt des Dämmmaterials in der Kernschicht erreicht wird. Danach schmilzt der Dämmstoff, so dass eine lüftende Luftschicht zwischen den Schalen gebildet wird. Es kann behauptet werden, dass wegen intensiven Konvektion und Luftfluss in der Lücke ihre dämmenden Eigenschaften erheblich beeinträchtigt werden im Vergleich zu denen bei nichtbrennbaren, im Brand standfesten Materialien wie Mineralwolle. Der Einfluss des thermischen Verhaltens des Dämmstoffes auf die thermische Isolierung der Wand muss jedoch berücksichtigt werden.

Die wichtigste Erkenntnis bei der Wärmeübertragung von Versuchen ist die des Austritts des Wasserdampfes, der in der Literatur bisher nicht beschrieben war. Das bei 100°C in der beflamten Betonschale und der Kernschicht siedende Wasser penetriert in kurzer Zeit den

Gesamten Querschnitt der Kernschicht und führt zur vorzeitigen Erwärmung der unbeflammten Schale. Da der Wasserdampf in der ersten Phase der Brandbeanspruchung eine maßgebende Rolle bei der Erwärmung der unbeflammten Schale spielt, soll die Wasserdampfdurchlässigkeit sowie die thermische Empfindlichkeit des jeweiligen Dämmmaterials ermittelt werden. Auch wenn das Dämmmaterial auf die Temperatur von 100°C unempfindlich ist, kann seine dämmende Funktion in einer Sandwichwand temporär aufgehoben werden, wenn der Wasserdampf unbeschränkt den gesamten Querschnitt penetrieren kann. Die Dicke der Kernschicht spielt dabei eine untergeordnete Rolle. In der genaueren Simulationen der thermischen bzw. mechanischen Modellierung einer Sandwichwand unter Brandbeanspruchung soll dieser Einfluss unbedingt berücksichtigt werden.

- Mechanische Beanspruchung (M)

Widerstandsfähigkeit gegen Stoßbelastung kann ähnlich wie die Tragfähigkeit stark durch die mechanischen Eigenschaften der Kernschicht beeinflusst werden. Die Stoßbelastung kann auch durch den mehrschichtigen Wandaufbau abgetragen werden und die Anprallenergie kompensieren. Die beschriebene Erweichung einiger Dämmmaterialien (wie getestete EPS) oder die vorhandene Nachgiebigkeit (z.B. von der Mineralwolle) kann zu der Abtragung der dynamischen Belastung noch weiter beitragen. Im Weiteren, darf die Vorsatzschale im Brandfall nicht von der Tragschale abfallen.

Eine weitere Besonderheit im Fall von Sandwichwänden stellt der Versuchsaufbau dar. Die mit der Stoßbelastung beanspruchte Betonschale ist im Versuch die unbeflammte Schale, wobei die Gefahr von herabfallenden Tragwerksteilen meistens auf der Seite der Beflammung besteht. Allerdings wirkt der Stoß so ungünstig in Richtung der Verwölbung der Wand. Dadurch ist die effektive Verbindung der Schalen unter Stoßbelastung von großer Bedeutung. Die Verbindungsmittel bzw. Dämmung sollen nicht nur Schubübertragung gegen thermische Biegung gewährleisten, sondern auch unter Anprall nicht schlagartig brechen.

Außer den Kriterien zum thermischen und mechanischen Verhalten einer Sandwichwand im Brandfall müssen zusätzliche Anforderungen an die konstruktive Ausführung erfüllt werden. Die erforderlichen Vorkehrungen sind im Einzelfall zu treffen und im Brandschutznachweis darzustellen. Dies ist bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Nach Musterbauordnung [8] müssen z.B. über die Dachhaut hinaus geführt werden. Die schmelzenden, schwerentflammbaren oder entflammbaren Kernschichtkomponenten können mit nichtbrennbaren feuerfesten Dämmmaterialien zwischen den Betonschichten gekapselt werden.

### Klassifizierungskonzept

Zusammenfassend sind die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse für die Bewertung von Sandwichwänden im Brandfall in Abbildung 62 vorgestellt. Die Klassifizierung kann anhand eines entsprechenden Brandklassifizierungsversuchs eines Bauteils erfolgen, der in jedem Fall die endgültige Einstufung in die Brandschutzklasse ermöglicht. In diesem Forschungsvorhaben wurden Methoden erarbeitet, die zur Bewertung einer Sandwichwand im Brandfall beitragen. Die temperaturabhängigen Kerschichteigenschaften können zur Abschätzung der branddauerabhängigen Sandwichtragwirkung in die Heißbemessung einfließen. Somit können das Verformungsverhalten und der Wärmeübertrag im Brandfall auf andere, nicht experimentell untersuchten Wände ermittelt werden. Mit dem vorgestellten Flussdiagramm lässt sich der experimentelle sowie rechnerische Bewertung einer Sandwichwand erläutern.

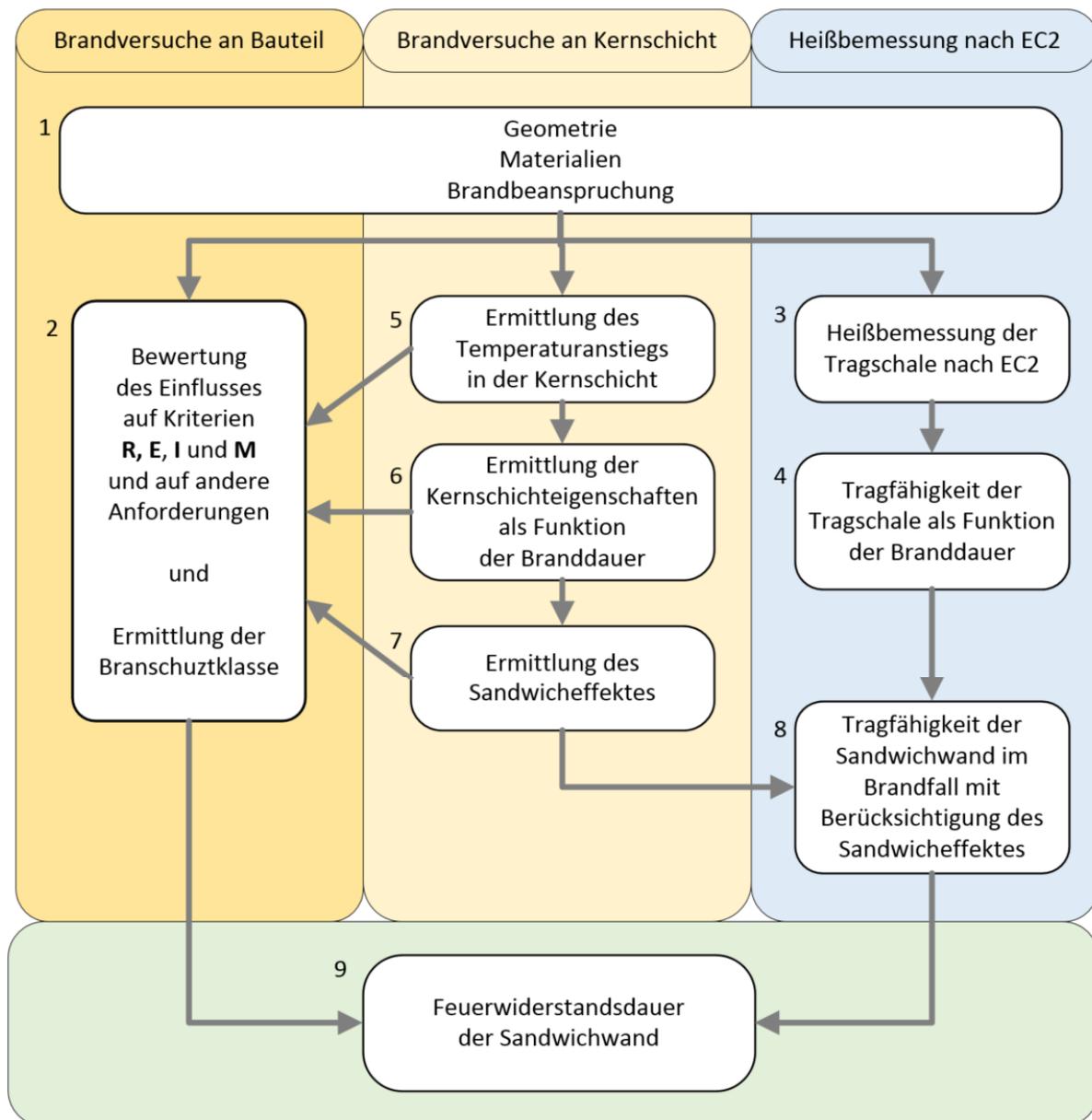


Abbildung 62: Bewertungskonzept für Sandwichwände

Am Anfang der Betrachtung (1) sollen die Eigenschaften der Sandwichwand identifiziert werden. Ihre Geometrie, verwendete Materialien und angenommene Brandbeanspruchung (z.B. Innen- oder Außenbrandkurve) bilden wichtige Faktoren bei der Bewertung des Feuerwiderstands. Auch die Seite der Beflammung beeinflusst gravierend das erwartete Verhalten einer Sandwichwand im Brandfall.

Der Feuerwiderstand kann nun mit entsprechenden Großbrandversuchen an Bauteilen (2) ermittelt werden. Dabei müssen die Besonderheiten des Verformungs- und Tragverhaltens der Sandwichkonstruktionen beachtet werden.

Die Tragfähigkeit der tragenden Betonschale kann nach Eurocode 2 bemessen werden. Dabei wird die Temperatur im Bauteil bzw. Temperatur der Bewehrung während des Brandes (3) ermittelt. Bei der Ermittlung der Temperatur über den Sandwandquerschnitt sollen zusätzlich die unbeflammten Schichten in Betracht genommen werden, da sie den Wärmefluss verhindern. Somit kann mit dem üblichen Verfahren nach Eurocode 2 die Tragfähigkeit der Tragschale in der Funktion der Branddauer (4) berechnet werden.

Bei Sandwichwänden hat aber das Brandverhalten der Kernschicht bedeutenden Einfluss auf das Verhalten des Bauteils im Brandfall. Kenntnisse über das Schubtragverhalten der Kernschicht kann sowohl rechnerisch in der Heißbemessung als auch bei der Interpretation der Großbrandversuche verwendet werden. Die temperaturabhängigen Eigenschaften der Kernschicht sollen mit entsprechenden Versuchen (wie z.B. die in diesem Bericht beschriebenen Versuche) untersucht werden. Alternativ können Erkenntnisse aus vorhandener Literatur entnommen werden.

Um die Schubtragwirkung der Kernschicht im Brandfall zu berücksichtigen, soll die Temperatur in der Kernschicht (5) analog zu der Ermittlung der Temperatur in der Bewehrung erfolgen. Sie kann im Brandversuch gemessen oder mit einer numerischen Simulation ermittelt werden. Dabei hat die Dicke der beflamten Schale den größten Einfluss auf den Temperaturanstieg in der Kernschicht. Anhand der ermittelten Temperaturen können der Zustand und thermische sowie mechanische Eigenschaften der Kernschicht (6) identifiziert werden.

Im weiteren Schritt kann der Grad der Sandwichtragwirkung (7) anhand der Kernschichtkennwerte in der Funktion der Branddauer ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der beschriebenen temperaturabhängigen Eigenschaften der jeweiligen Schichten in der statischen Berechnung kann in Abhängigkeit der Branddauer und Sandwichtragwirkung die Biegesteifigkeit bzw. die Tragfähigkeit (Kriterium R) der Sandwichwand (8) ermittelt werden. Mit den mechanischen Eigenschaften der Kernschicht kann die Sandwichtragwirkung beschrieben werden.

Das Verhalten der Kernschichtkomponenten kann aber vielseitige Auswirkungen auf die Funktionalitäten der Betonschalen und des gesamten Bauteils ausüben. Die Auswirkung des Kernschichtbrandverhaltens auf andere Funktionalitäten des Bauteiles (2) soll analysiert werden. Die vorher in diesem Kapitel beschriebenen Kriterien zum Bewertung des Feuerwiderstandes (Kriterien E, I und M) sollen kritisch analysiert werden. Außer der effektiven Schubtragwirkung der Kernschicht sollen andere Funktionalitäten wie Rauchentwicklung, brennendes Abtropfen, Perforierung der Betonschale mit Verbindungsmitteln, Beanspruchungen in den Betonschichten, Standfestigkeit im Fall der Stoßbelastung usw. kritisch betrachtet werden.

Die grundsätzlichen Kenntnisse über das Verhalten der Kernschichtkomponenten im Brandfall erlauben einen realitätsnahen Tragfähigkeitsnachweis in der Heißbemessung zu führen und die Ergebnisse der Großbrandversuche mit höherer Sicherheit auf Bauteile analoger Konstruktionen zu übertragen. Anschließend kann das endgültige Ergebnis (9) der Feuerwiderstand einer Sandwichwand ermittelt werden. Dabei müssen die Ergebnisse der durchgeführten theoretischen Betrachtungen die Beobachtungen von der Großbrandversuche bestätigen.

## **10. Zusammenfassung**

Das Forschungsvorhaben „Sandwichtragwirkung von kerngedämmten Fertigteilwandtafeln unter Brandbeanspruchung“ wurde aufgrund des Interesses der Bauindustrie an der potenziellen Nutzung von Sandwichwänden als Brandwände veranlasst. Als Ergebnis dieser Versuche konnte bei beflamten Sandwichwänden eine deutliche Abhängigkeit des Biegetragverhaltens von der thermischen Beanspruchung der Kernschicht festgestellt werden.

Obwohl bereits in der Literatur von einem hohen Feuerwiderstand der Sandwichwände berichtet wurde, existieren keine Kriterien für die Ausbildung des Wandbauteils, welche die Einstufung dieses mehrschichtigen Betonbauteils als Brandwand ermöglichen. Dabei können die Anzahl der möglichen Ausführungen und das Brandverhalten der verwendeten Materialien Schwierigkeiten bereiten. Die Erfüllung der Kriterien von Brandwänden bleibt aufgrund der immer dichter werdenden Bebauung und möglichem Anbau an bestehende Gebäude von großem Interesse. Somit ist für das Wandelement der Einfluss einer erhöhten Temperatur auf das Tragverhalten des mehrschichtigen Bauteils zu erforschen, damit diese bei der Heißbemessung berücksichtigt werden kann. Die Sandwichwände bieten aufgrund ihres dreischichtigen Aufbaus eine Möglichkeit der Schalendickenreduzierung bei gleich hohem erhaltendem Feuerwiderstand. Dies wäre durch den Einsatz von filigranen Sandwichelementen (Reduzierten Tragschalendicke von ca. 10 cm) als Brandwand möglich. Die Berücksichtigung des wirklichkeitsnahen Tragverhaltens – der Sandwichtragwirkung – könnte dies ermöglichen. Die wissenschaftliche Erklärung und der mechanische Hintergrund des Tragverhaltens einer Sandwichwand im Brandfall und deren Feuerwiderstand wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht. Hierzu wurden theoretische sowie praktische Untersuchungen durchgeführt.

Die Einsetzbarkeit der Sandwichwände als Brandwände wurde in großformatigen Klassifizierungsversuchen unter Brandbelastung, einer ausmittigen Auflast sowie einer anschließenden Anstoßbelastung geprüft. Dabei waren die untersuchten Einflussparameter die Seite der Beflammung sowie die Kernschichtdicke. Die Feuerwiderstandsklasse REI120-M wurde in allen Versuchen bestätigt. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass das Tragverhalten einer Sandwichwand unter Brandbelastung stark durch den temperaturabhängigen Beitrag der Kernschicht beeinflusst wird. Der vorhandene Sandwicheffekt im Brandfall war auch bei relativ weicher Dämmung und GFK-Verbindungsmitel vorhanden. Bei der Analyse des thermischen Verhaltens wurde erkannt, dass die Penetration des Wandquerschnitts mit heißem Wasserdampf einen maßgebenden Einfluss auf die Wärmeübertragung im Brandfall besitzt. Weder die Dämmung noch die Verbindungsmitel haben zu einer Feuerausbreitung oder übermäßiger Wärmeübertragung geführt. Die beobachtete Wärmebrücke infolge der vorhandenen GFK-Verbindungsmitel in den Großversuchen führte zu einem geringen Temperaturanstieg auf der unbeflammten Seite im Vergleich zum Rest der Wand. Außerdem wurde kein Abfallen oder Abtropfen der Materialien außerhalb der Kernschicht beobachtet. Die aufgehängte Vorsatzschale hat sich in keinem Fall von der Tragschale unkontrolliert abgelöst.

Um die Schubtrageigenschaften der Kernschicht in Abhängigkeit der im Brandfall steigenden Temperatur zu bestimmen, wurde eine Brandversuchsreihe an Sandwichwandquerschnitten durchgeführt. Zwei herkömmliche Dämmstoffe, allein und in Kombination mit zwei Arten von Verbindungsmittel, wurden unter festgelegten erhöhten Prüftemperaturen getestet.

Die experimentell ermittelten Eigenschaften der Kernschichtkomponenten haben Aussagen zu deren realitätsnahem Brandverhalten in einer Sandwichwandausführung geliefert. Im Allgemeinen zeigten die Kernschichten gute mechanische Eigenschaften, bis eine spezifische Zerlegungstemperatur erreicht wurde, bei der diese Eigenschaften verloren gehen. Mit den Ergebnissen kann man feststellen, dass die getesteten nichtbrennbaren (Mineralwolle) und schwerentflammaren (EPS) Dämmmaterialien sich gut für die Herstellung von feuerbeständigen Sandwichwänden eignen, obwohl sie unterschiedliches Schubverhalten bei steigender Temperatur aufweisen. Die Mineralwolle kann ihre thermisch dämmende Funktion auch im Brandfall behalten, auch wenn nur ein geringer Beitrag zur Biegesteifigkeit der Wand erreicht wird. Der EPS-Dämmstoff zeigt einen hohen Beitrag zur Schubsteifigkeit der Kernschicht, der aber schon bei relativ geringer Temperatur abgemindert und nachfolgend komplett verloren geht. Das Brandverhalten der Kernschichtkomponenten hat in keinem Versuch die Funktionalität der Betonschalen beeinträchtigt. Es wurde beobachtet, dass die formfesten Dämmstoffe (wie die getestete EPS) eine bedeutende stabilisierende Wirkung auf die Verbindungsmittel aufwiesen und ihren Verbund zum Beton bei gering erhöhten Temperaturen verbessern können. Es wurden auch weder Rauchentwicklungen noch ein Beitrag zur Feuerausbreitung beobachtet, obwohl in diesem Versuchsaufbau die Zufuhr von Sauerstoff nicht verhindert wurde.

Die getesteten GFK-Verbindungsmittel zeigten eine geringe Empfindlichkeit auf das Schubtragverhalten bis Temperaturen nahe des Schmelzpunktes vom Harz. In ihrer Versagensart wurde aber ein Wechsel beobachtet, wobei die Stäbe schon bei gering erhöhten Temperaturen mehrere Risse im beflamten Bereich bildeten anstatt bevorzugt ein großer Riss über die gesamte Länge. Die getesteten Flachanker zeigten keine Empfindlichkeit auf die erhöhten Temperaturen. Das Erreichen deren Erweichungstemperatur war in dem angewendeten Versuchsaufbau nicht möglich, da bei Versuchen ab 512°C die 7 cm dicke Betonschale zuerst versagt hat. Es wurde festgestellt, dass die lange Branddauer in Kombination mit dünnen Betonschalen und steifen Verbindungsmittel in Spannungskonzentration und in Versagen der beflamten Betonschale resultieren können. Das erzeugte Versagen wurde aber durch den Versuchsaufbau bedingt, da Großversuche an Sandwichwänden gezeigt haben, dass die tatsächlich auftretenden Relativverschiebungen der Betonschalen sich in einer deutlich geringeren Größenordnung befinden.

Um die ermittelten Schubeigenschaften der Kernschicht mit dem Tragverhalten der Sandwichwände von Großversuchen zu verbinden, wurde in Anhängigkeit der Betonschalendicke und Branddauer eine numerische Analyse der in der Kernschicht entstehenden Temperaturen durchgeführt. Im Fall von Sandwichquerschnitten, vor allem bei feuerbeständigen Dämmstoffen, werden deutlich höhere Temperaturen in der beflamten Schale erreicht als für einzelne Betonwände mit gleicher Dicke. Die Verknüpfung der Ergebnisse der durchgeführten Brandversuchsreihen hat eine gute Übereinstimmung gezeigt. Die rechnerisch und experimentell ermittelten Temperaturen des Wasserdampfaustritts sowie der thermischen Zerlegung der GFK-Verbindungsmittel zeigten ebenfalls gute Übereinstimmungen.

Anschließend wurden die gesammelten Erkenntnisse in einem Vorschlag für ein Klassifizierungskonzept zusammengefasst. Die Besonderheiten der Sandwichkonstruktionen, die bei der Bewertung der Brandversuche berücksichtigt werden sollen, wurden besprochen. Anhand des Konzepts könnte die Feuerwiderstandsdauer mithilfe von dem Brandversuch und der Bemessung der Tragfähigkeit im Brandfall prognostiziert werden.

## **11. Empfehlungen für die Praxis und Ausblick**

Angaben zur Klassifizierung des Feuerwiderstands von Sandwichwänden bezüglich des baulichen Brandschutzes lassen sich in aktuellen Regelwerken nicht finden. Trotz des potenziell hohen Feuerwiderstands von Sandwichwänden, aufgrund ihres mehrschichtigen Aufbaus und der guten thermischen Eigenschaften, wird der Einsatz als Brandwand nicht gestattet. Eine Erkennung ihres Brandverhaltens sowie Empfehlungen für deren Feuerwiderstandsermittlung sind jedoch nur mit einem wissenschaftlich begründeten Versuchsprogramm möglich, welches sich auf die verschiedenen herkömmlichen Ausführungen der Sandwichwände richtet und dem bauaufsichtlich geforderten Sicherheitsniveau entspricht. Ein fehlendes Klassifizierungskonzept für Sandwichwände soll nicht deren Einsatz als Brandwände, z.B. bei denkbarem Anbau an bestehende Gebäude oder Wechsel der Gebäudenutzung sowie den wirtschaftlichen Gewinn verhindern.

Durch den im Forschungsprojekt gewonnenen Kenntnisstand ist es für die getesteten Randbedingungen möglich den Feuerwiderstand einer Sandwichwand in Abhängigkeit des verschiedenen Aufbaus und der Materialien der Kernschicht abzuschätzen. Um das Klassifizierungskonzept auf beliebige Randbedingungen zu erweitern, bedarf es jedoch noch weiterer intensiver Untersuchungen.

Die Großbrandversuche haben die Tauglichkeit der Sandwichwände mit GFK-Verbindungsmiteln als Brandwände bestätigt. Die Untersuchungen zum Schubtragverhalten von Kernschichtquerschnitten in Kleinbrandversuchen lieferten Informationen zu ihrem Schubtragverhalten in Abhängigkeit der im Brand steigenden Temperatur in der Sandwichwand. Die so ermittelten temperaturabhängigen Eigenschaften können durch die erreichten Temperaturen in der Kernschicht in das Brandverhalten der Wand integriert werden. Die Schubübertragung bei steigender Temperatur, der thermische Zersetzungspunkt sowie die Wärmeübertragung und die Wasserdampfdurchlässigkeit haben sich als maßgebende Parameter herausgestellt.

Je nach Variation der Kernschichtkomponenten ändert sich die Branddauer, ab welcher das mechanische Biegeverhalten einer Sandwichwand und deren Widerstand gegen eine Anstoßbelastung durch die charakteristischen temperaturabhängigen Eigenschaften der Kernschicht beeinflusst werden. Bei porösen und wasserdampfdurchlässigen Dämmmaterialien kann es auch bei großen Dicken der Wand zu einer schnellen Erwärmung der unbeflammten Schale kommen. Die schubtragenden Dämmmaterialien können ab einer bestimmten Branddauer erweichen und verlieren nach einer möglichen Phase der erhöhten Nachgiebigkeit ihre Schubtragfähigkeit durch die thermische Zersetzung.

Somit kann der mechanische und thermische Beitrag der Kernschicht und der unbeflammten Schale zum Brandverhalten der Sandwichwände im Brandfall prognostiziert werden. Im Weiteren stellen die Informationen über die Komponenten der Kernschicht eine wesentliche Grundlage dar, um realitätsnahe Aussagen über den Feuerwiderstand des Bauteils treffen zu können. Deswegen würde eine Bereitstellung dieser Informationen von der Seite des Herstellers den Einsatz und die Klassifizierung von Sandwichwänden deutlich vereinfachen.

Anhand der analysierten Versuchsergebnisse soll die Verbindung der beiden Betondeckschichten im Brandfall dauerhaft sein, so dass sie während der Branddauer nicht versagt und die Schalen zusammenhängend bleiben. Das Zusammenwirken der Schalen gewährleistet eine zusätzliche Biegesteifigkeit der Sandwichwand, jedoch können gleichzeitig durch die Vergrößerung des Trägheitsmomentes der Wand größere Spannungen auftreten. Wie in den Großbrandversuchen beobachtet wurde, kann eine steife Verbindung der Schichten zu einer größeren Durchbiegung der Wand im Brandfall führen. Die zu steifen Verbindungsmittel in Kombination mit zu dünnen Betonschalen (<10 cm) können übermäßige Spannungskonzentrationen in den Betonschalen verursachen. Optimal ergibt sich ein Verbindungsmittelsystem, das in kaltem Zustand steif und dauerhaft ist, im Brandfall aber nach Erreichen seiner gewissen Zerlegungstemperatur nicht schlagartig versagt und eine gewisse Schubübertragung auch nach dem eigentlichen Schubversagen behält. Dies soll die Wand gegen Abfall der Vorsatzschale und Anstoßbelastungen schützen.

In weiterführender Forschungsarbeit wäre es sinnvoll weitere Untersuchungen durchzuführen, um ein Modell zur genauen Beschreibung des Wärmeflusses in Sandwichwänden unter Berücksichtigung des Feuchtetransports zu entwickeln. Das Modell sollte um die genauen temperaturabhängigen Eigenschaften der Sandwichwände erweitert werden. Dabei soll die Wärmeübertragung durch Penetration mit heißem Wasserdampf abgebildet werden. Des Weiteren sollten die charakteristischen Temperaturen für weitere Dämmmaterialien untersucht werden. Auch im Falle von steiferen Verbindungsmitteln soll der Einfluss des Rasters auf das Verhalten der Betonschalen untersucht werden. Für einen umfangreicheren Erkenntnisstand über den Feuerwiderstand der Sandwichwände soll das Brandverhalten der Anstoßfugen und die Verbindung auf die tragende Konstruktion erforscht werden. Die weitere konstruktive sowie thermische Verwendung der Sandwichwände nach der Exposition zum Feuer ist auch von großer Bedeutung für die Praxis. Der Einsatz als Brandwand ist nicht nur vom Feuerwiderstand der Sandwichwand abhängig, sondern erfordert auch die Berücksichtigung der spezifischen erforderlichen konstruktiven Regeln (Überführungen über das Dach hinaus usw.) für Brandwände, die bereits in der Phase der Bauteilplanung vorzunehmen ist.

## 12. Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 4102-1: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen-Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.1998.
- [2] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 4102-2: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen-Teil 2: Bauteile Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 09.1997.
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 13501-1: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten-Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2010.
- [4] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 13501-2: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten-Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2016.
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik: *Bauregelliste - Ausgabe 2015/2*, 06.10.2015.
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik: *Aufhebung der Bauregellisten A und B und Liste C (Ausgabe 2015/2 mit Änderungen 2016/1 und 2016/29)*.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) Ausgabe August 2017 mit Druckfehlerkorrektur vom 11. Dezember 2017*, Berlin.
- [8] Bauministerium: *Musterbauordnung. MBO*, 2016.
- [9] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1363-2: *Feuerwiderstandsprüfungen-Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 10.1999.
- [10] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz: *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau*. MIndBauRL, Juli 2014.
- [11] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz: *Musterbauordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung - MVKVO)*, Juli 2014.
- [12] ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht: *Musterbauordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV)*, Juni 2005.
- [13] Klingsohr, K.: *Vorbeugender baulicher Brandschutz*, Stuttgart, Stuttgart, Kohlhammer; Deutscher Gemeindeverlag, 1986. 3-17-009212-X.
- [14] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 4102-4: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2016.
- [15] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1992-1-2: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2010.
- [16] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1363-1: *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1:2012*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 10.2012.
- [17] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV), VdS 2234:2012-07 (06): *Brand- und Komplextrennwände*, Köln, VdS Schadenverhütung GmbH, 07-2012.

- 
- [18] Bub, H.; Seekamp, H.: Neue Erkenntnisse aus der Bauforschung - Baulicher Brandschutz -Bauteile, in: *Bau-Trichter*, 1968, Sonderheft.
- [19] Syspro-Gruppe Betonbauteile e.V.: *Betonfassaden im Thermowand-System*, Eigenverlag der Syspro-Gruppe, Gera, 2010.
- [20] Wierig, H. J.: Das Verhalten von Betonwaren und Stahlbetonfertigteilen im Feuer, in: *Betonsteinsetzung vol. XX*, 1963, H. 8, 9 und 10.
- [21] Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V.: *Brandschutztechnische Vorkehrungen für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) nach DIN 18516-1*. VHF Brandschutz, 10.03.2016.
- [22] Bauministerium: *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern*. MHR, 18.04.2008, geändert im 02.2012.
- [23] Schmitt, A.; Pahn, M.: Investigation on Flexural Stressed Sandwich Panels with GFRP-reinforcement, *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. CICE 2014. Image Printing at the University of Calgary, Canada, 2014, S. 164-169.
- [24] Haffke, M. M.; Pahn, M.: Flexural Behaviour of Thin GFRP-reinforced Concrete Slabs with Reduced Concrete Cover as a part of pre-cast Sandwich Panels, in: Guadagnini, M.; Keighley, S. (Hg.), *Proceedings of the 8th Binnial Conference on Advanced Composites in Construction*. ACIC 2017, Sheffield, 2017, S. 267–272.
- [25] Stamm, K., Witte, H., in: Sattler, K. Stein, P. (Hg.), *Ingenieurbauten 3*, Theorie und Praxis. Springer Verlag, Wien, New York, 1974.
- [26] Deutsches Institut für Bautechnik: *solidian Sandwichwand*. Zulassungsbescheid Z-71.3-39, 05.2017.
- [27] Hulin, T.; Hodicky, K.; Schmidt, J. W.; Stang, H.: Experimental investigation of sandwich panels using high performance concrete thin plates exposed to fire, in: *Materials and Structures vol. 49*, 2016, S. 3879–3891.
- [28] Mettke, A.; Heyn, S.: *Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen)*, Cottbus, 02.11.2010.
- [29] Einea, A.; Salmon, D. C.; Fogarasi, G. J.; Culp, T. D.; Tadros, M. K.: State-of-the-Art of Precast Concrete Sandwich Panels, in: *PCI Journal*, 1991, November-December, S. 78–98.
- [30] Schmied, J.; Ruff, D. C.; Ummenhofer, T.: Sandwichelemente unter Brandeinwirkung. Eine Bestandsaufnahme, in: *Stahlbau vol. 84*, 2015, H. 11, S. 862–865.
- [31] MPA Braunschweig: *Gutachtliche Stellungnahme der MPA Braunschweig zur brandschutztechnischen Bewertung von Betonsandwichtafeln als Brandwände im Sinne von DIN 4102-3:1977-09*, Materialprüfamt für das Bauwesen, 04.2000.
- [32] Kahmer, H.: Betonfassadenelement bleibt nach Hochhausbrand intakt, in: *Bauplaner*, 2017, H. 5, S. 12–13.
- [33] Hulin, T.; Hodicky, K.; Schmidt, J. W.; Stang, H.: Sandwich panels with high performance concrete thin plates at elevated temperatures: numerical studies, in: *Materials and Structures vol. 49*, 2016, S. 3177–3193.
- [34] Schmitt, A.; Carvelli, V.; Pahn, M.: Thermo-mechanical Loading of GFRP reinforced Thin Concrete Panels, in: *Composites Part B: Engineering vol. 81*, 2015, S. 35–43.
- [35] Stamm, K., Witte, H.: Aufstellung einer allgemeinen Plattentheorie für Sandwichplatten, in: *HOERSCH-Berichte aus Forschung und Entwicklung*, 1969, H. 4, S. 122–136.

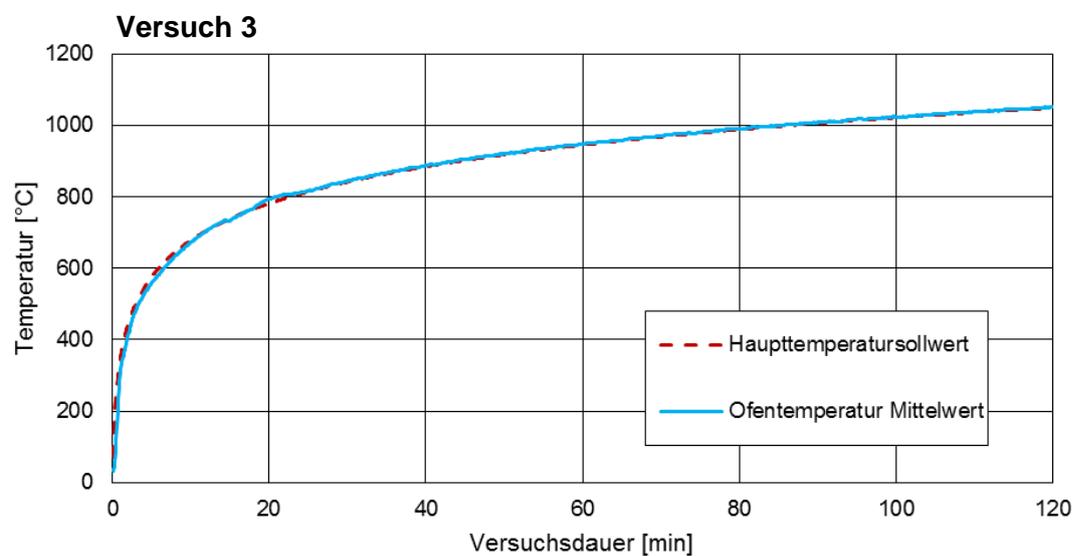
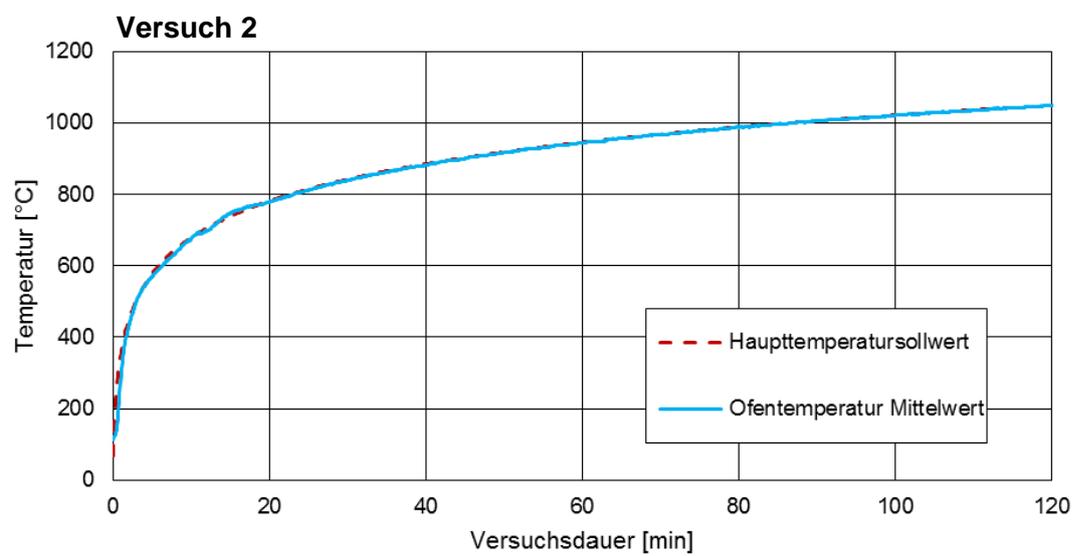
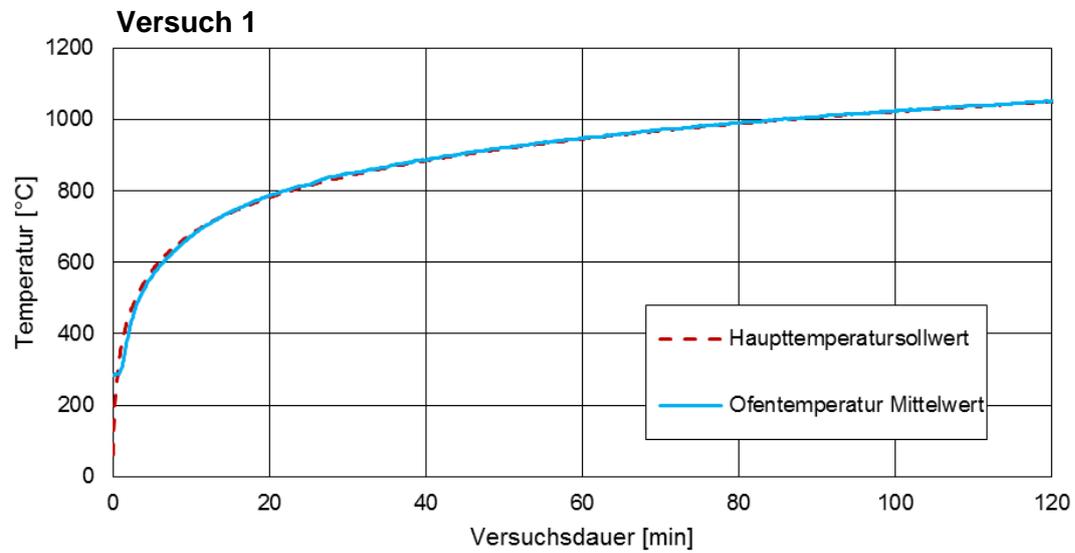
- [36] Schmitt, A.; Carvelli, V.; Haffke, M. M.; Pahn, M.: Thermo-mechanical response of concrete sandwich panels reinforced with glass fiber reinforced polymer bars, in: *Structural Concrete vol. 19*, 2018, H. 3, S. 839-850.
- [37] Mueller, K.; Kurama, Y. C.: Out-of-Plane Behavior of Reinforced Concrete Bearing Walls after One-Sided Fire, in: *ACI Structural Journal*, 2017, January-February, S. 149–160.
- [38] Meyer-Ottens, C.; Steinert, J.: *Berichte aus der Bauforschung 61: Brandwände, Brand- und Stoßverhalten*, Ernst & Sohn, 1969.
- [39] Meyer-Ottens, C.: *Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen*, 1975.
- [40] FIB bulletin 74: *Planning and design handbook on precast building structures*, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2014.
- [41] Precast/Prestressed Concrete Institute: *PCI Design Handbook/Seventh Edition*, Chicago, USA, 2010.
- [42] Pahn, M.: *Beitrag zur Ermittlung von Schnitt- und Verformungsgrößen bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2011.
- [43] FIB bulletin 84: *Precast insulated sandwich panels*, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2017.
- [44] Deutsches Institut für Bautechnik, Z-33.4-1571: *Mineralwolle-Platten MW Wolle 035 (Dämmstoffdicke bis 200 mm)*, 2016.
- [45] Deutsches Institut für Bautechnik, Z-21.8-1894: *Schöck Thermoanker®*, 2016.
- [46] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1365-1: *Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 1: Wände*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2013.
- [47] Rosa, J. C.; Firmo, J. P.; Correia, J. R.; Mazzuca, P.: Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of GFRP bars to concrete - pull-out tests, in: IABSE (Hg.), *Report of the IABSE Symposium Guimarães 2019 - Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management*, Guimaraes, Portugal, Zurich, 2019, S. 861–868.
- [48] Carvelli, V.; Pisani, M. A.; Poggi, C.: High temperature effects on concrete members reinforced with GFRP rebars, in: *Composites Part B: Engineering vol. 54*, 2013, H. 1, S. 125–132.
- [49] Mouritz, A. P.; Gibson, A. G.: *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, Dordrecht, 2006.
- [50] Rosa, I. C.; Firmo, J. P.; Correia, J. R.; Barros, J. O.: Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature - Definition of bond vs. slip relations, in: *Composites Part B: Engineering*, 2018, (accepted for publication).
- [51] Schmitt, A.; Carvelli, V.; Pahn, M.: Temperature effects on GFRP reinforced thin concrete panels, in: Ilki, A.; Motavalli, M.; Inci, P. & Köhli, M. (Hg.), *Proceedings of SMAR 2015 the Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*. SMAR 2015, Antalya, Turkey, 2015.
- [52] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 12090: *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmungen des Verhaltens bei Scherbeanspruchung*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.2013.
- [53] Knauf Insulation GmbH: *Produktdatenblatt Knauf Insulation Dachboden-Dämmplatte TPD-L*, 07.2016.

- [54] JOMA Dämmstoffwerk GmbH: *Leistungserklärung Nr. LE-DE-13.1-WDV-035 k/kd*, 01.06.2012.
- [55] JOMA Dämmstoffwerk GmbH: *Leistungserklärung Nr. LE-DE-16.1-WDV-035 k/kd*, Holzgünz, 30.09.2016.
- [56] Deutsches Institut für Bautechnik, Z-21.8-2013: *PHILIPP Sandwichanker MA und FA*, 2014.
- [57] Deutsches Institut für Bautechnik, Z-21.8-1894: *Schöck Isolink® für mehrschichtige Betontafeln*, 10.2018.
- [58] PHILIPP GmbH: *PHILIPP Sandwichplattenankersystem MA/FA*, Anschaffenburg, 09/2014.
- [59] Schöck Bauteile GmbH: *Technische Information Schöck Isolink® für mehrschichtige Betontafeln*, 11.2018.
- [60] Schöck Bauteile GmbH: *Technical Information Schöck Combar®*, 12.2015.
- [61] Deutsches Institut für Bautechnik, ETAG Nr. 001/1: *Metalldübel zur Verankerung im Beton. Teile 1 bis 3, Anhang A bis C*, Berlin, 25.02.2008.



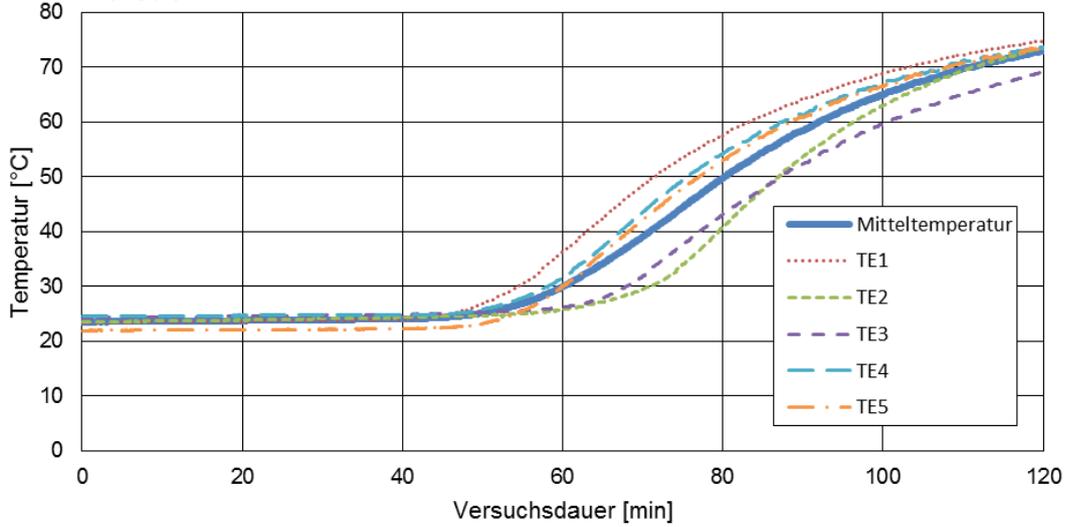
## Anhang A: Großbrandversuche an Sandwichwänden

### 1. Temperatur im Brandraum

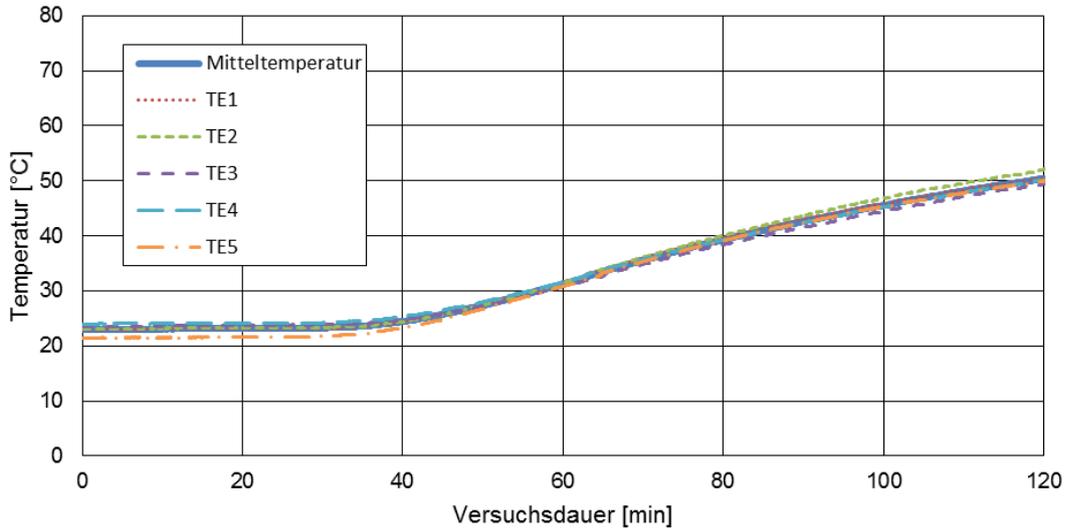


## 2. Temperatur an der unbeflammten Seite – mittlere Temperatur

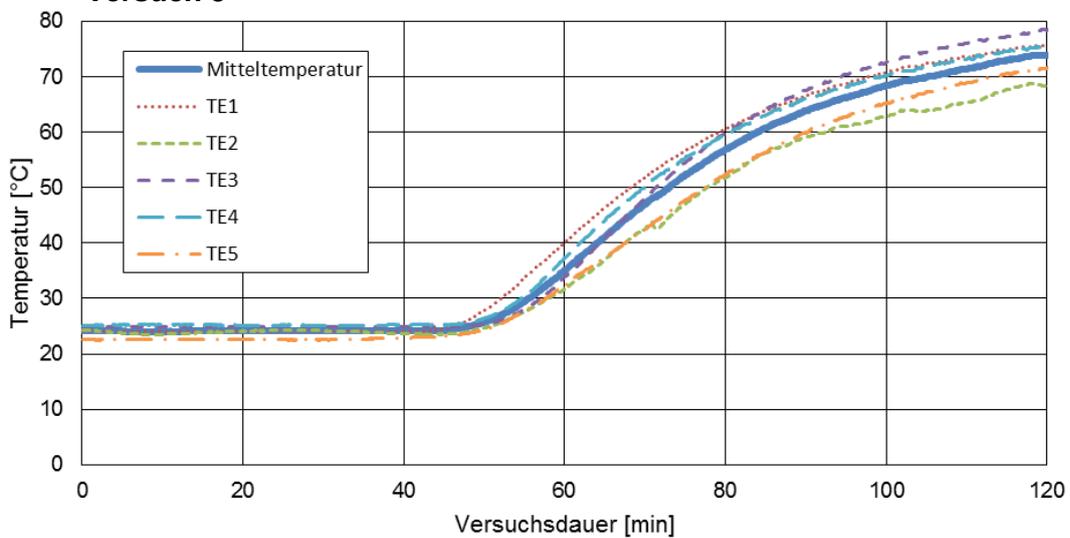
### Versuch 1



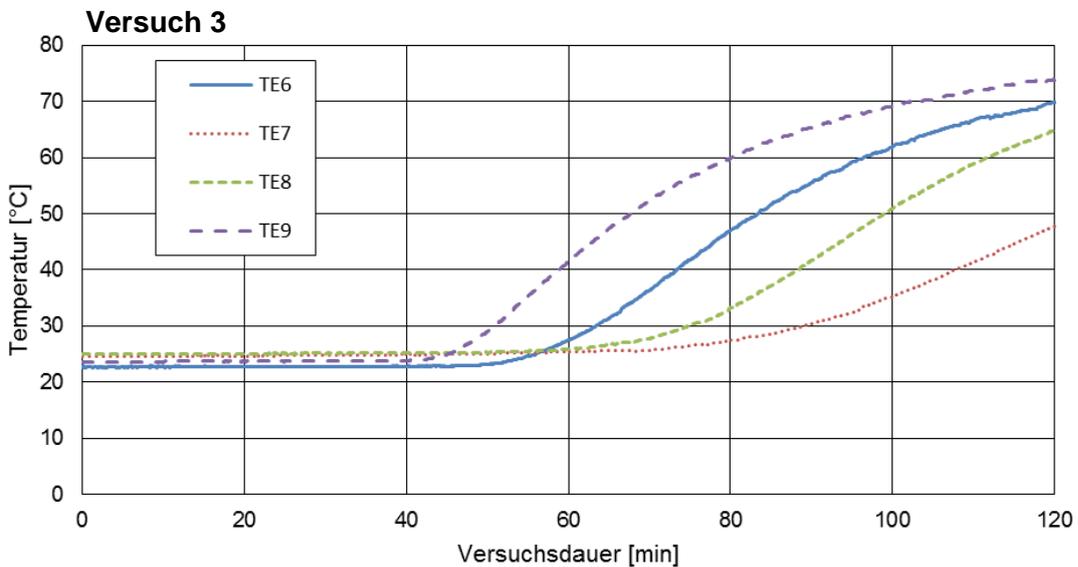
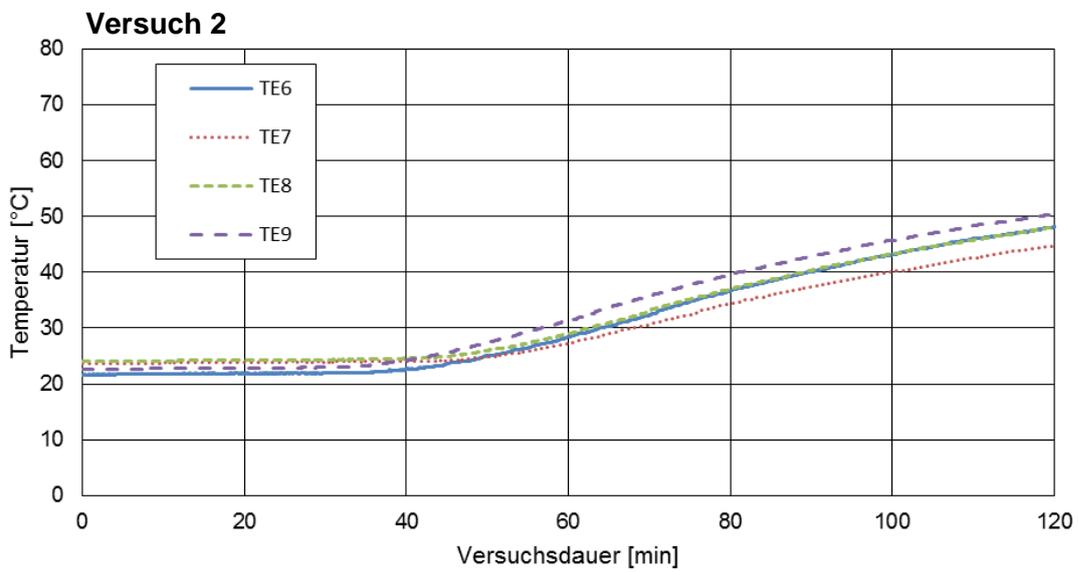
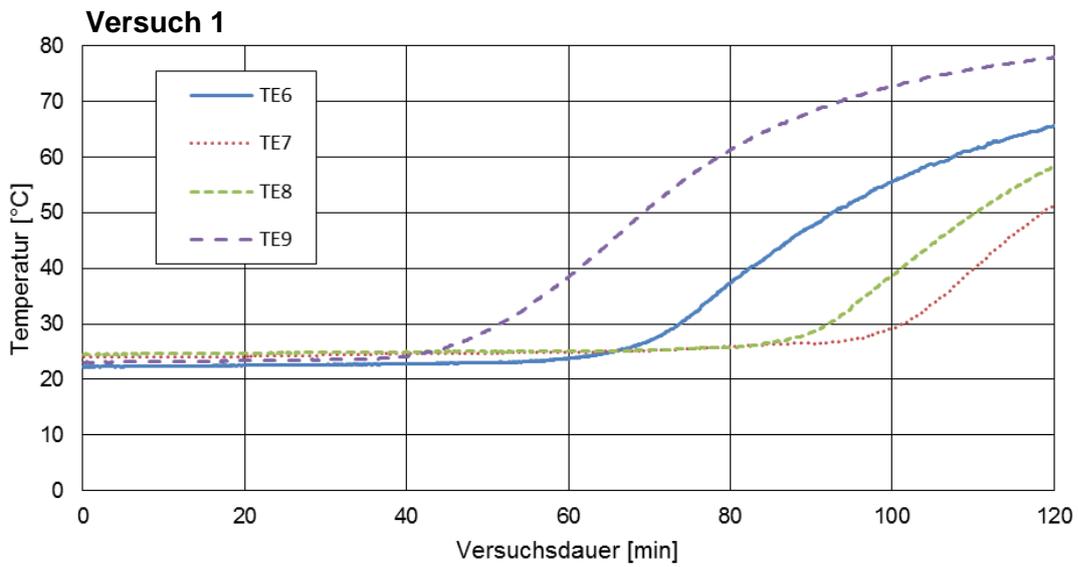
### Versuch 2



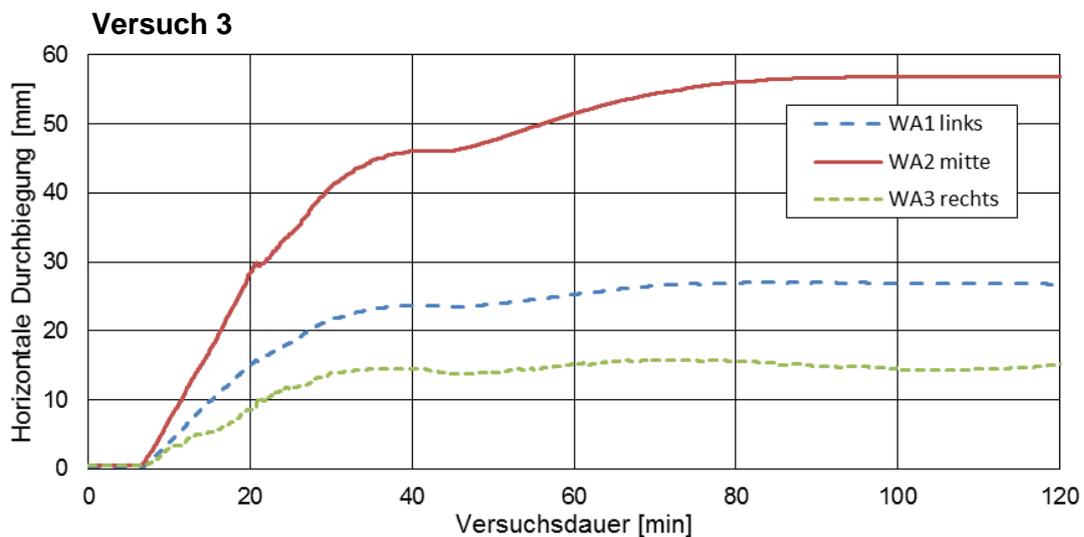
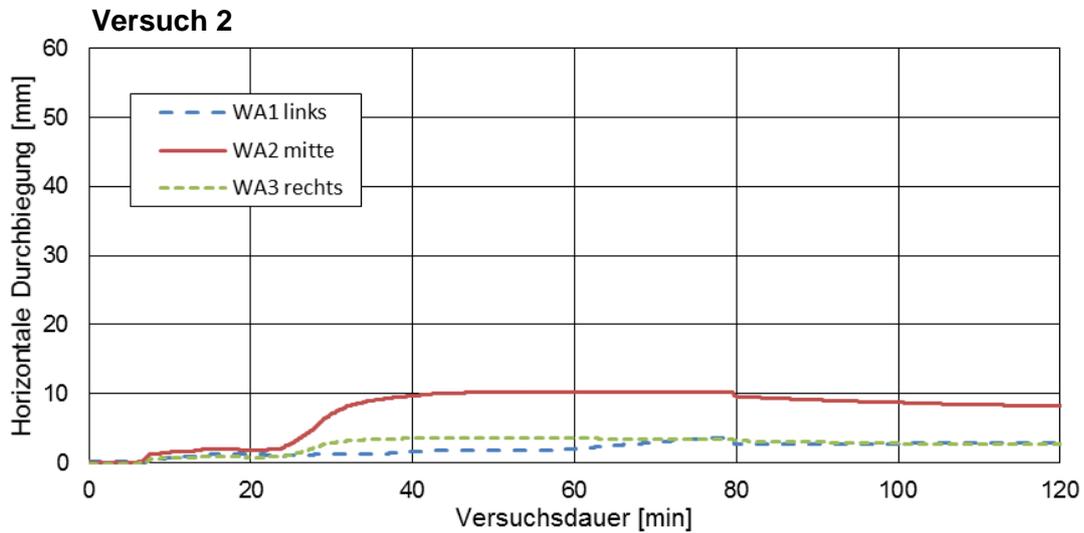
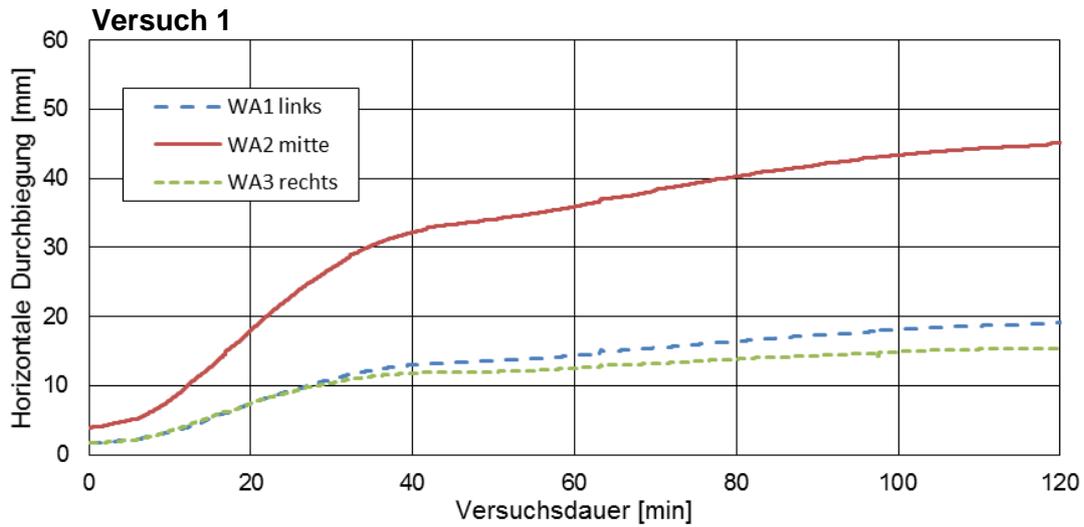
### Versuch 3



### 3. Temperatur an der unbeflammten Seite – maximale Temperatur

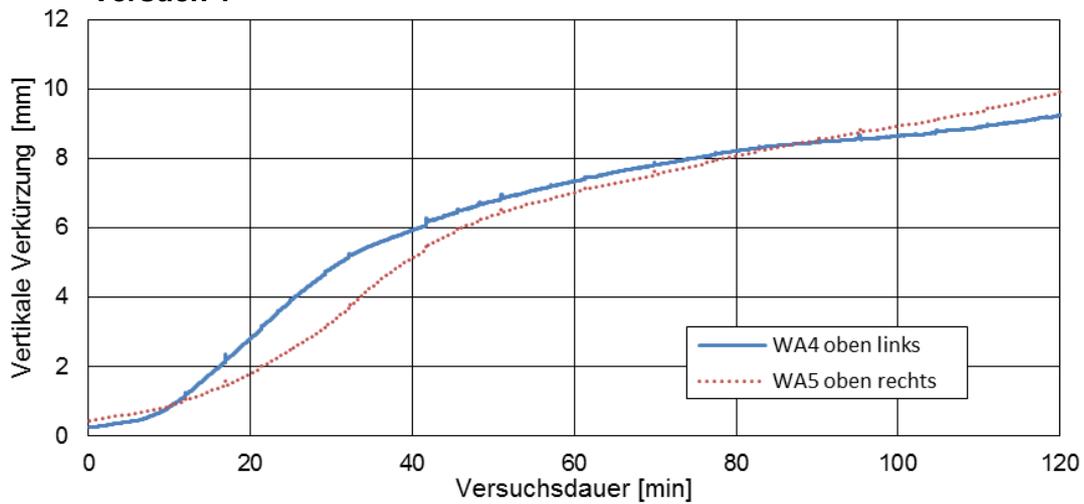


#### 4. Horizontale Verformung

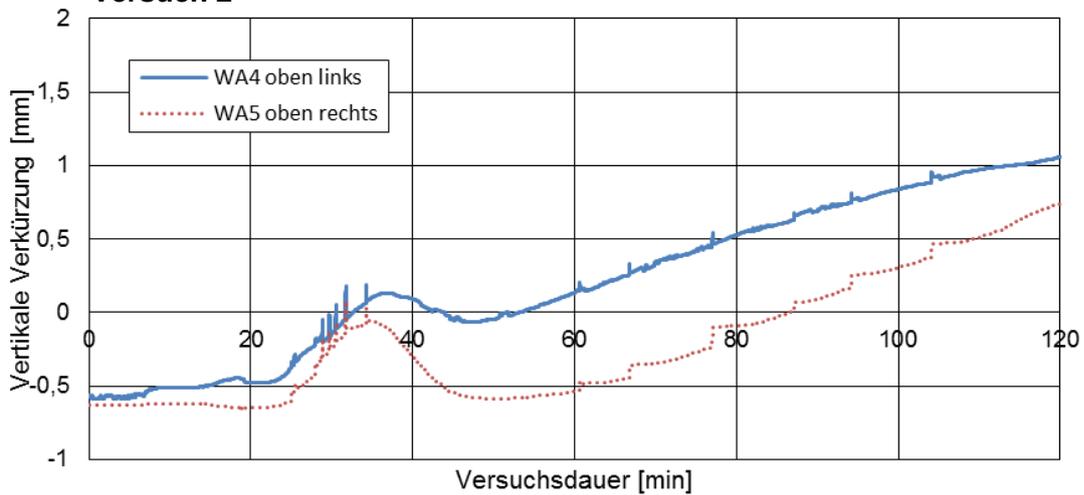


## 5. Vertikale Verformung

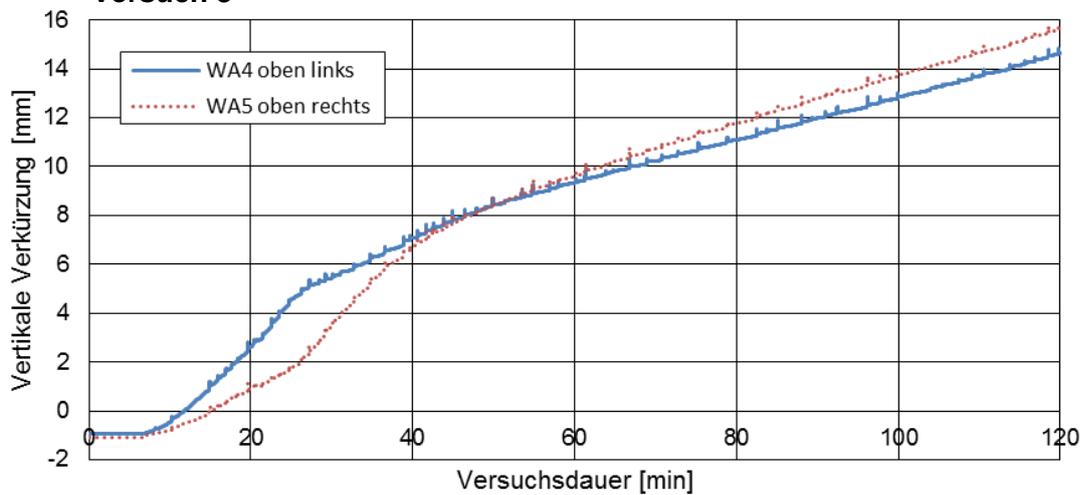
### Versuch 1



### Versuch 2

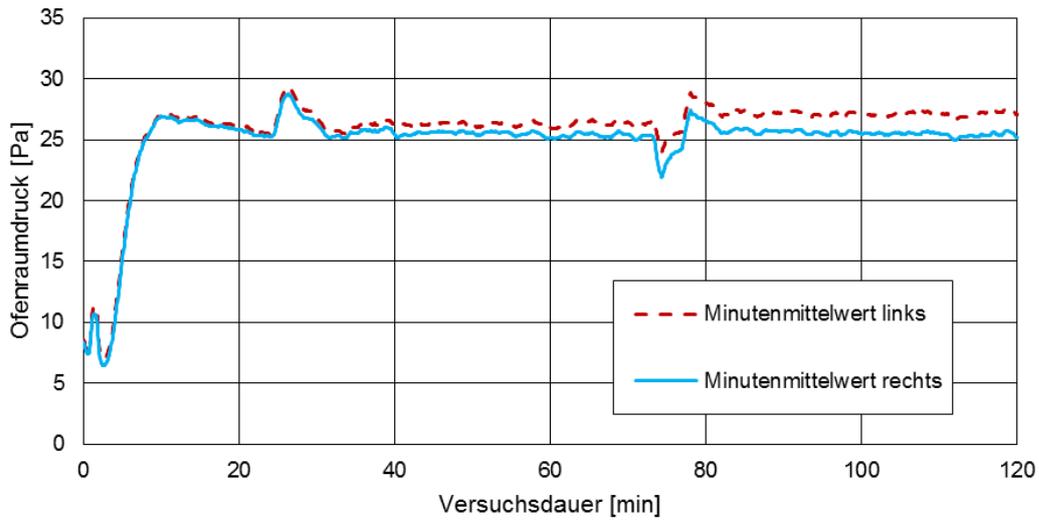


### Versuch 3

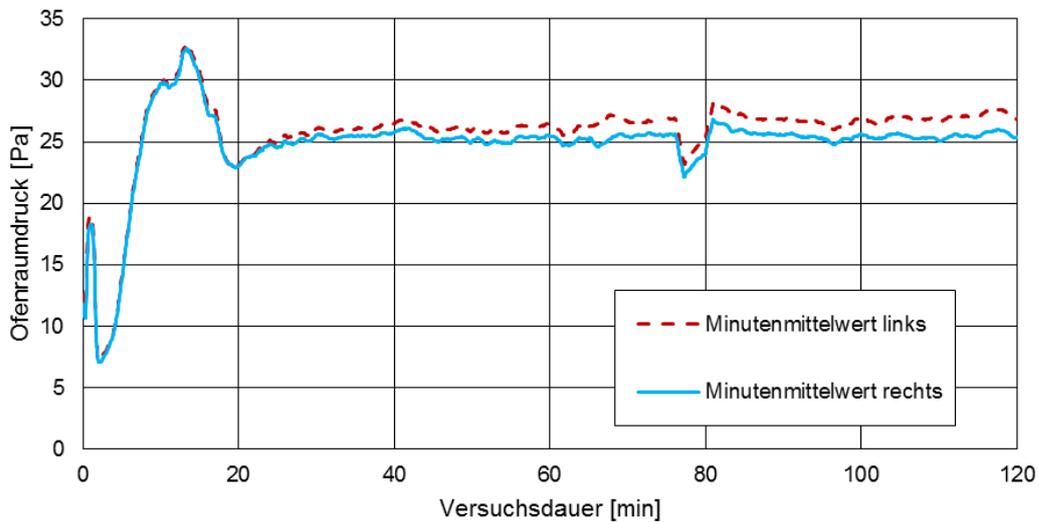


## 6. Ofenraumdruck

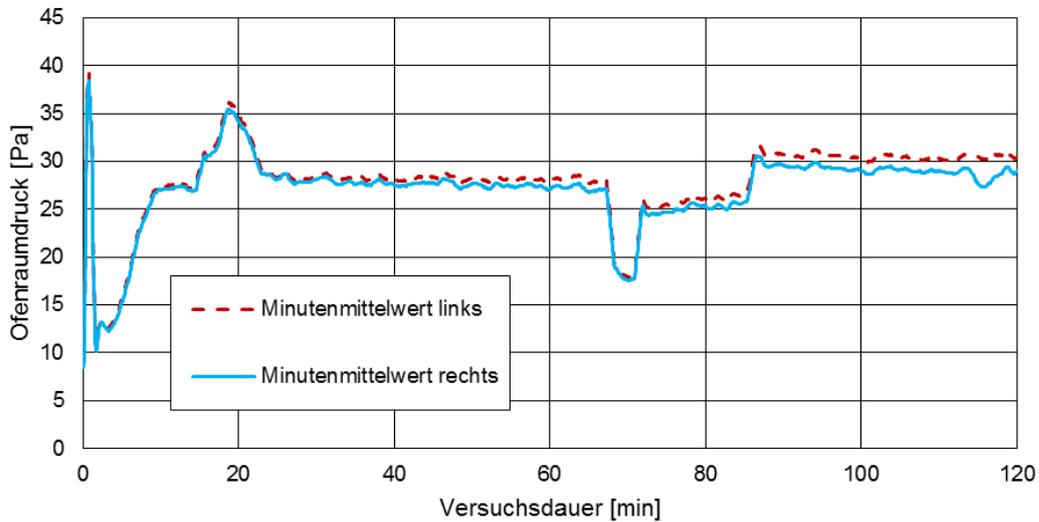
### Versuch 1



### Versuch 2

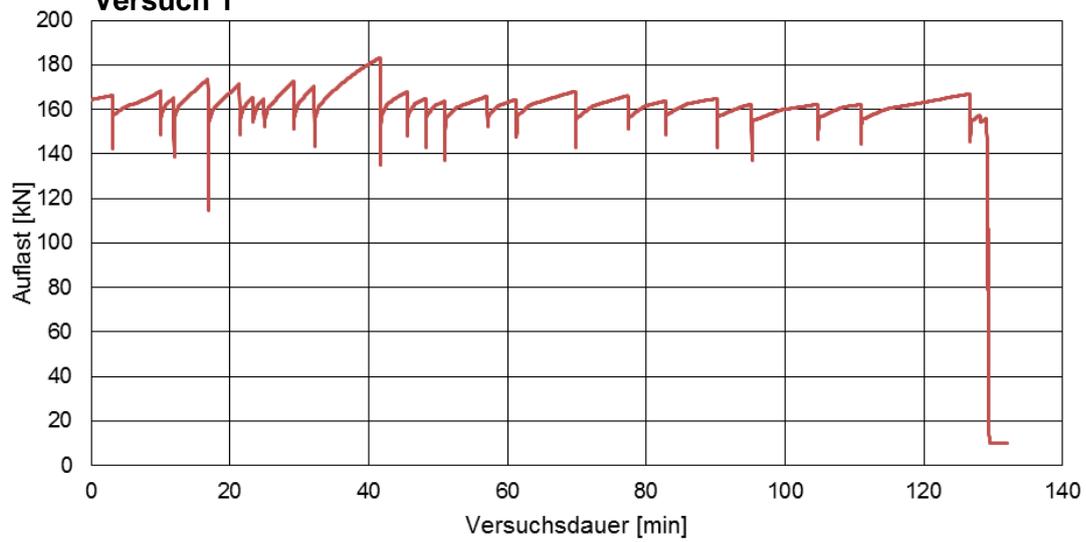


### Versuch 3

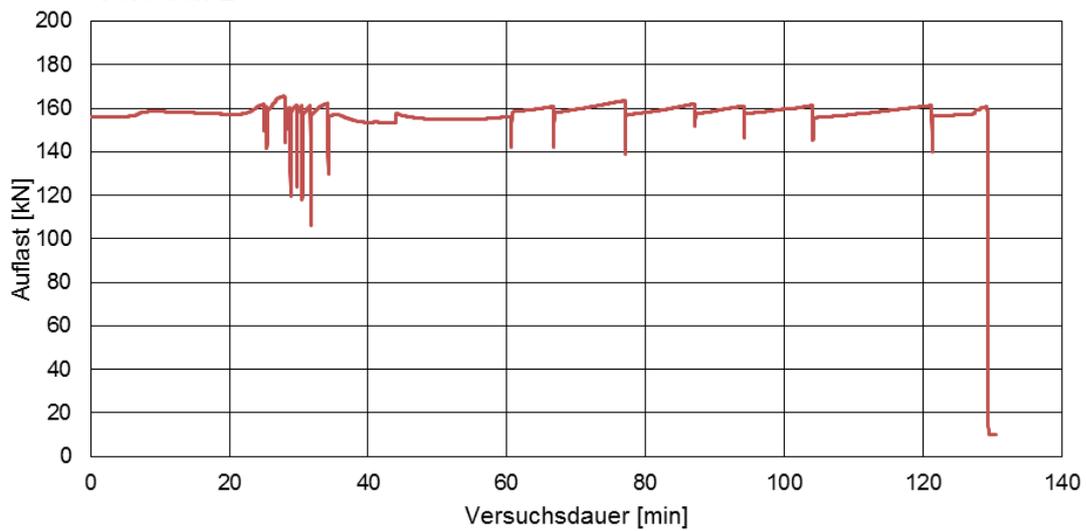


## 7. Auflast

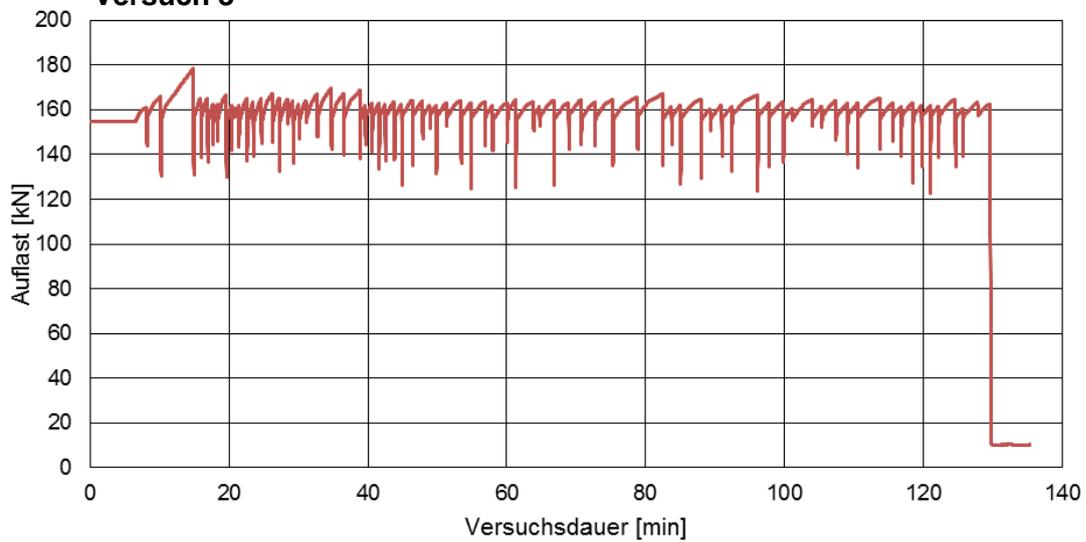
### Versuch 1



### Versuch 2



### Versuch 3



## 8. Bilder

**Versuch 1**



**Versuch 2**



**Versuch 3**



Abbildung A 1: Versuchsaufbau

**Versuch 1**



**Versuch 2**



**Versuch 3**



Abbildung A 2: Beflammte Seite nach der Abkühlung

## Anhang B: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-D

### Versuchsergebnisse - Referenzversuche E-D-R1 und E-D-R2

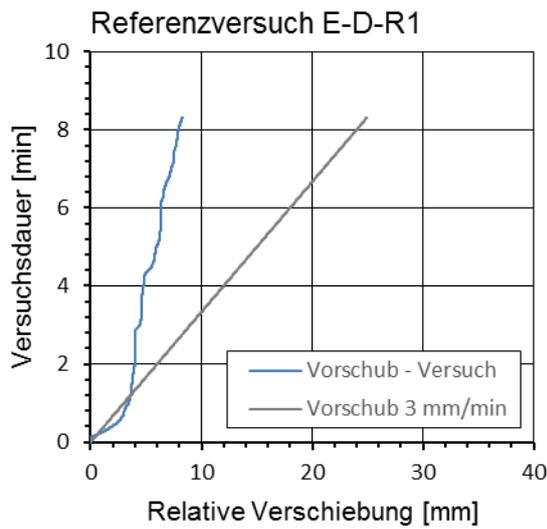


Abb. B1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

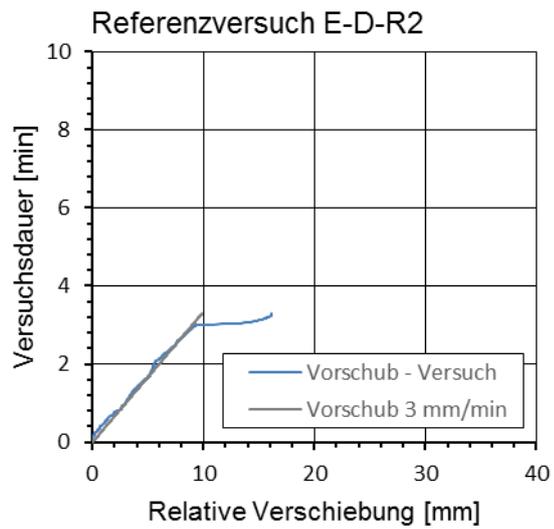


Abb. B2-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

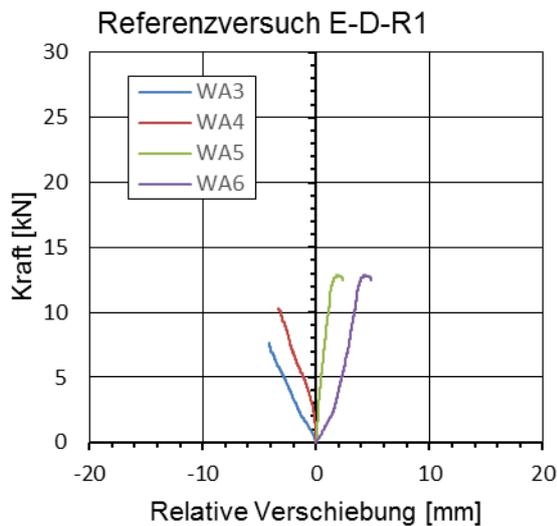


Abb. B1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

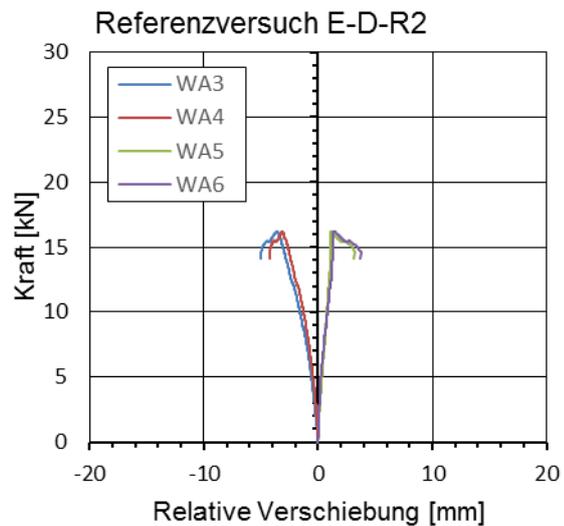


Abb. B2-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. B1-3: Seitenansicht – Versagensbild



Abb. B2-3: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-D-60

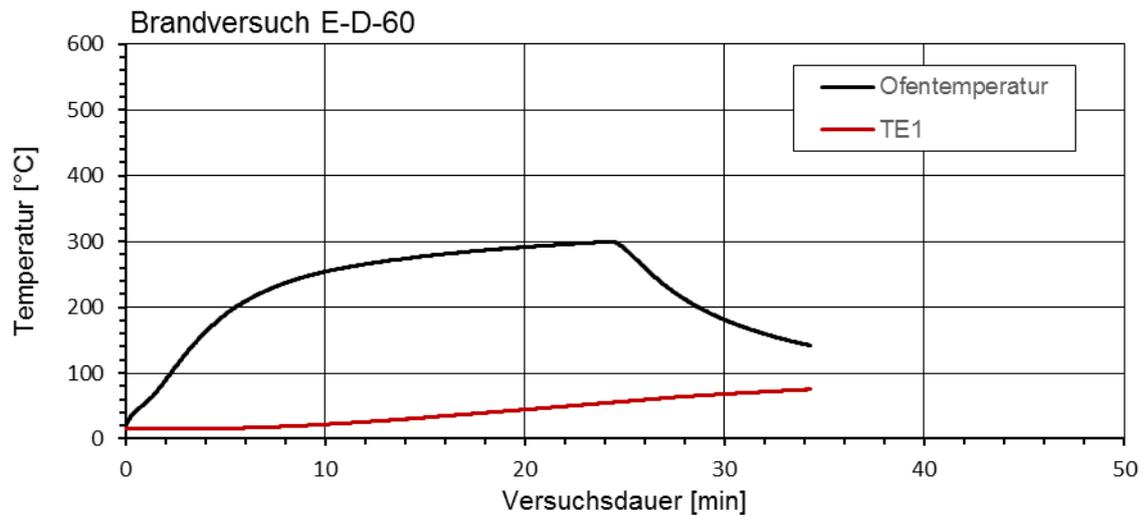


Abb. B3-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

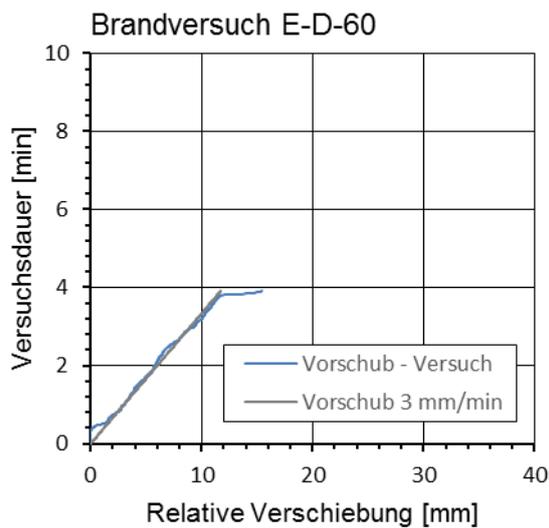


Abb. B3-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

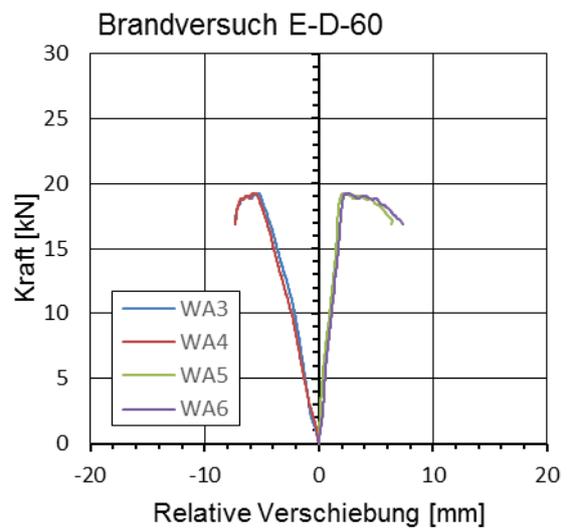


Abb. B3-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. B3-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-D-78

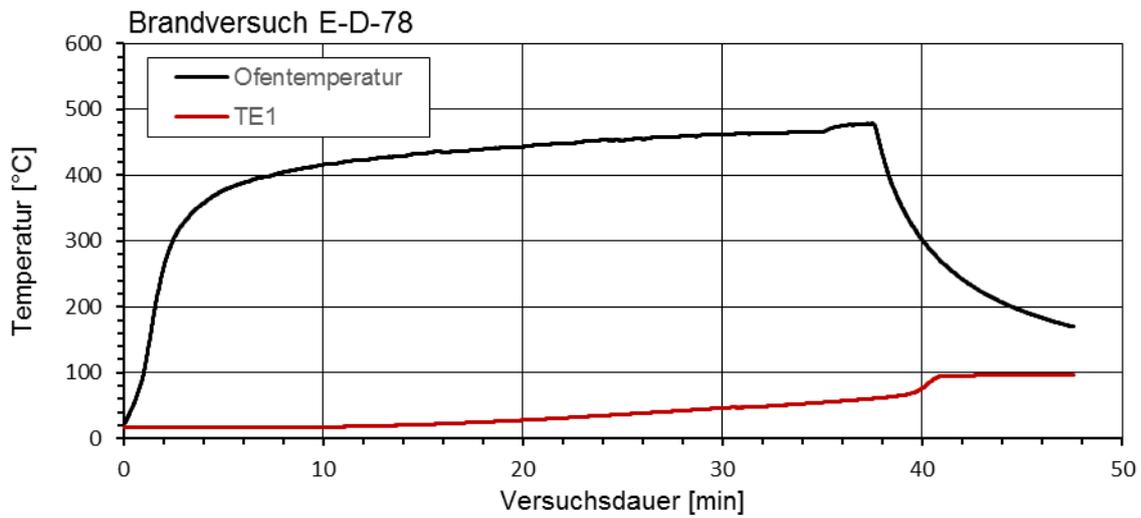


Abb. B4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

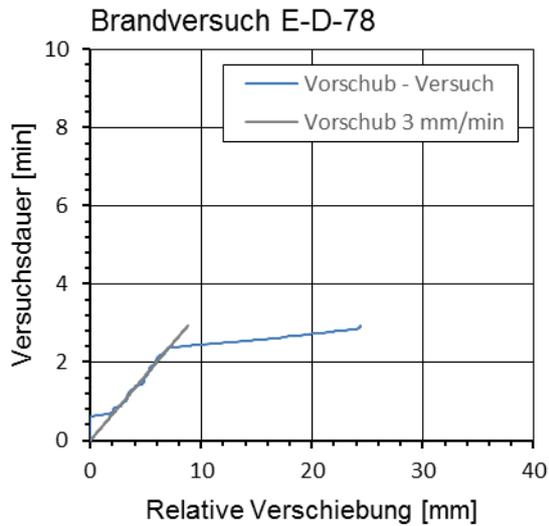


Abb. B4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

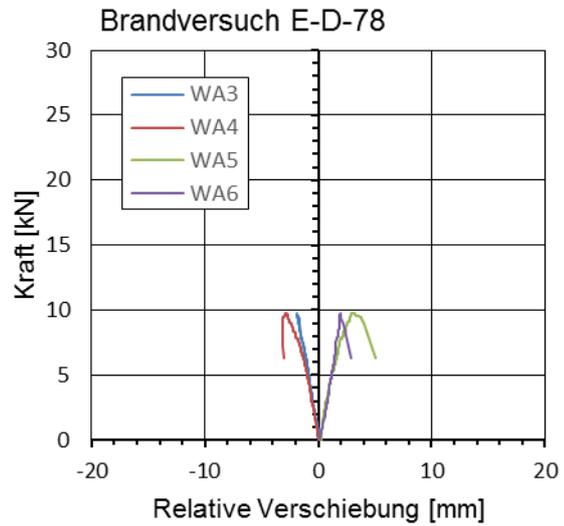


Abb. B4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. B4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-D-92

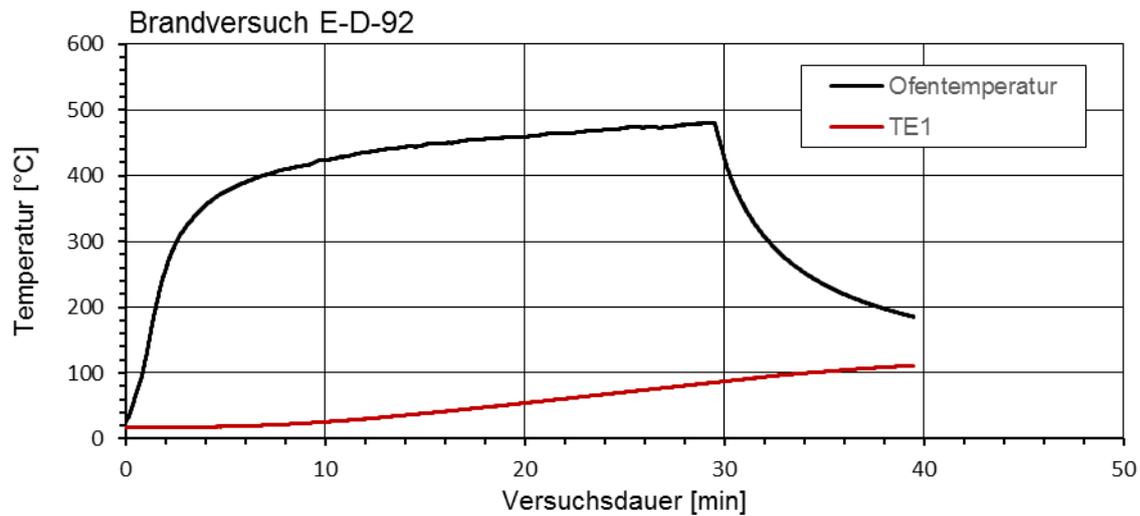


Abb. B5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

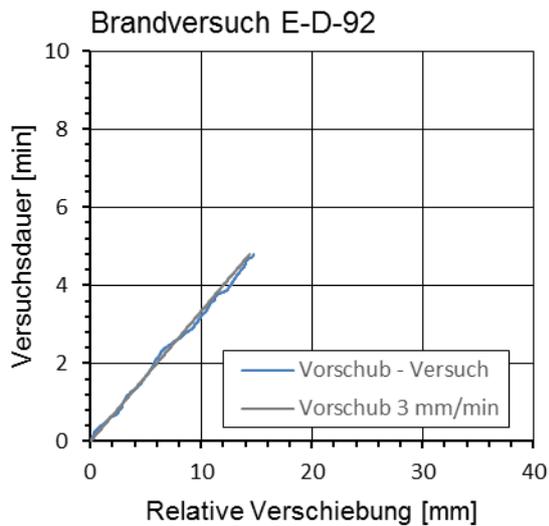


Abb. B5-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

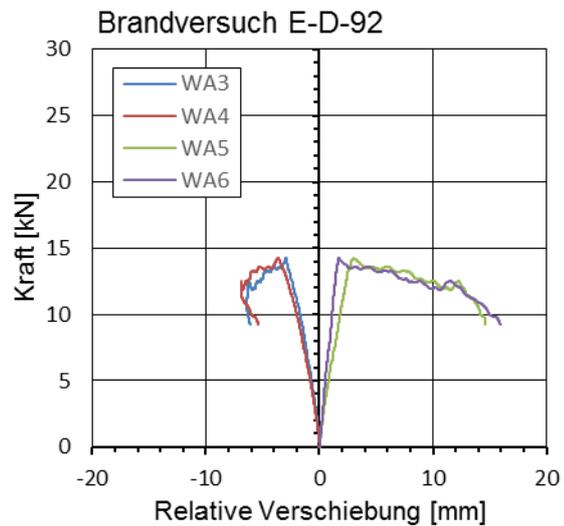


Abb. B5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

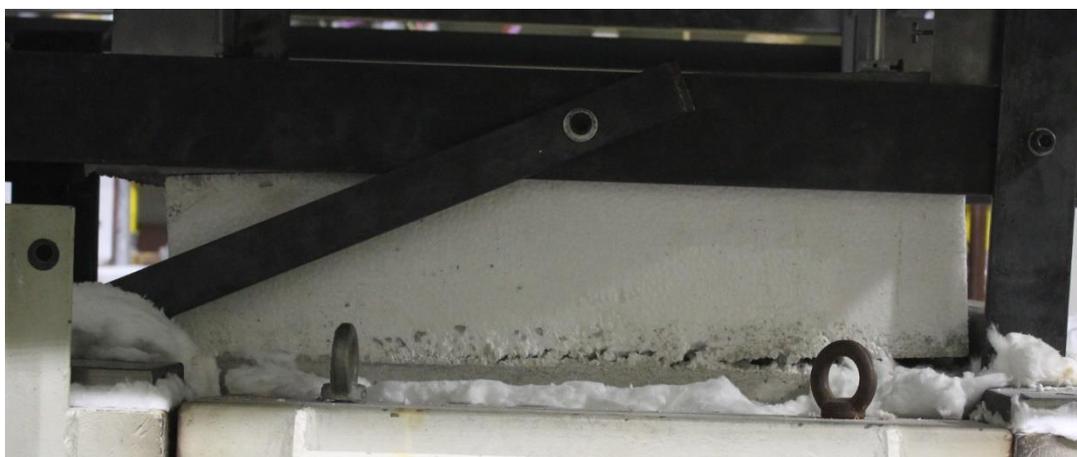


Abb. B5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-D-108

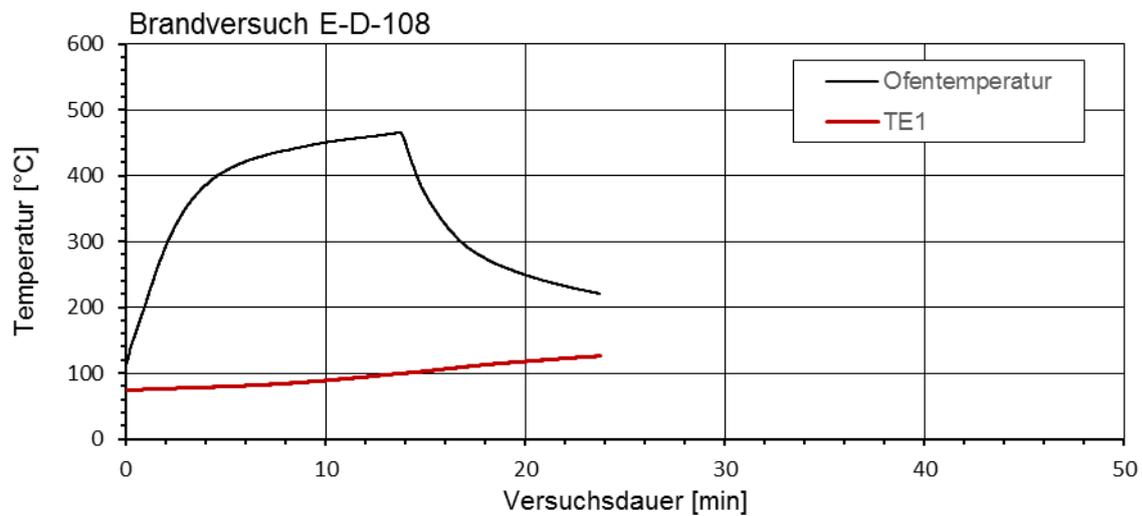


Abb. B6-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermolemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

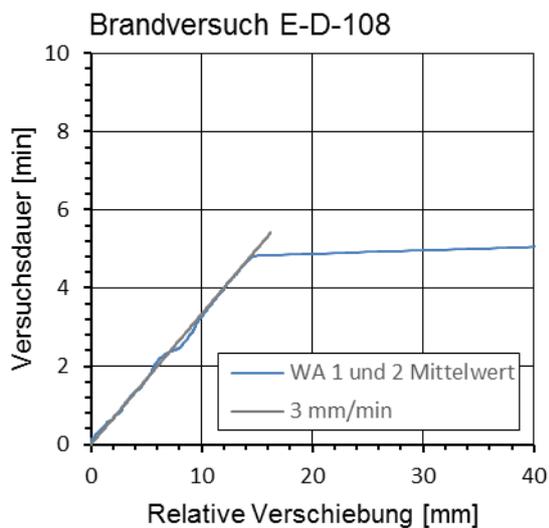


Abb. B6-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

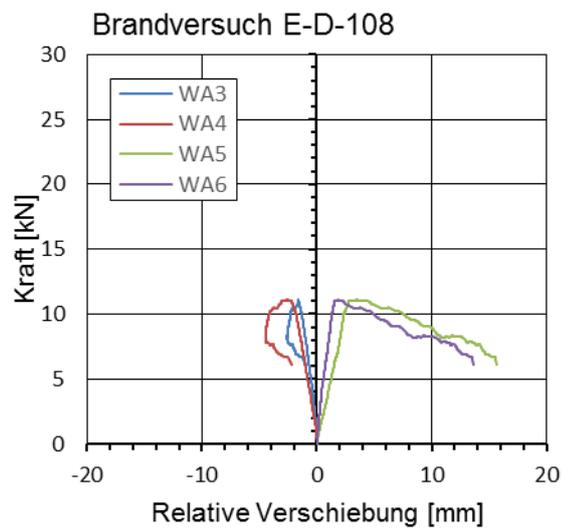


Abb. B6-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. B6-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Anhang C: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-F

### Versuchsergebnisse – Referenzversuche E-F-R1 und E-F-R2

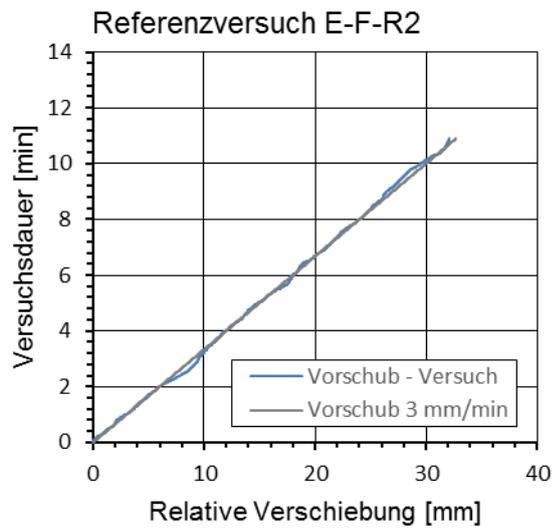
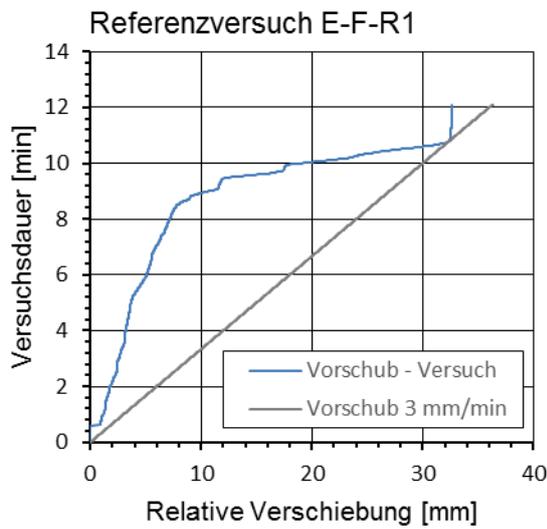


Abb. C1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

Abb. C2-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

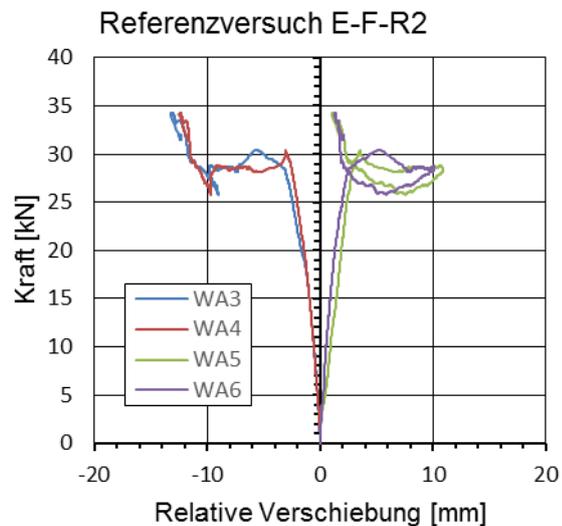
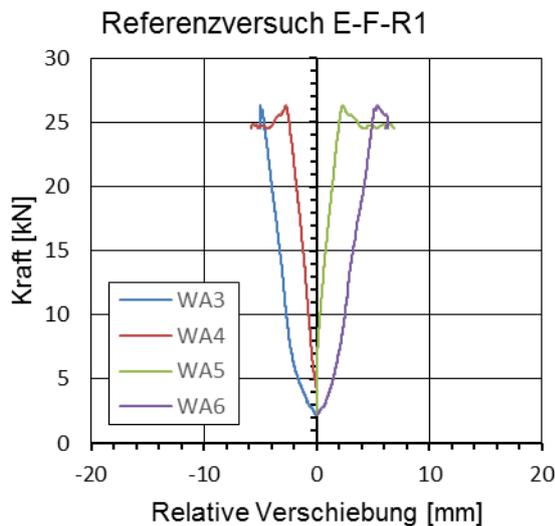


Abb. C1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

Abb. C2-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-F-84

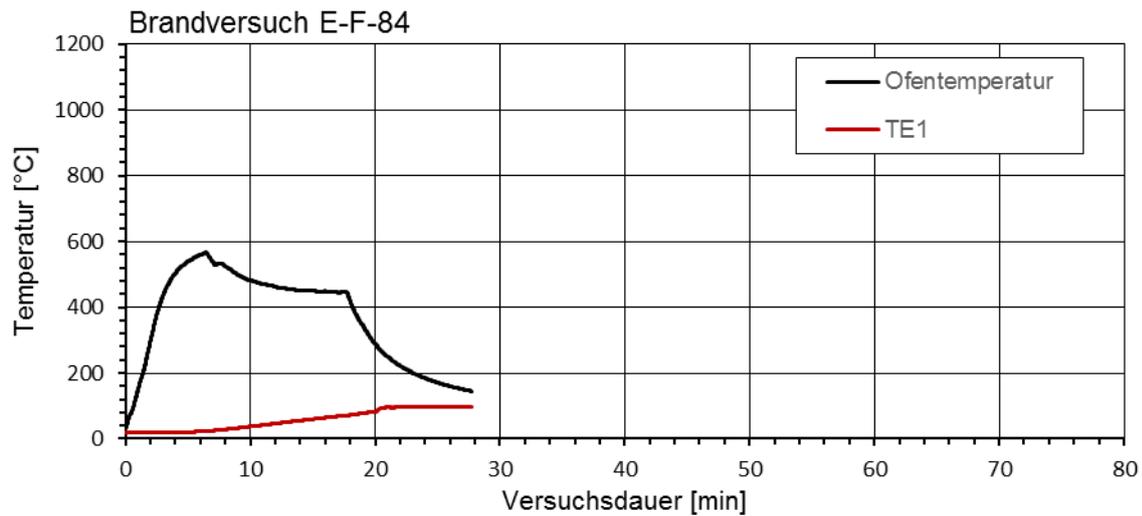


Abb. C3-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

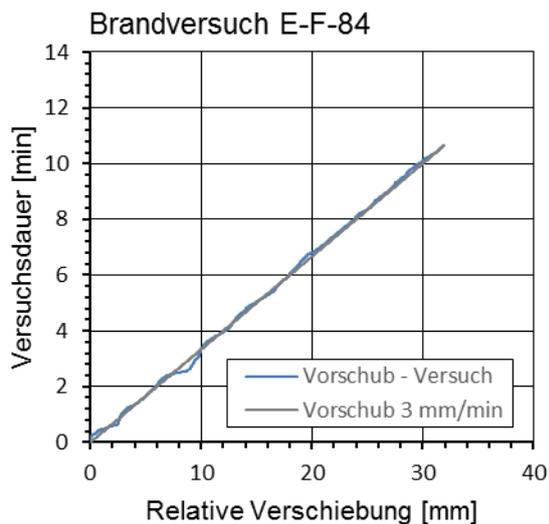


Abb. C3-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

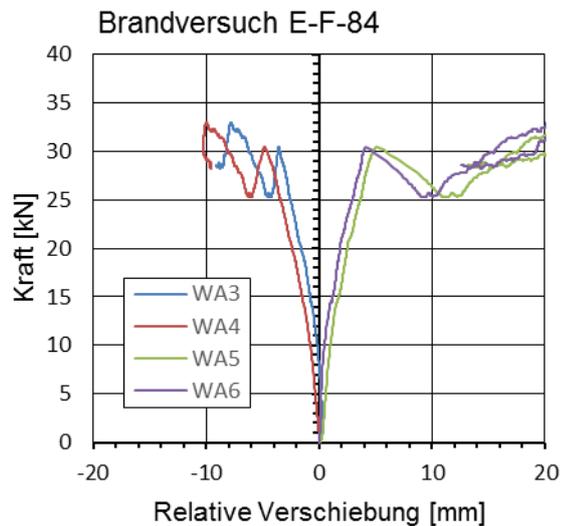


Abb. C3-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. C3-4: Seitenansicht – Versagensbild

### Versuchsergebnisse - Brandversuch E-F-99

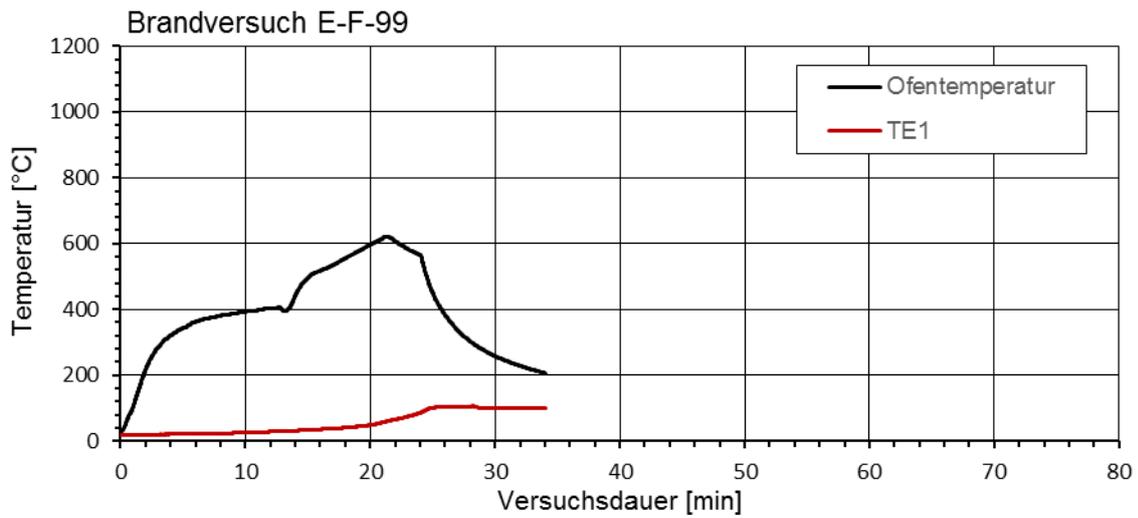


Abb. C4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

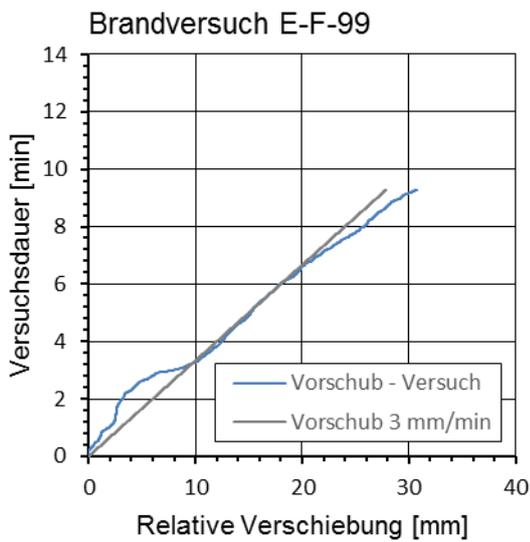


Abb. C4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

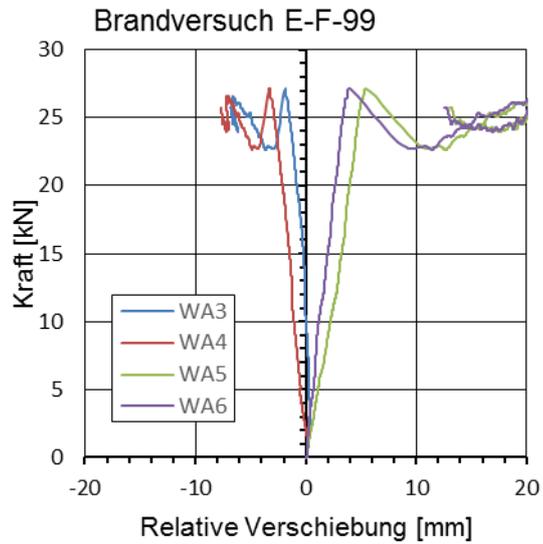


Abb. C4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

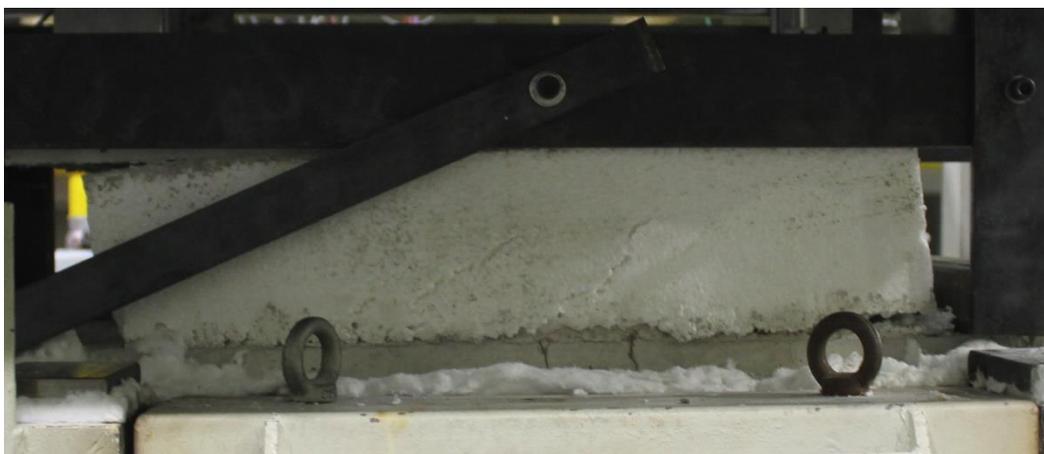


Abb. C4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-108

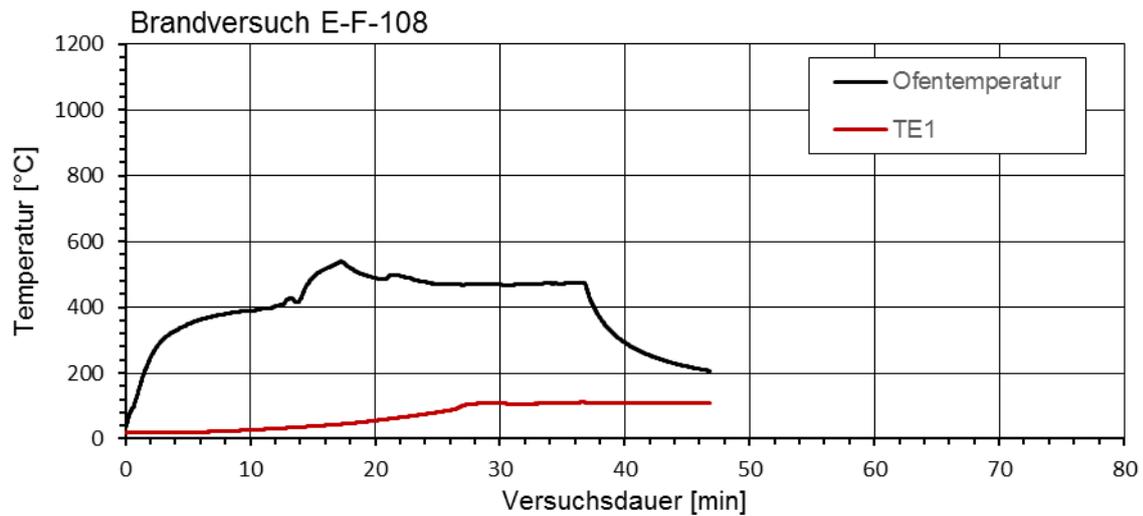


Abb. C5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermolemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

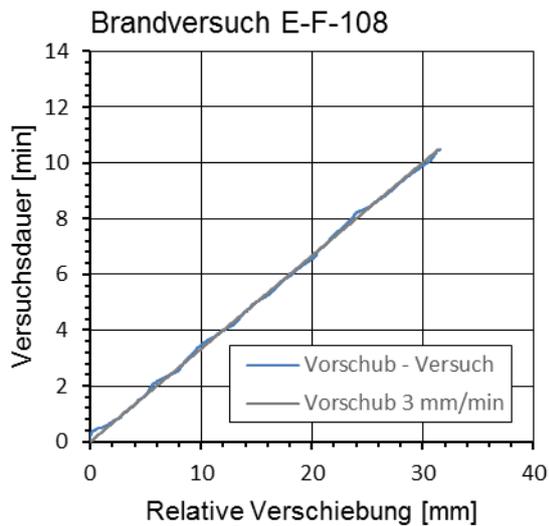


Abb. C5-2: Vergleich der Verschiebungsgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielverschiebungsgeschwindigkeit 3 mm/min

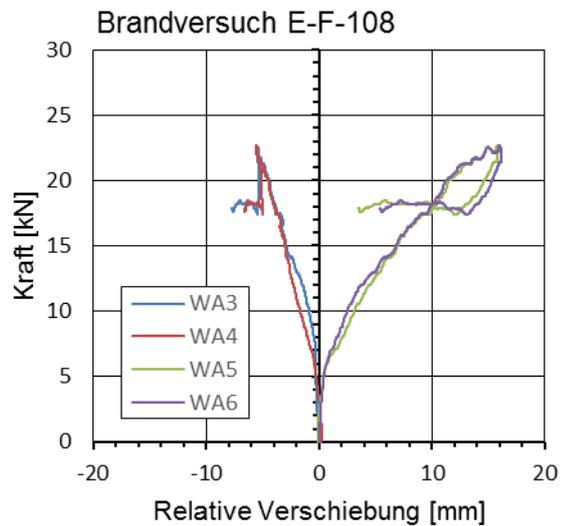


Abb. C5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. C5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-F-154

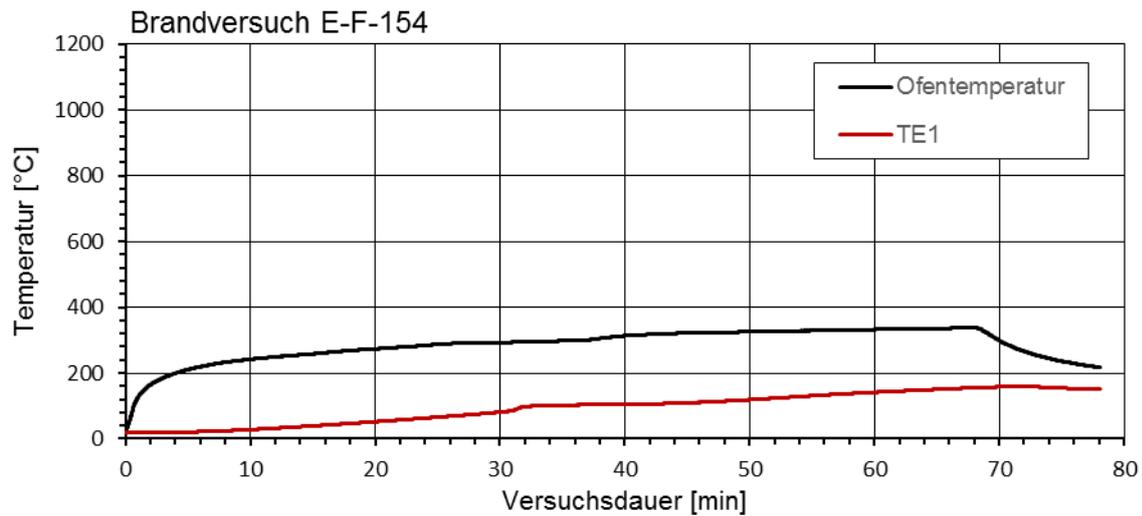


Abb. CB6-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

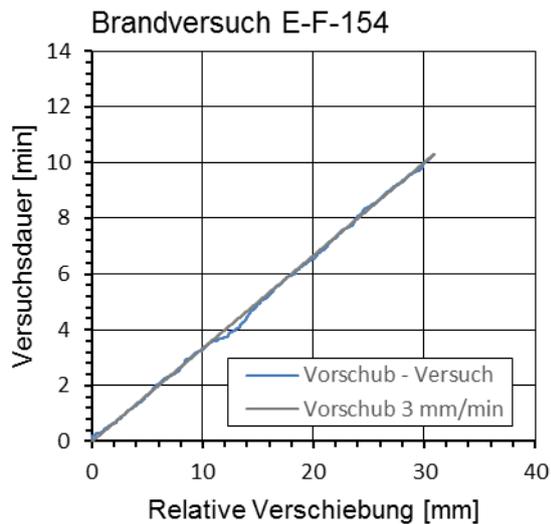


Abb. C6-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

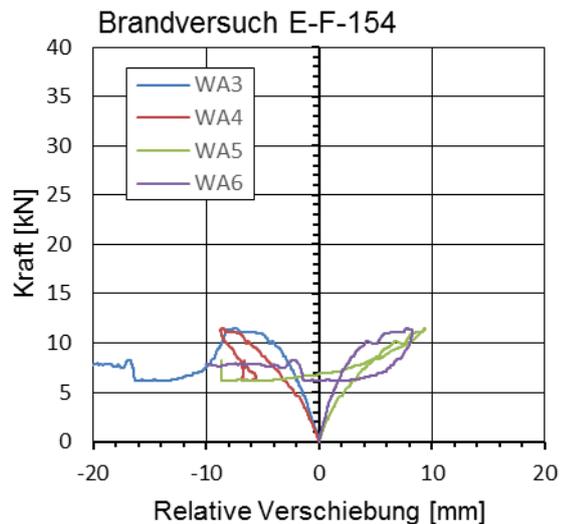


Abb. C6-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. C6-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Anhang D: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe E-P

### Versuchsergebnisse – Referenzversuche E-P-R1 und E-P-R2

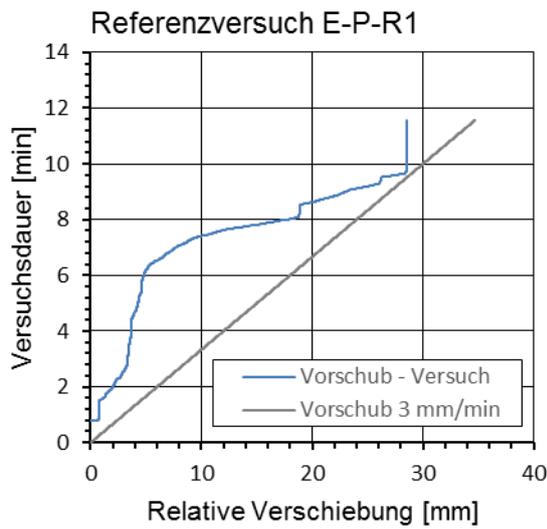


Abb. D1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

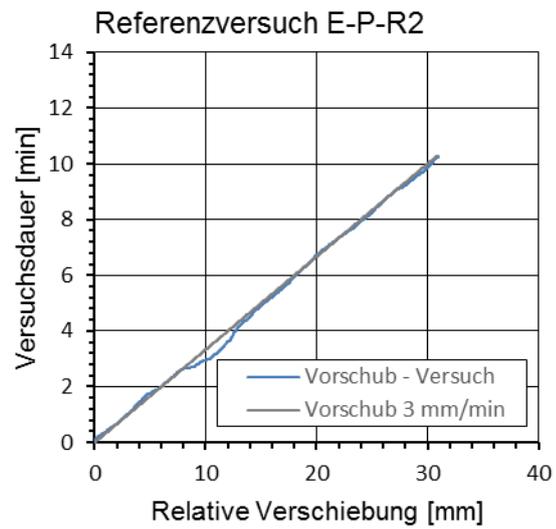


Abb. D2-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

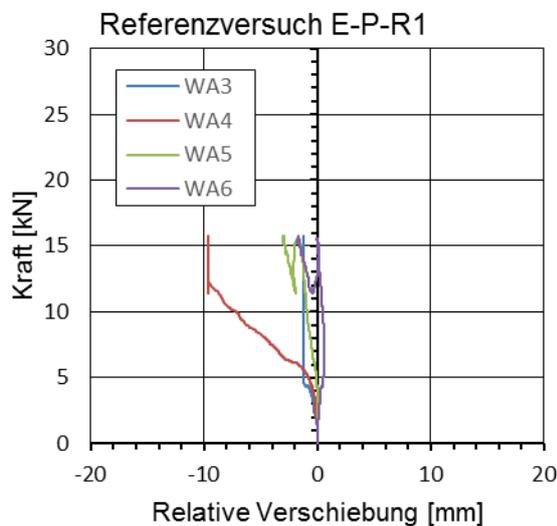


Abb. D1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

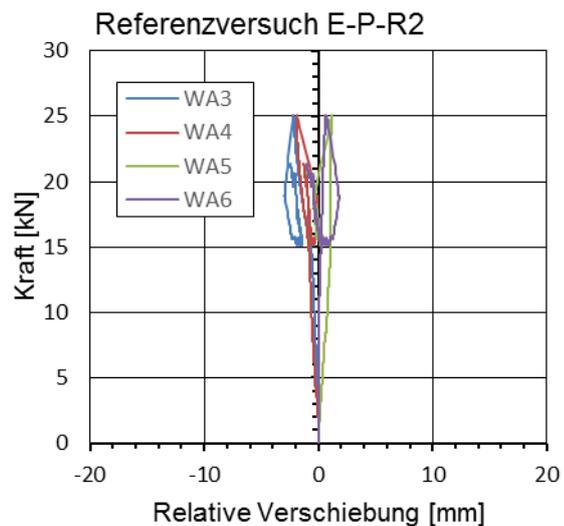


Abb. D2-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D1-3: Seitenansicht – Versagensbild



Abb. D2-3: Seitenansicht – Versagensbild

### Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-71

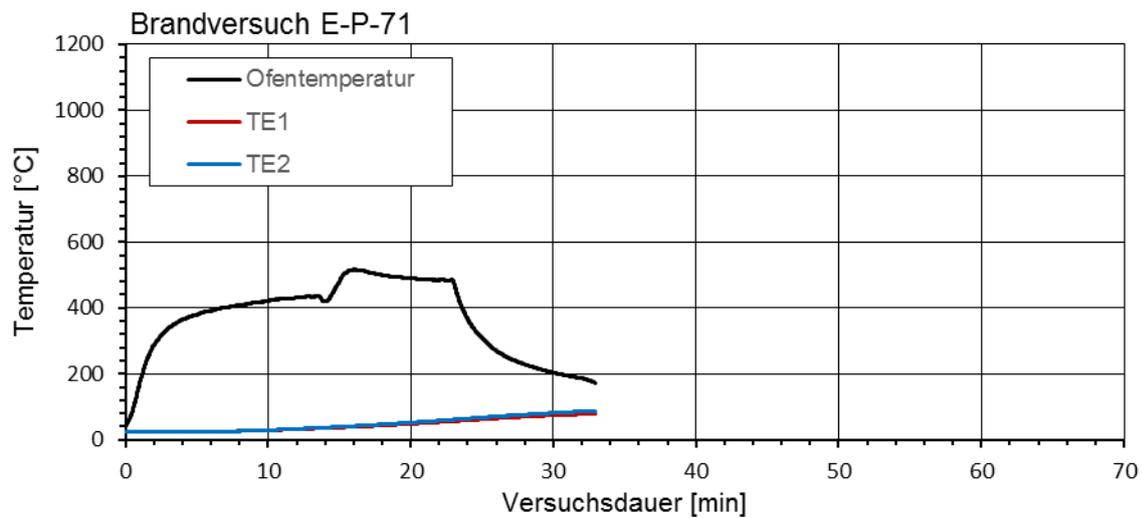


Abb. D3-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermolemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

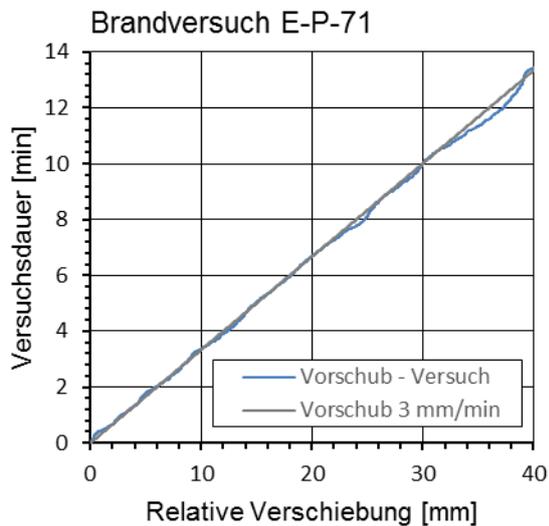


Abb. D3-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

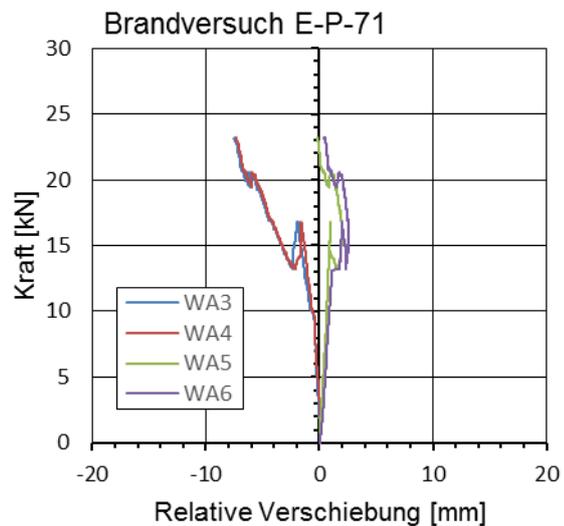


Abb. D3-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D3-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-88

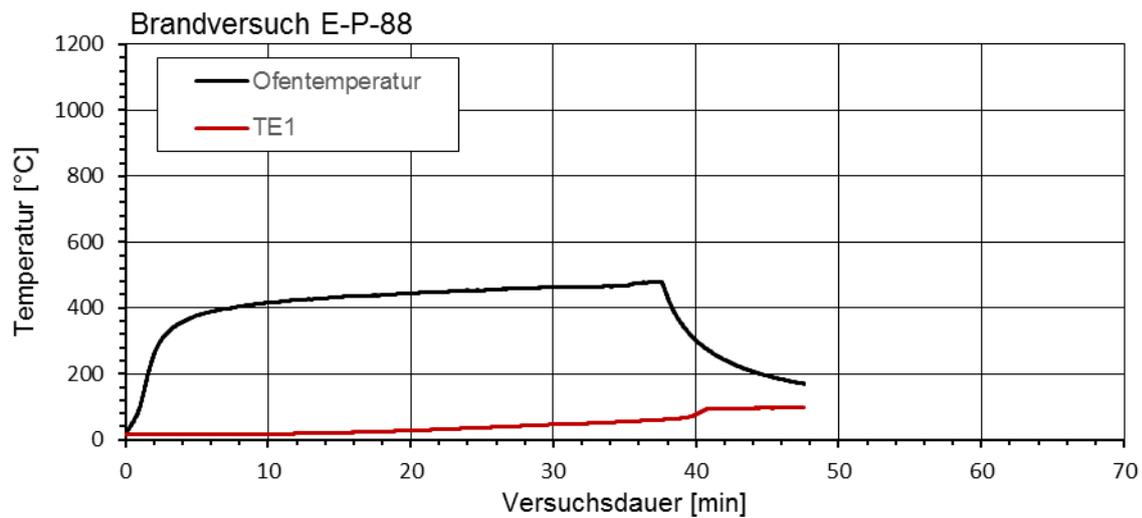


Abb. D4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermolemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

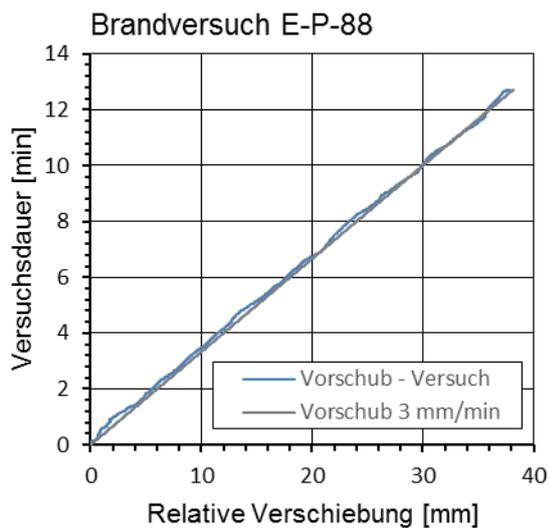


Abb. D4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

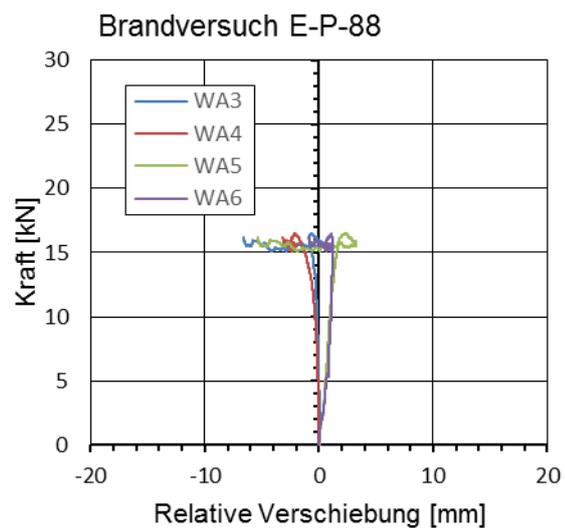


Abb. D4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-95

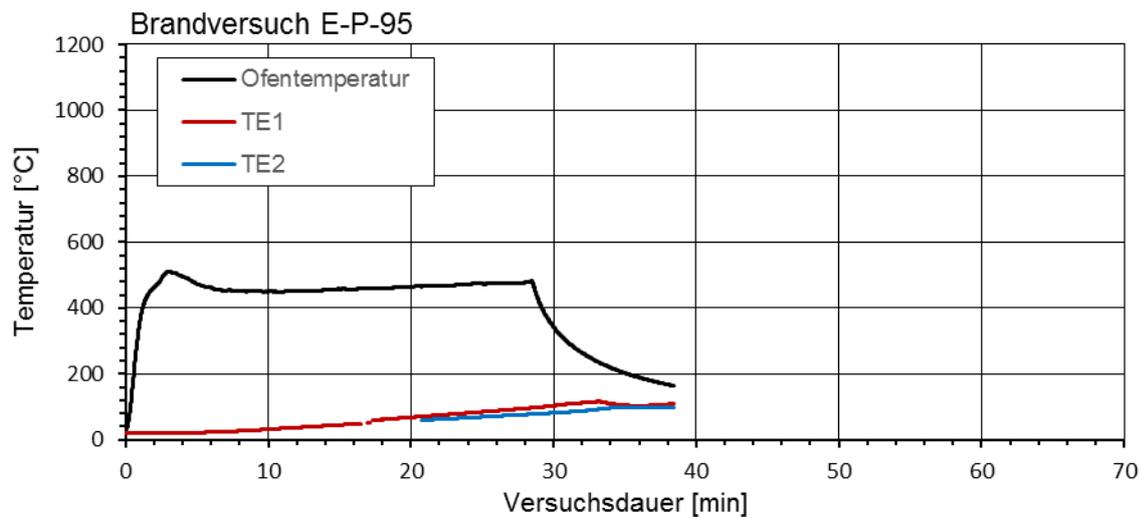


Abb. D5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

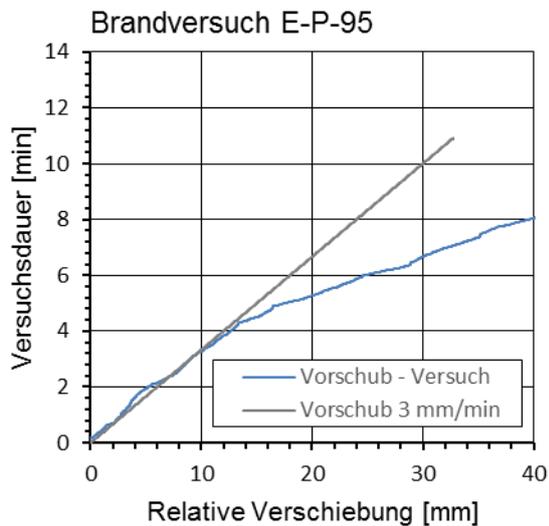


Abb. D5-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

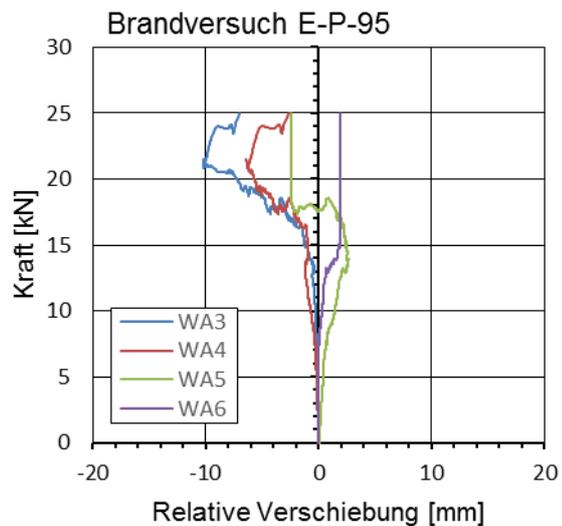


Abb. D5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-129

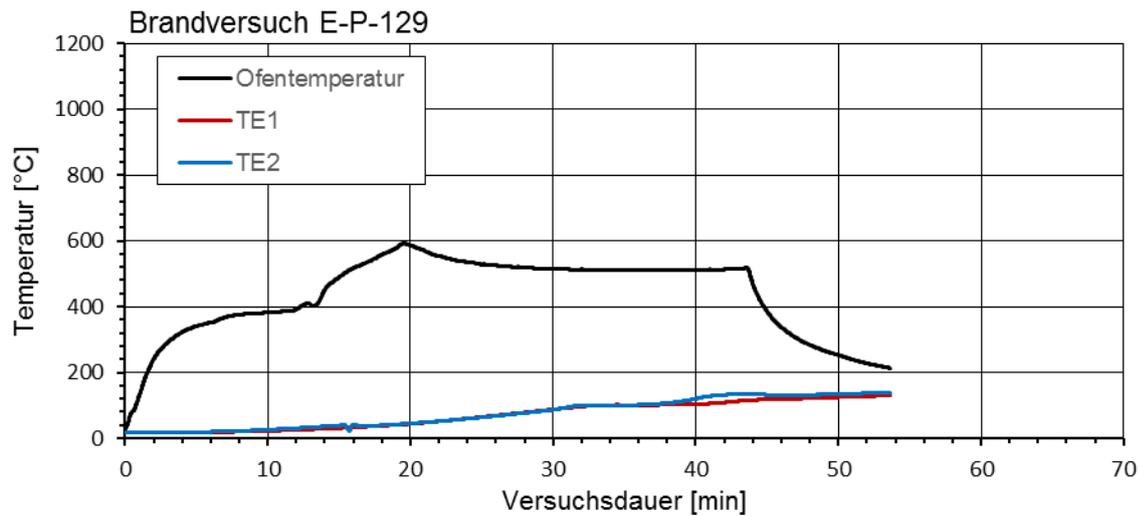


Abb. D6-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

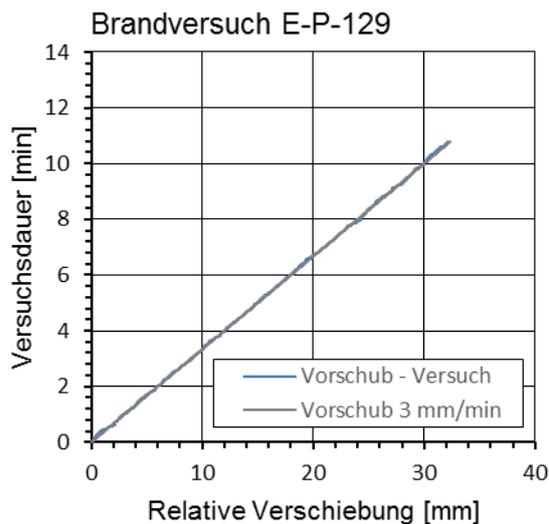


Abb. D6-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

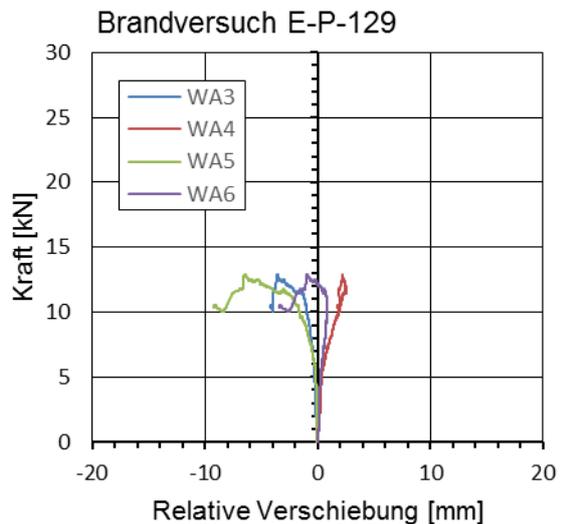


Abb. D6-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D6-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch E-P-159

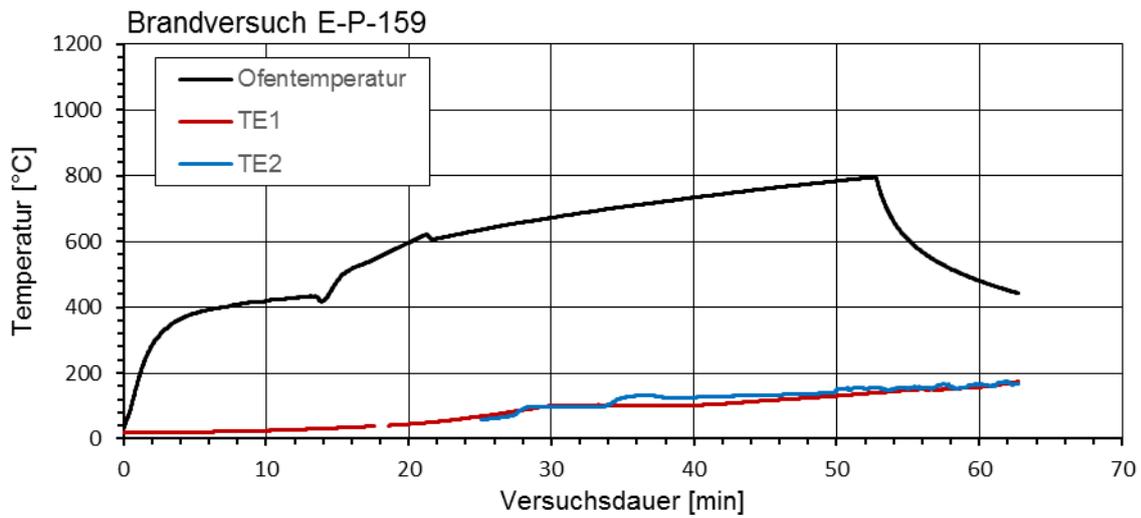


Abb. D7-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermolemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

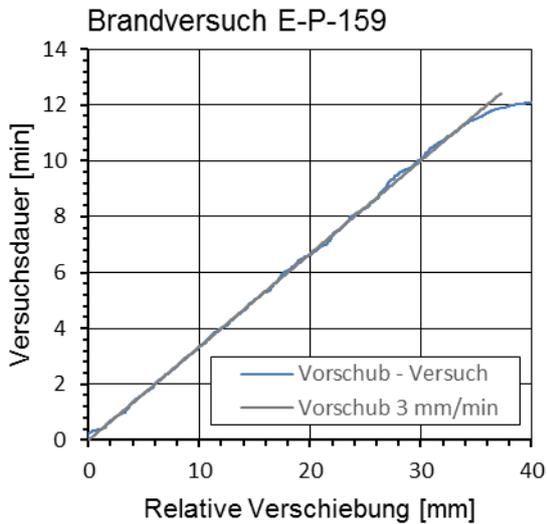


Abb. D7-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

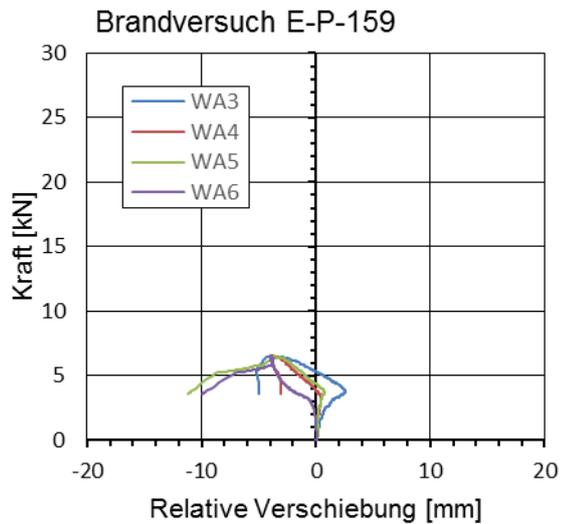


Abb. D7-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. D7-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Anhang E: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-D

### Versuchsergebnisse - Referenzversuch M-D-R1

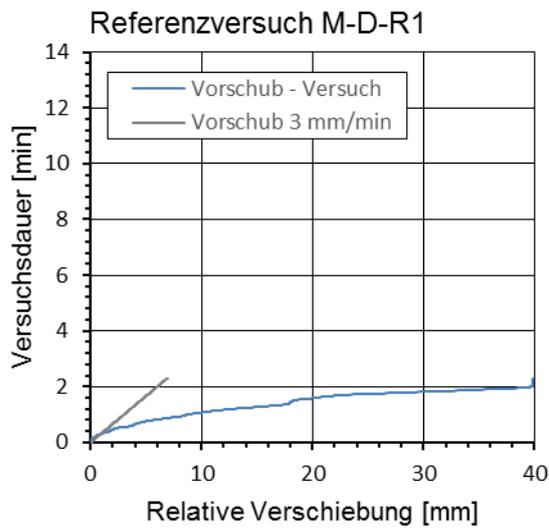


Abb. E1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

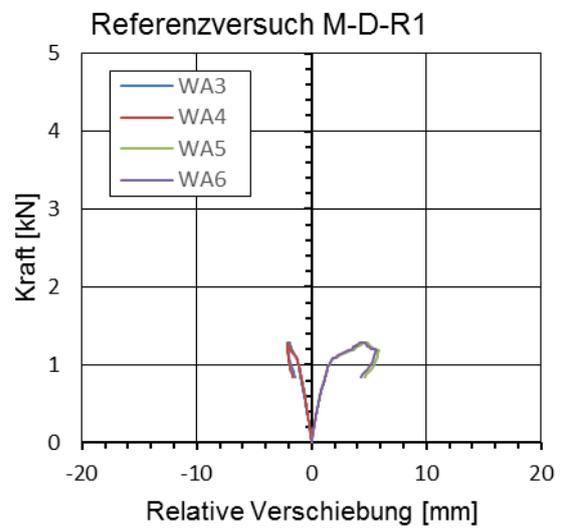


Abb. E1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. E1-3: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Referenzversuch M-D-R2

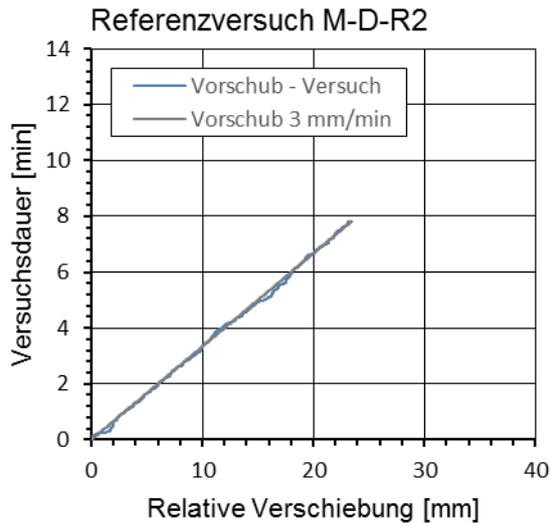


Abb. E2-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

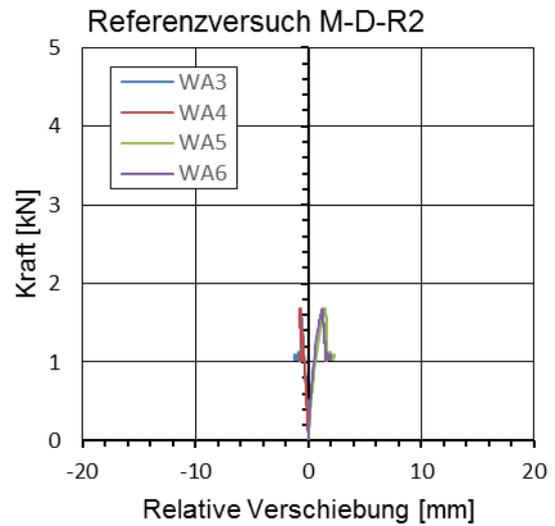


Abb. E2-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

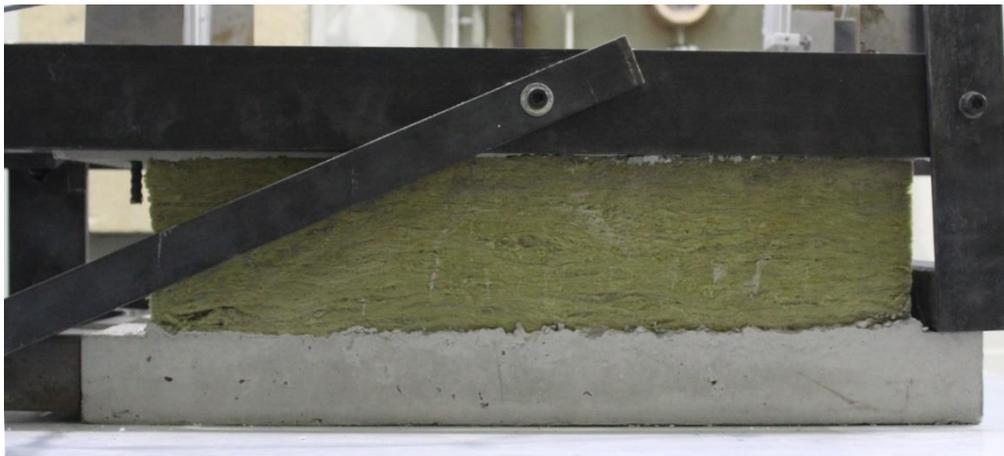


Abb. E2-3: Seitenansicht – Versagensbild

### Versuchsergebnisse - Referenzversuch M-D-R3

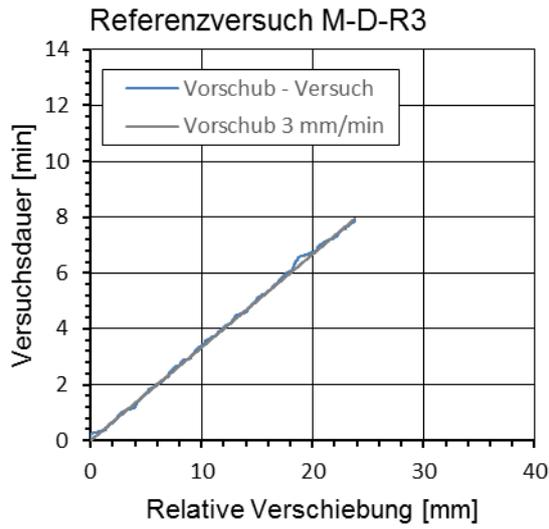


Abb. E3-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

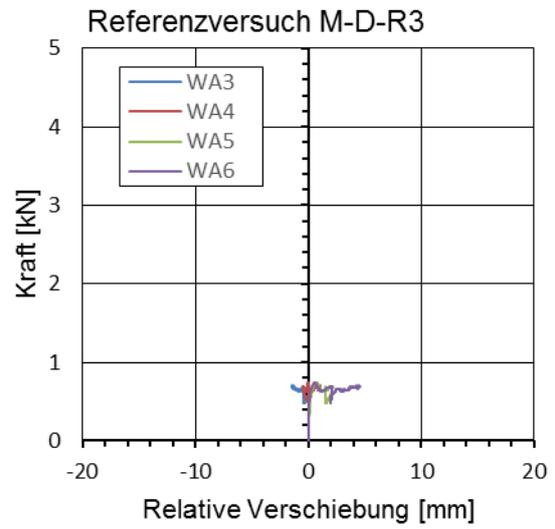


Abb. E3-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. E3-3: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-D-156

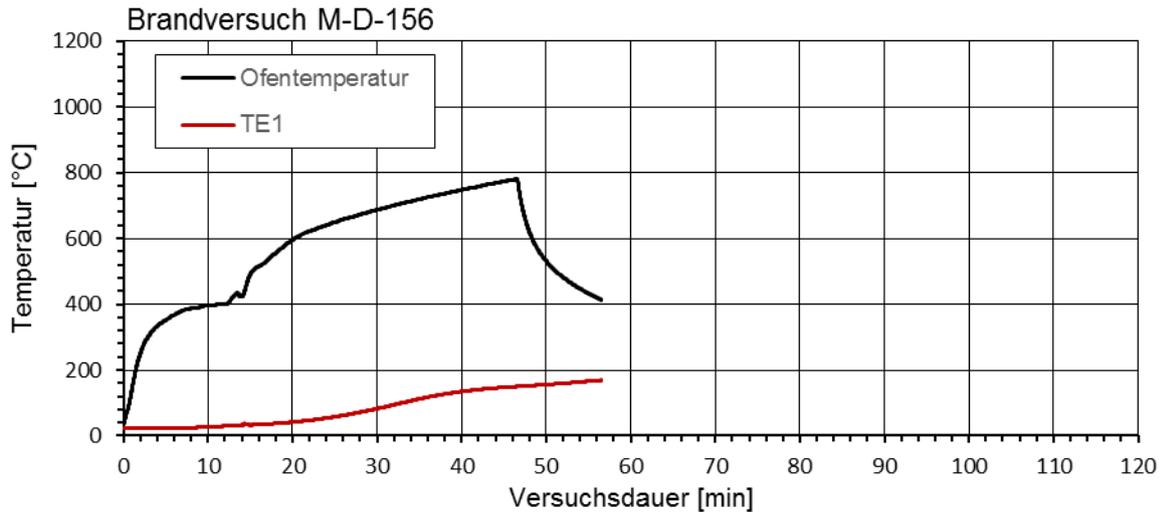


Abb. E4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

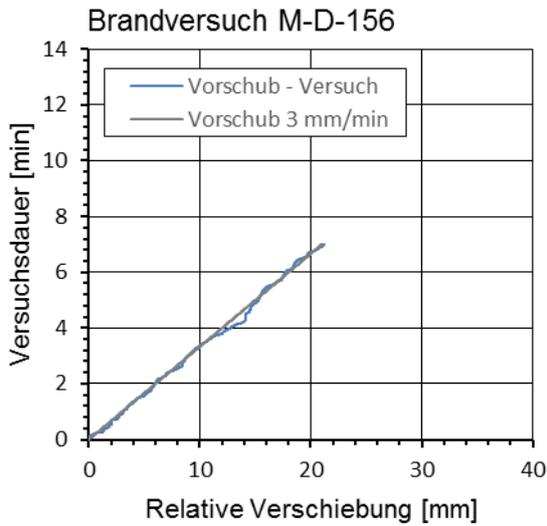


Abb. E4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

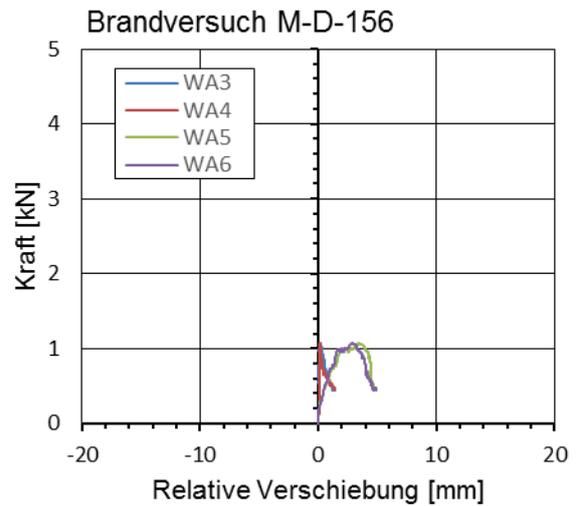


Abb. E4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. E4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-D-408

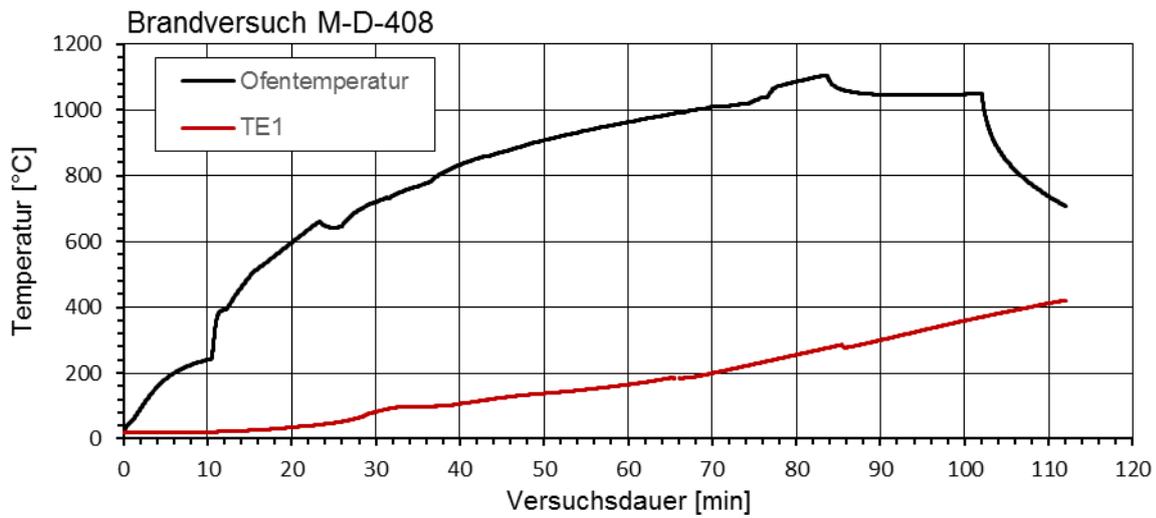


Abb. E5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

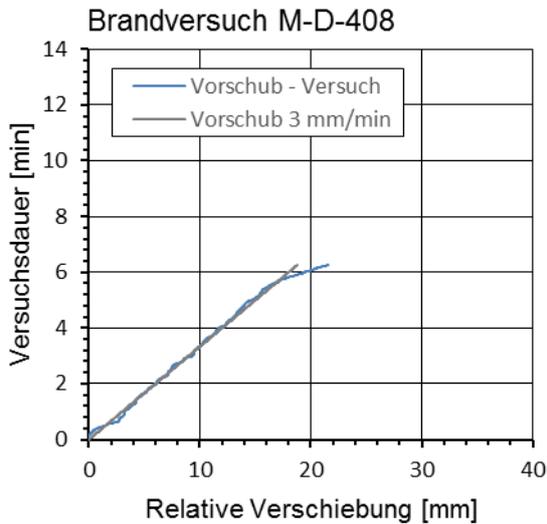


Abb. E5-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

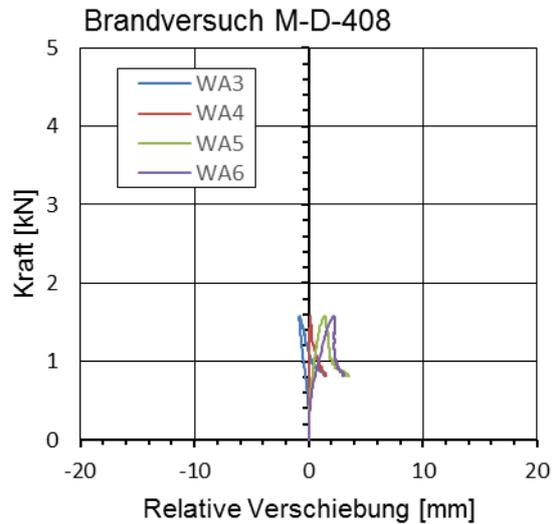


Abb. E5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. E5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Anhang F: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-F

### Versuchsergebnisse – Referenzversuche M-F-R1 und M-F-R2

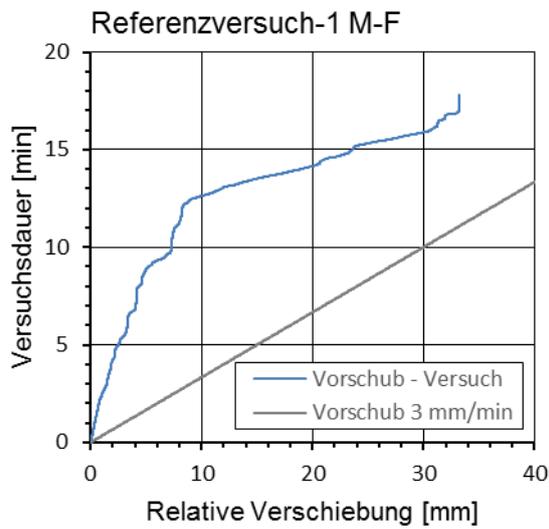


Abb. F1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

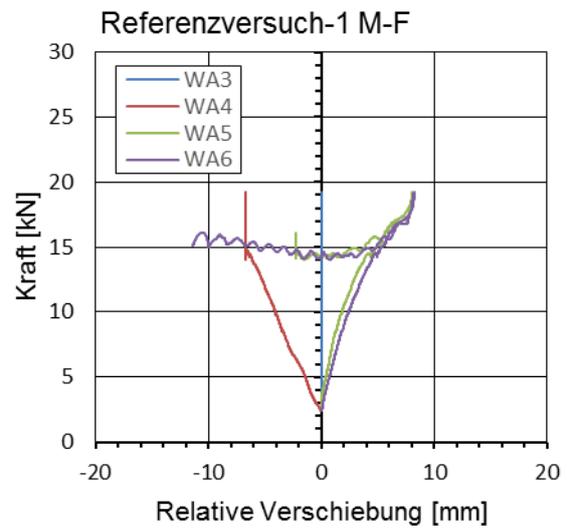


Abb. F1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F1-3: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-F-159

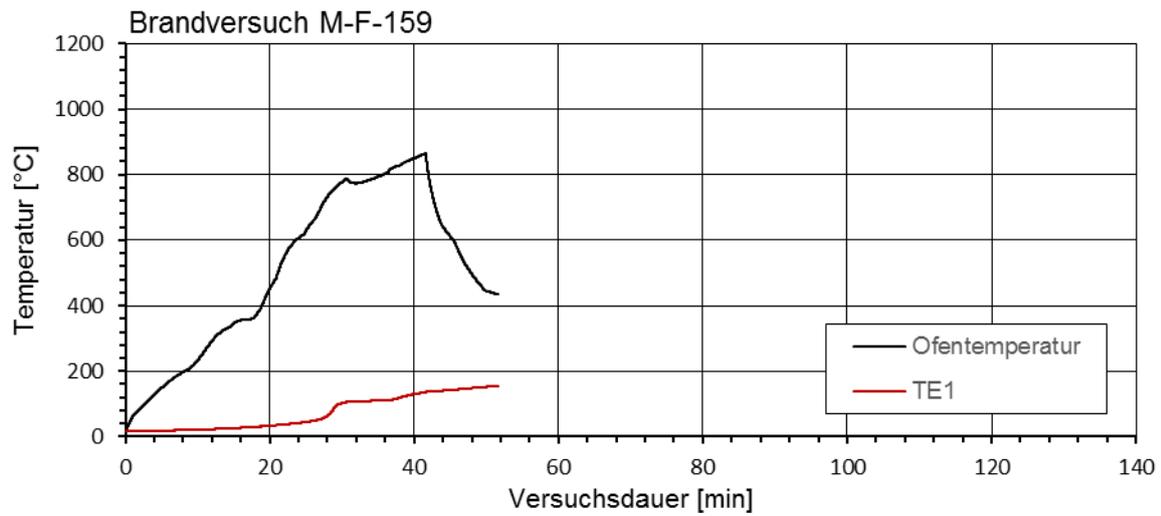


Abb. F2-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

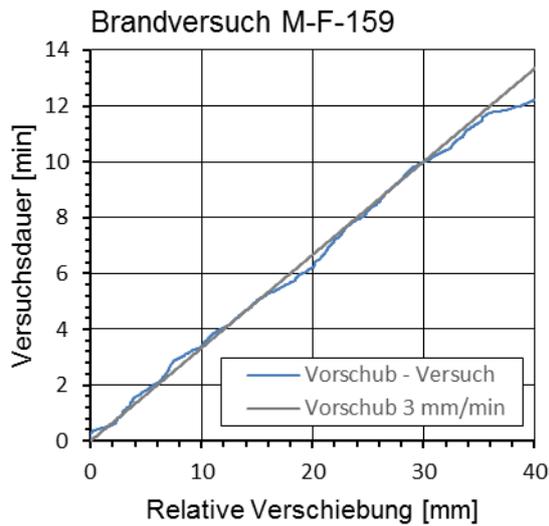


Abb. F2-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

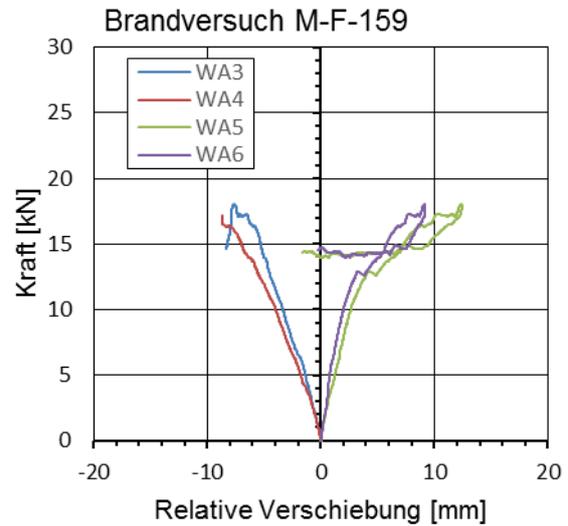


Abb. F2-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F2-4: Seitenansicht – Versagensbild

### Versuchsergebnisse - Brandversuch M-F-424

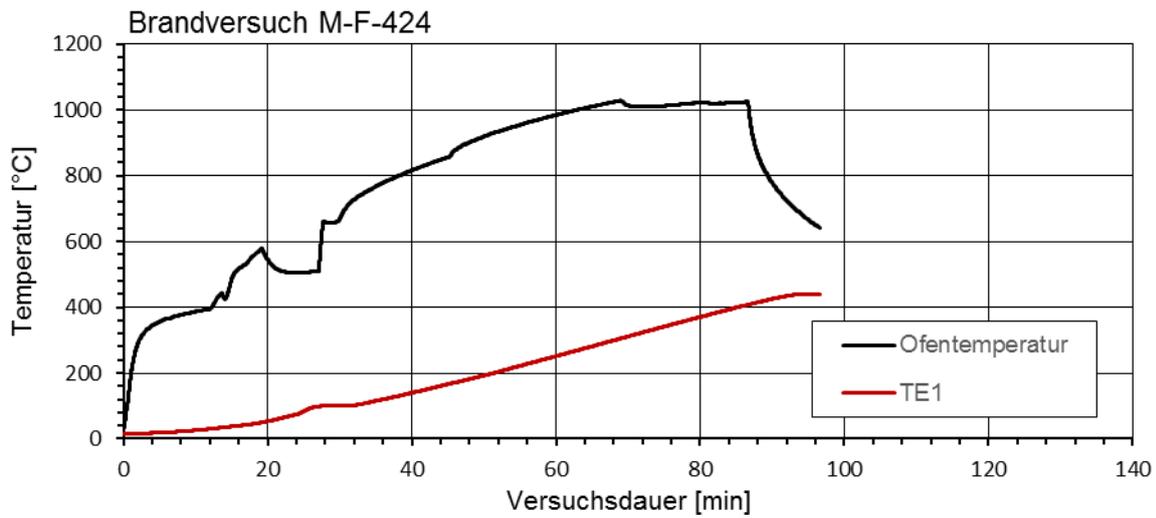


Abb. F3-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

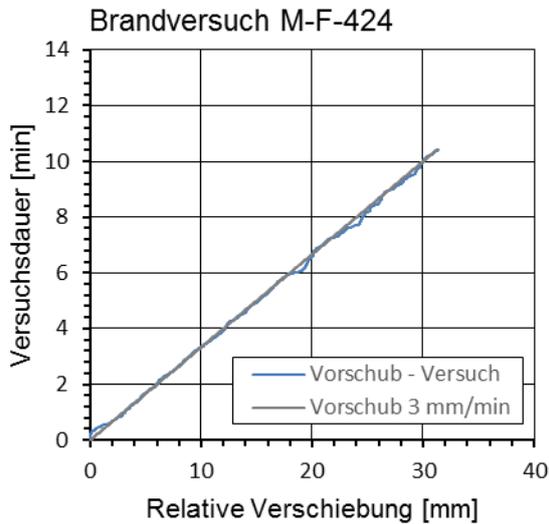


Abb. F3-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

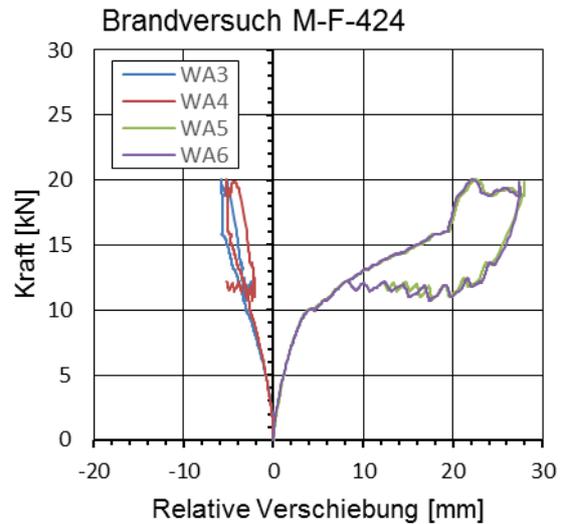


Abb. F3-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F3-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-F-437

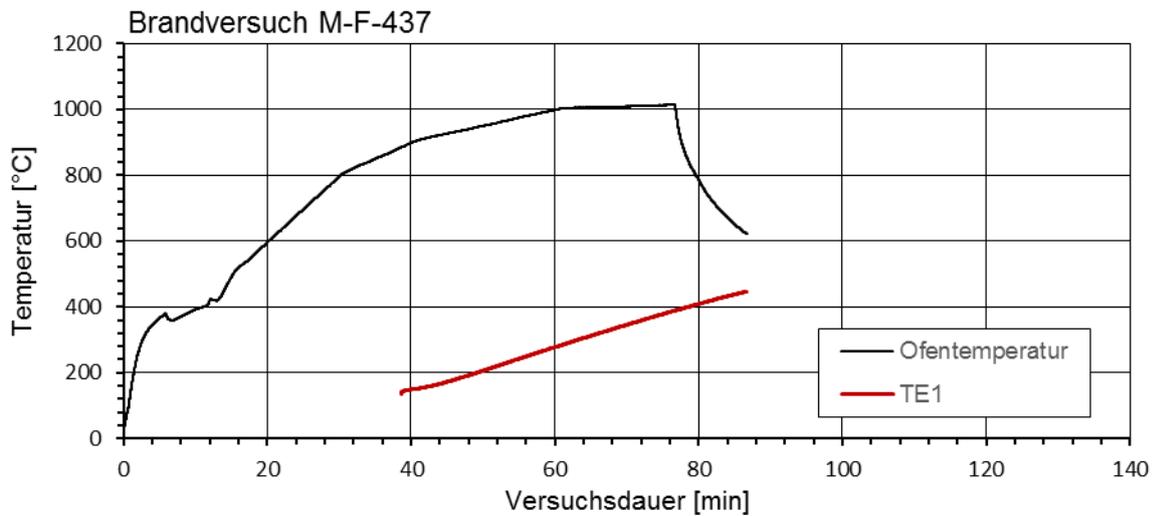


Abb. F4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

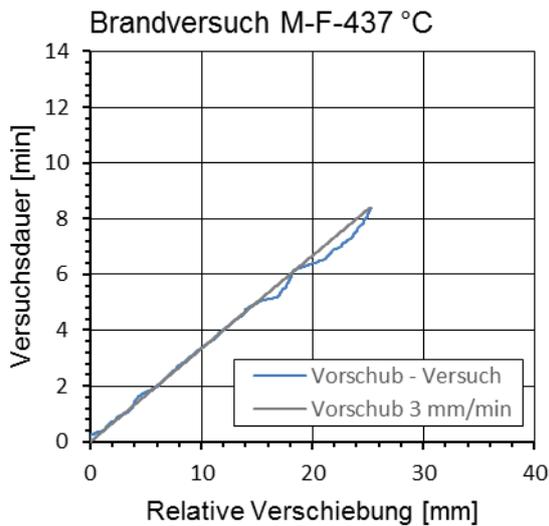


Abb. F4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

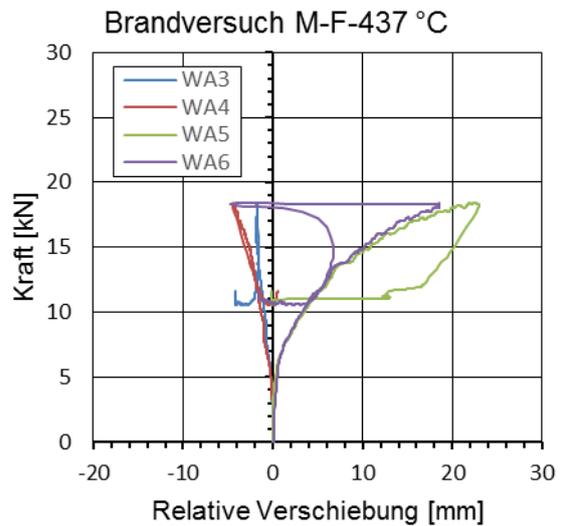


Abb. F4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-F-512

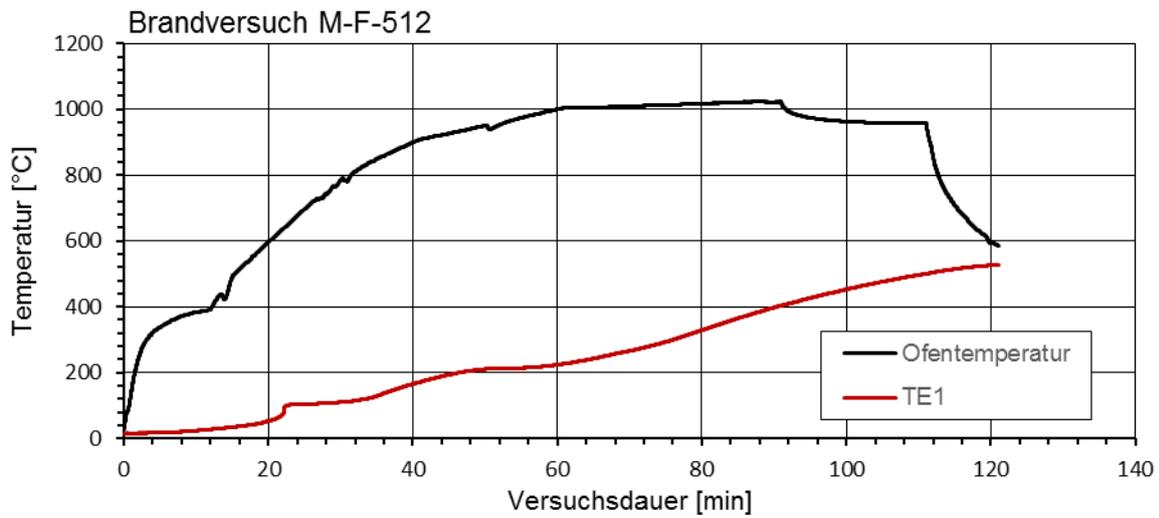


Abb. F5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

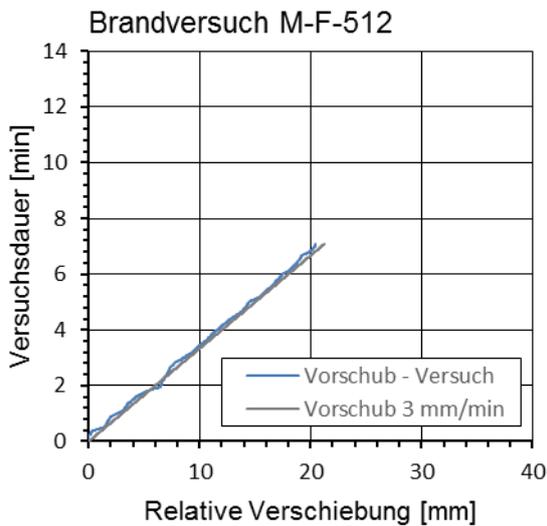


Abb. F5-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

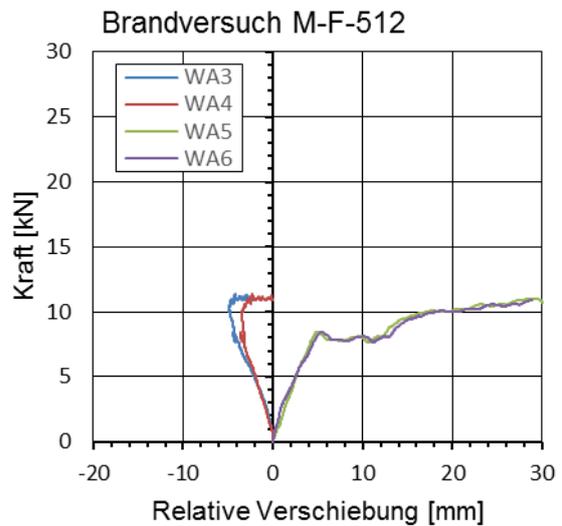


Abb. F5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-F-609

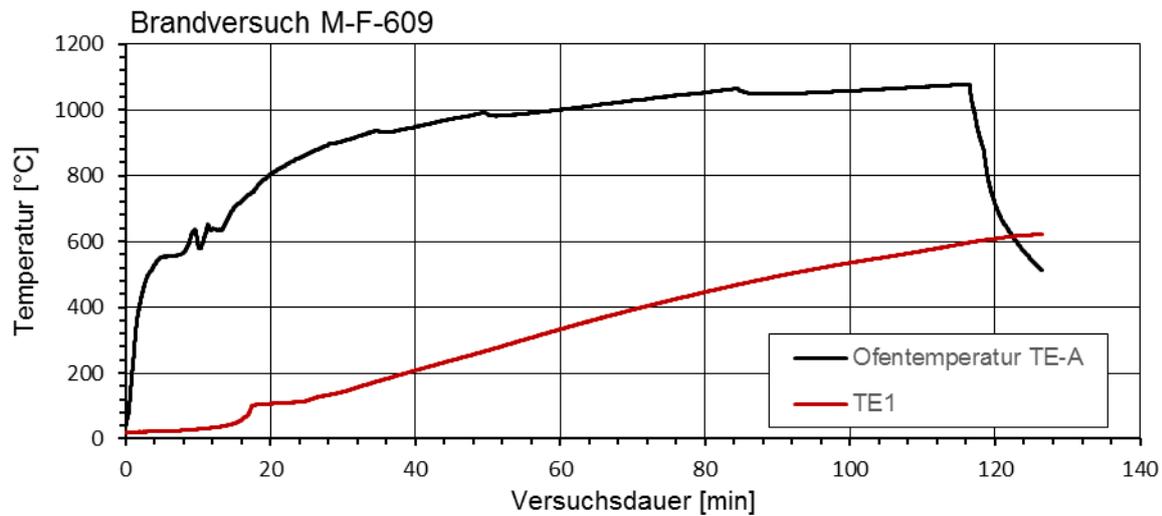


Abb. F6-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

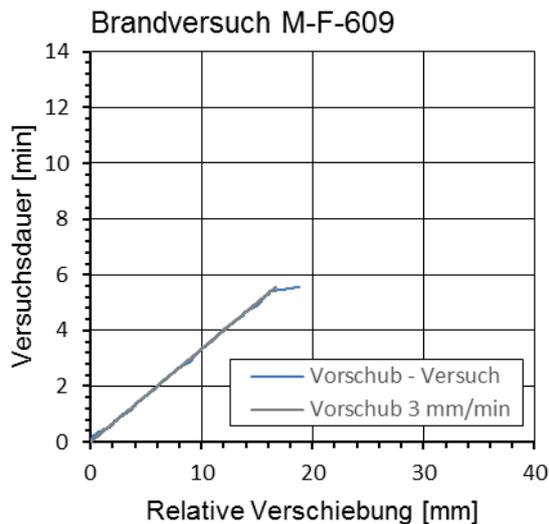


Abb. F6-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

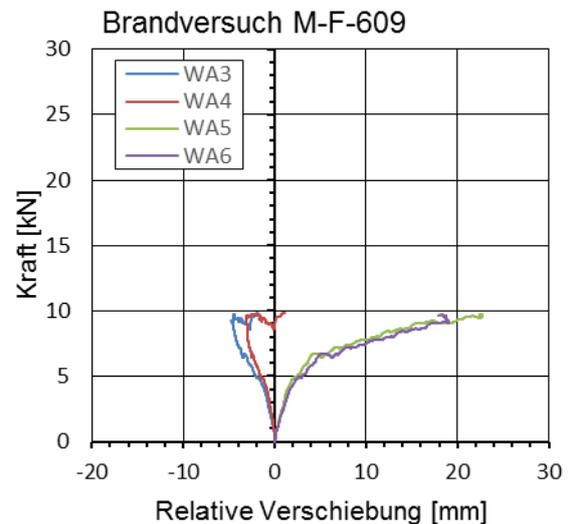


Abb. F6-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. F6-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Anhang G: Ergebnisse von Kleinbrandversuche – Versuchsgruppe M-P

### Versuchsergebnisse – Referenzversuche M-P-R1 und M-P-R2

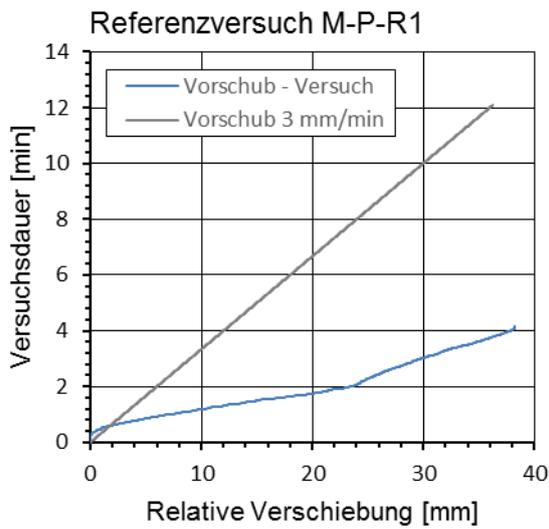


Abb. G1-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

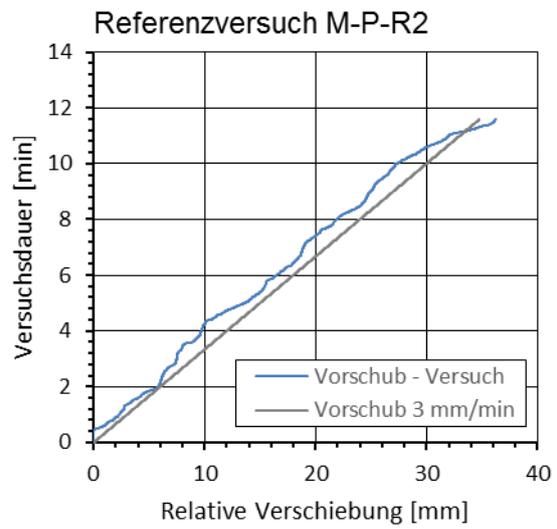


Abb. G2-1: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

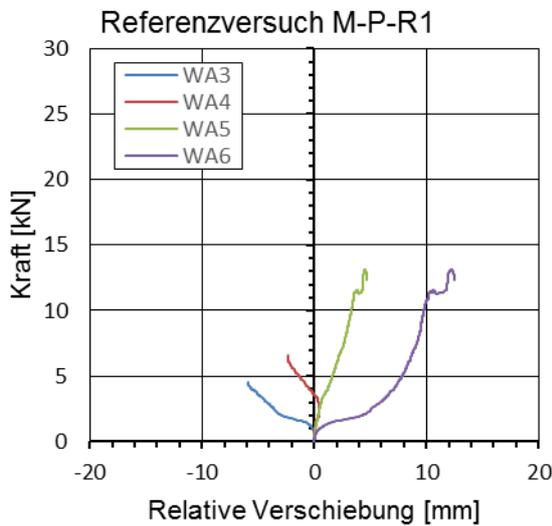


Abb. G1-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

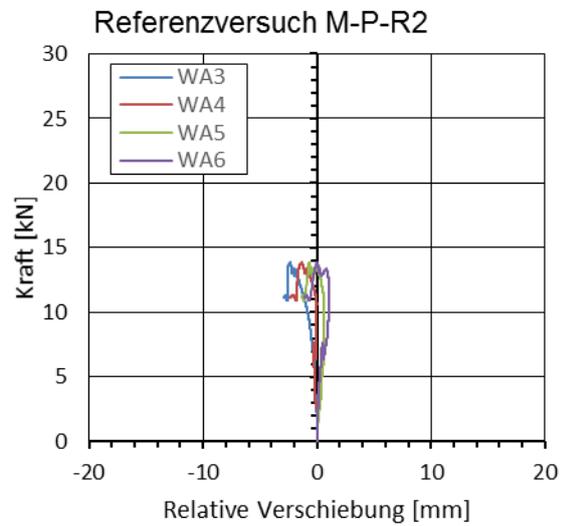


Abb. G2-2: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

Nicht vorhanden

Abb. G1-3: Seitenansicht – Versagensbild



Abb. G2-3: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-P-78

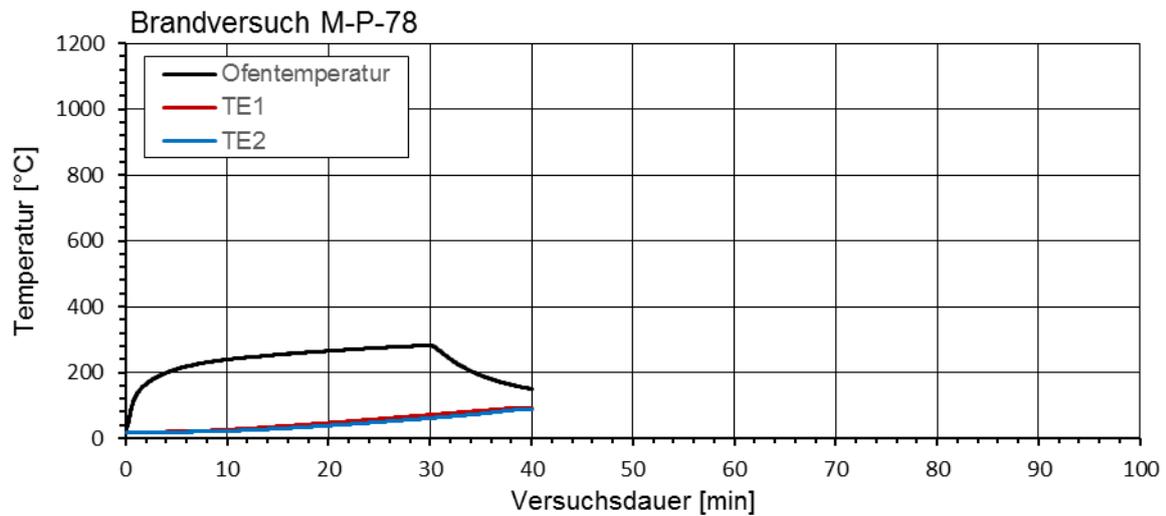


Abb. G3-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

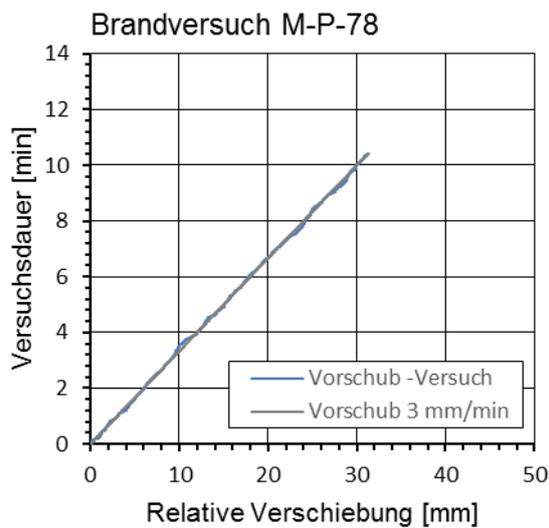


Abb. G3-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

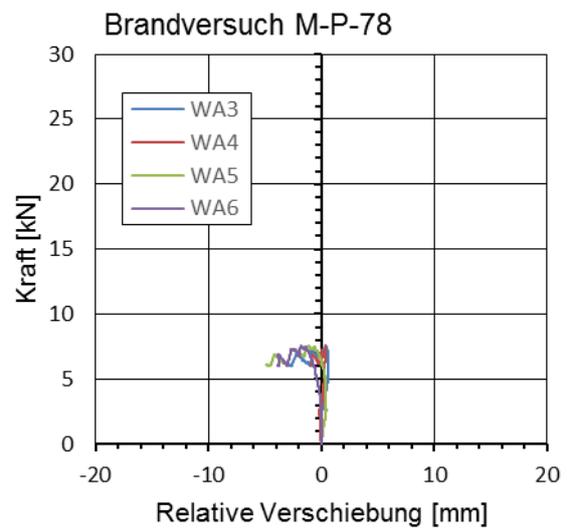


Abb. G3-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. G3-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-P-90

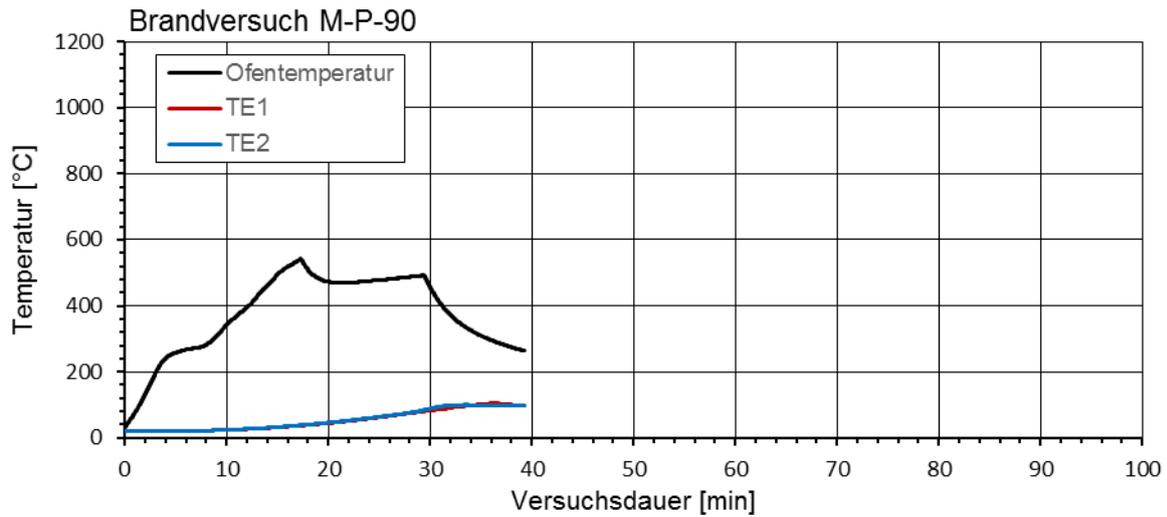


Abb. G4-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

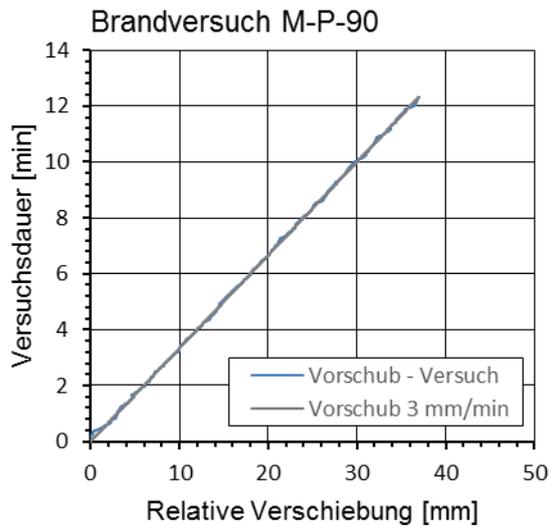


Abb. G4-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

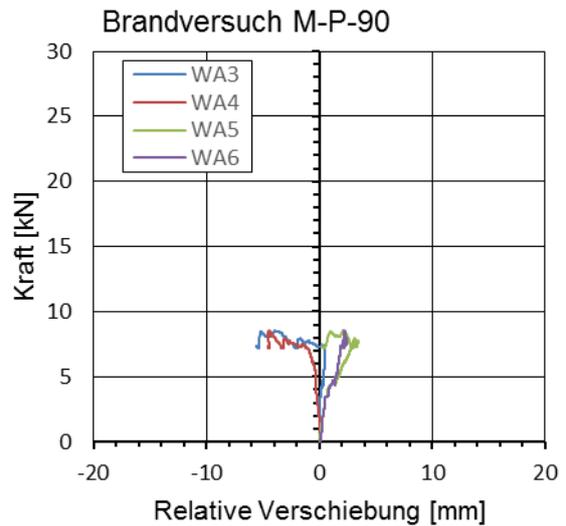


Abb. G4-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. G4-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-P-158

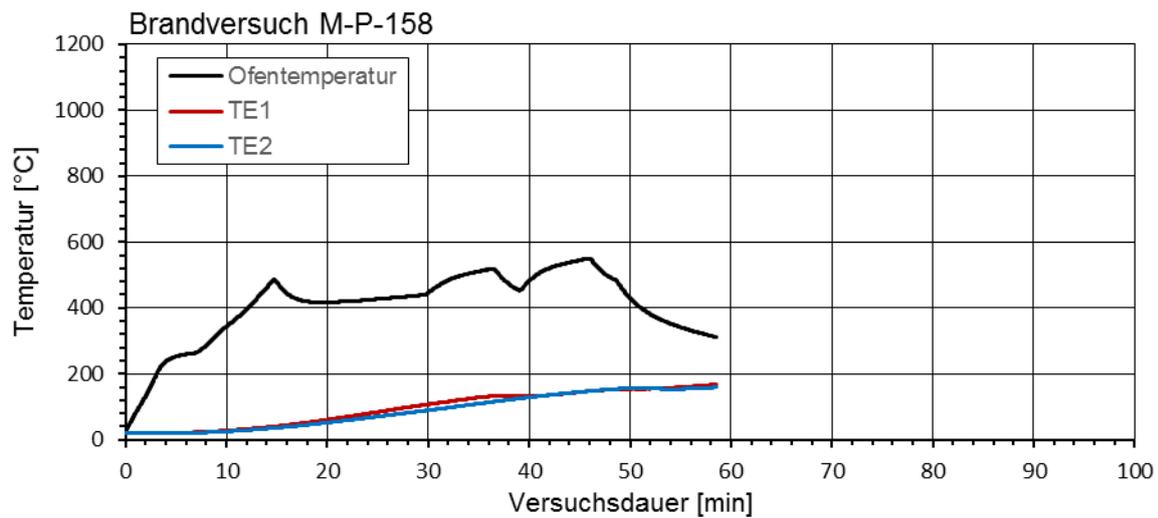


Abb. G5-1: Messwerte der Ofeninnentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

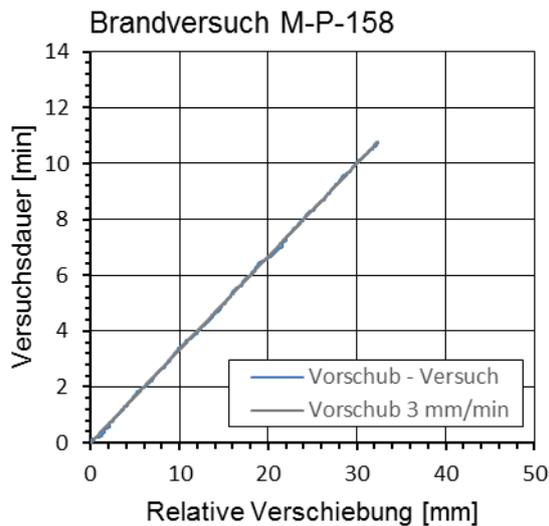


Abb. G5-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

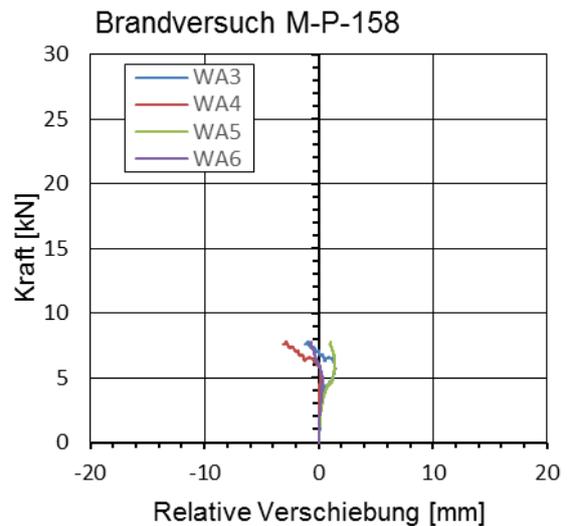


Abb. G5-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. G5-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-P-176

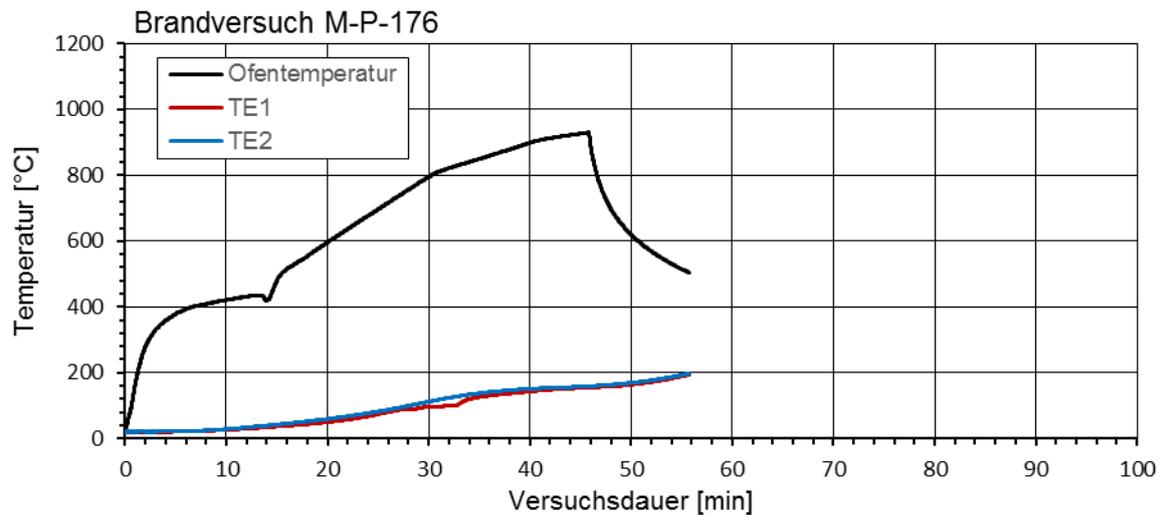


Abb. G6-1: Messwerte der Ofentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

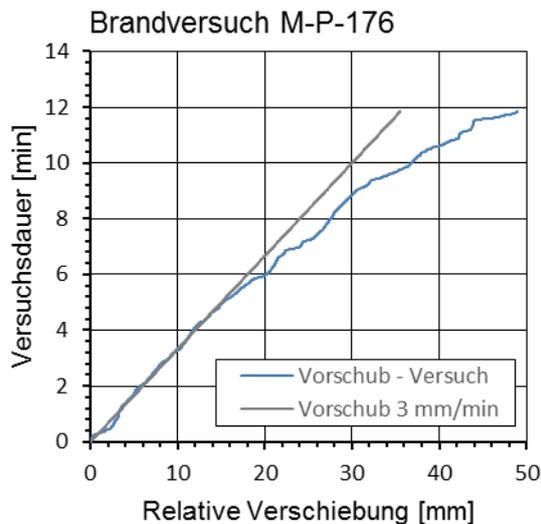


Abb. G6-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

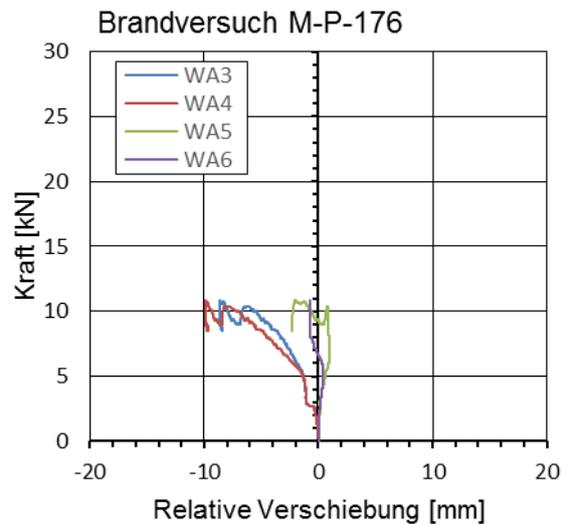


Abb. G6-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale

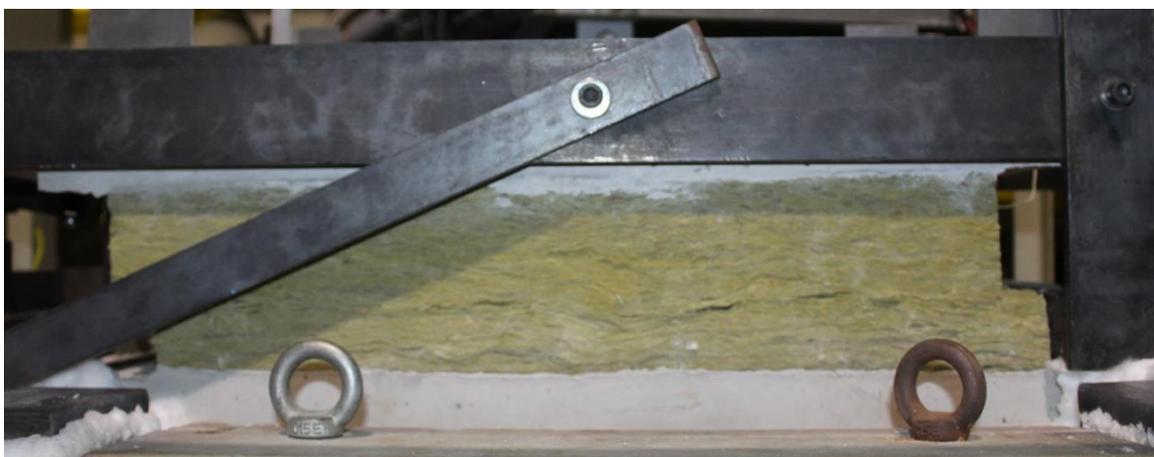


Abb. G6-4: Seitenansicht – Versagensbild

## Versuchsergebnisse - Brandversuch M-P-363

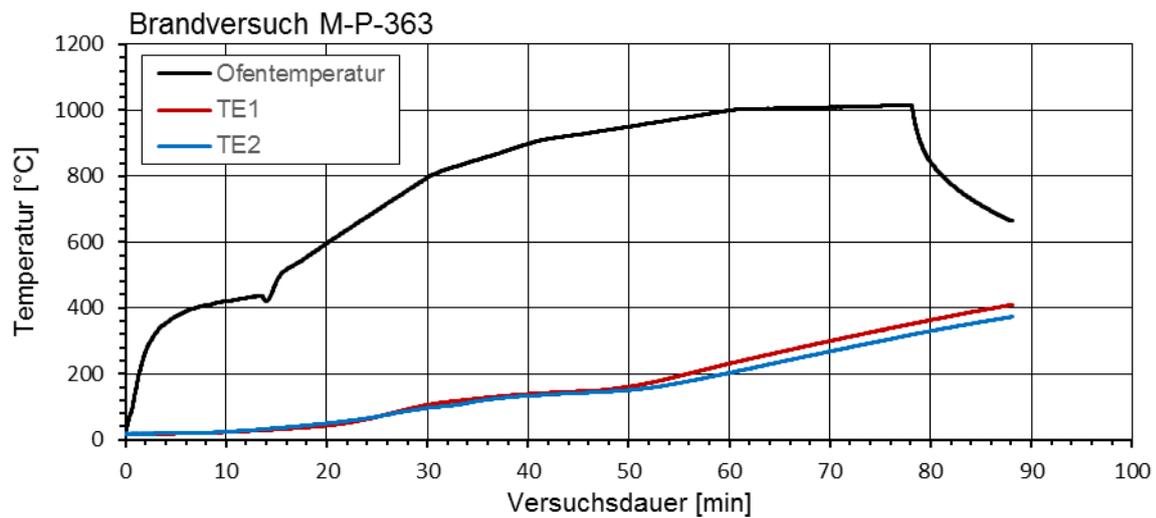


Abb. G7-1: Messwerte der Ofentemperatur (Mittelwert der Thermoelemente TE-A und TE-B) und des Temperaturanstiegs im Prüfkörper

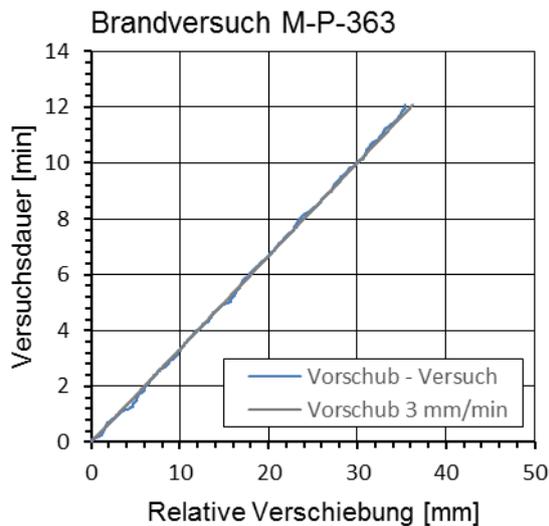


Abb. G7-2: Vergleich der Vorschubgeschwindigkeit im Versuch mit der Zielvorschubgeschwindigkeit 3 mm/min

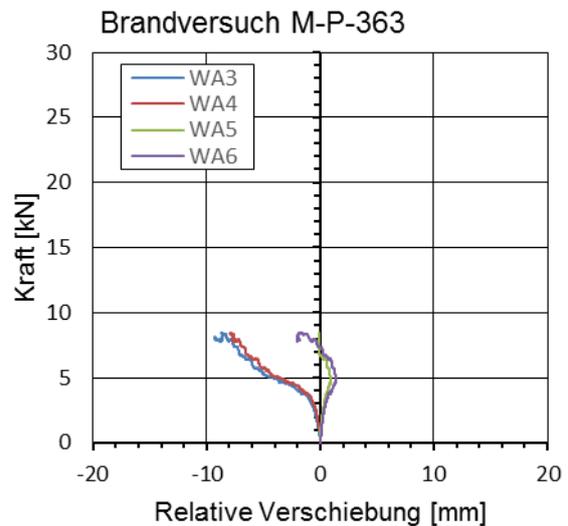


Abb. G7-3: Vertikale Verformungen der oberen Betonschale



Abb. G7-4: Seitenansicht – Versagensbild

## **Anhang H: Tagungsbeitrag**

In folgendem Kapitel ist der innerhalb des Projektes entstandener Tagungsbeitrag enthalten.

Haffke, M. M.; Pahn, M.; Thiele, C.: Fire Tests on the Pre-cast Concrete Sandwich Walls with GFRP Connectors, in: IABSE (Hg.), Report of the IABSE Symposium Guimarães 2019 - Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management, Guimarães, Portugal, Zurich, 2019, S. 759–766. ISBN 978-3-85748-163-5.



IABSE Symposium 2019 Guimarães  
Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal



## Fire Tests on the Pre-cast Concrete Sandwich Walls with GFRP Connectors

**Marcin M. Haffke, Matthias Pahn, Catherina Thiele**

*Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany*

Contacting author: [marcin.haffke@bauing.uni-kl.de](mailto:marcin.haffke@bauing.uni-kl.de)

### Abstract

Precast concrete sandwich panels are known for their inherently good thermal, acoustic and structural properties. When using glass fibre reinforced polymeric (GFRP) connectors coupling the concrete layers, excellent thermal properties and high structural stiffness can be achieved. However lack of knowledge on fire resistance of sandwich panels and fire behavior of GFRP connectors remain an important issue limiting their wider use in the construction. This paper presents results of fire tests performed on real size sandwich walls in terms of fire behavior of the GFRP connectors and its impact on fire resistance of the entire walls. All the three tested sandwich walls met the REI 120-M criteria for load-bearing fire walls. The connectors showed in general good fire resistance and did not contribute to fire spread. The tests delivered important information on structural behaviour of sandwich walls with GFRP connectors loaded with fire and vertical eccentric and impact load.

**Keywords:** GFRP connector; sandwich wall; fire tests; fire resistance; fire wall.

### 1. Introduction

Precast concrete sandwich panels (PCSP) with outer layers out of normal strength concrete have been used as exterior wall systems for many years and have proven themselves in practice [1-3]. The PCSP have a three-layer structure consisting of a concrete facing layer, a thermal insulation layer and a concrete load-bearing layer. There is a wide range of connector types available on the market [1,2]. The type of connectors finding more and more application in modern sandwich panels are various products made from glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite. Beside their good mechanical properties, they show excellent durability and thermal characteristics reducing thermal bridging [3], thus improving thermal characteristics of the whole wall.

Despite favourable properties of PCSP, considering their enhanced thermal characteristics, estimation of their fire resistance awakes questions considering behaviour of their components in fire. Especially fire behaviour of non-metallic

connectors, degradation of their stiffness and strength as well as their anchorage strength and potential damage of concrete wythes by melted or pulled out connectors remain a serious concern. Assessment of GFRP connectors' fire performance is difficult due to number of their possible forms and materials used. Another difficulty is the standard assessment methods adopted in the testing codes tailored for flat surface materials [4]. The actual performance of such connectors should be tested in the conditions similar to their real-case application of limited oxygen influx and under load, as it is the case in a real wall. There are no codes and only limited published research, according to the author's knowledge, addressing estimation of fire resistance of concrete sandwich panels. [5, 6].

Considering the described issues, the aim of the experimental work is an analysis of:

- fire resistance of sandwich panels with GFRP connectors. Adopted test procedure is following the standardised fire wall tests. The

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

behaviour of sandwich wall and its components is tested and analysed taking into account REI-M [7] requirements for load-bearing fire walls.

- fire behaviour of GFRP connectors. The time to failure and degree of their mechanical contribution and anchorage safety in fire should be analysed. Finally their behaviour in terms of combustibility, fire spread and smoke evolution as well as the influence of connectors on structural performance of concrete wythes should be assessed. Melted connectors can leave empty voids in wythes degrading space-enclosing function of a wall. The influence of connectors' presence on heat-induced spalling of surrounding concrete also should be investigated.

This paper presents an experimental investigation conducted on energy-efficient pre-cast concrete sandwich panels with GFRP connectors subjected to fire, vertical eccentric and impact load.

## 2. Experimental investigations

The tests described in this paper are aimed at investigation of the fire resistance of steel-

reinforced concrete sandwich walls with GFRP pin-shaped connectors.

### 2.1 Specimens

In accordance with DIN EN 1365-1 [8] the test specimen had dimensions of width x height = 3000 mm x 3000 mm. The tested sandwich walls consisted of three layers: a load-bearing and a facing wythes out of steel-reinforced concrete and a core layer out of mineral wool thermal insulating plates and GFRP connectors (see Fig. 1).

The test specimens were stored more than 100 days after manufacturing and protected against rainfalls. Concrete compressive strength of  $55,78 \pm 1,95 \text{ N/mm}^2$  was determined short before the fire tests on four standard test cubes stored in the same conditions as the specimens. The concrete layers were manufactured as steel-reinforced concrete wythes. The steel reinforcement of each concrete wythe was the standard steel grid Q188A with cross-sectional area in both directions equal to  $1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$ , placed in the middle of the cross-sectional depth of the wythes.

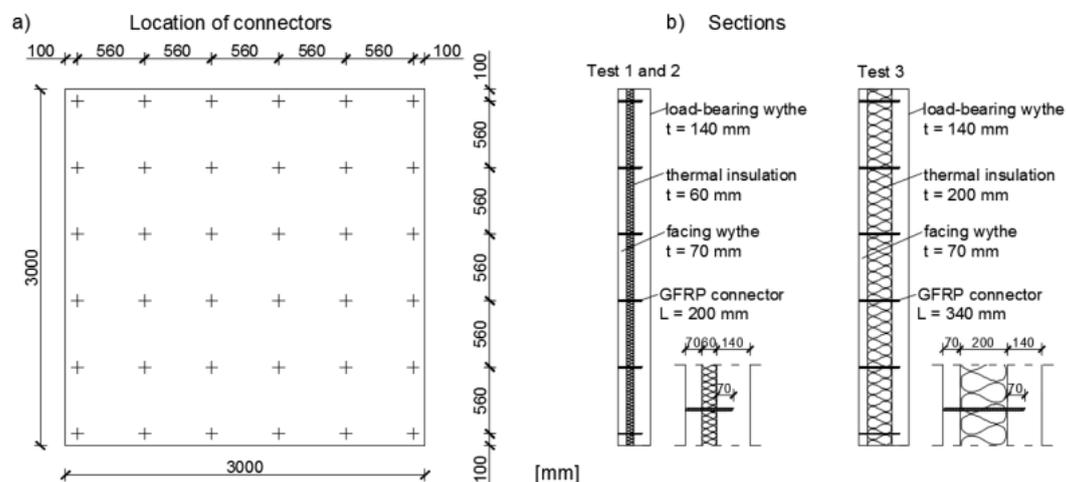


Figure 1. Test specimens; a) location of the connectors in the walls, b) sections of the sandwich test walls

Compression-resistant mineral wool in form of plates manufactured with thickness of the

designed insulation layer (equal to 60 mm in Test 1 and 2 and to 200 mm in Test 3) was applied.

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

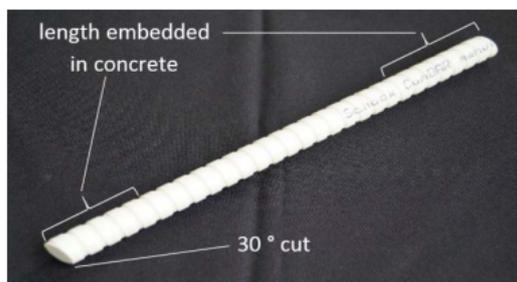


Figure 2. Shear connectors used to link the concrete wythes together

The mechanical connection of both concrete layers and their constant distance are ensured by pin-shaped connectors Schöck Thermoanker TA-H-Ø12-30° made from glass fibre reinforced polymer with diameter Ø12mm (see Fig. 2). The location, number and anchorage length of the connectors are the same for all three test specimens. The connectors are cut at the ends at an angle of 30° and their mechanical connection to concrete is ensured by embedment in concrete during casting.

## 2.2 Specimen configuration

The test programme is comprised of three tests on sandwich walls where the side of the panel exposed to fire and the thickness of the insulation layer were the varying parameters. Each test represents one critical configuration for an analysed wall component described following (see Fig. 3). Since the concrete wythes are of a different thickness, fire exposure of each side loads connectors in a different way, and therefore both cases were tested. Since different thickness of the insulation layer results in a different temperature increase in connectors and loading during fire, the two representative limit cases were tested; thin and thick insulation; 60 and 200 mm respectively.

When the amount of connectors per wall square meter stays constant, increase of the insulation thickness leads to decrease of the degree of composite action. This is the result of a lower shear stiffness of connectors with longer free length. Specimens 1 and 3 differing in the thickness of the insulation layer are designed to demonstrate this influence on performance of PCSP with GFRP connectors during fire. The thermal-depended decrease of connectors stiffness or exceeding of

their melting point can result in highly reduced or entirely lost composite action between the concrete wythes during exposition to fire or loosing of structural integrity and fall-off of the facing layer from the load-bearing layer. Those possibilities, as crucial for the fire resistance and safety, should be analysed.

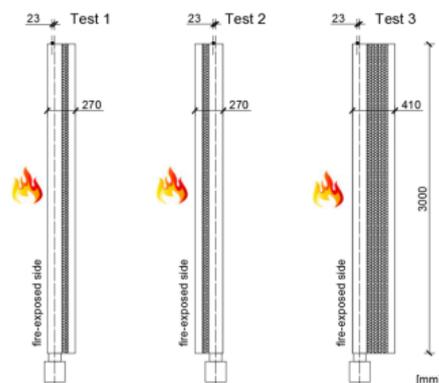


Figure 3. Vertical test set-up and location of the eccentric vertical loading

The geometry of the specimen 2 was identical as of the specimen 1. The difference was in the side of the wall exposed to fire. Facing wythe commonly not taking any structural function in sandwich walls is usually of a much lower thickness. In fire situation very thin facing wythe can lead to relatively fast increase of temperature in connectors and degradation of their thermal properties leading to decrease of composite action of the panel or potentially dangerous fall-off of the facing wythe. In this case any degradation of concrete by fire or heat-induced spalling of concrete leads to significant losses of connectors' anchorage capacity. It should be mentioned that the test configuration, where the facing layer is exposed to a fully developed fire, is of a lesser probability to occur, however possible in case of a building extension when an already existing part of a building is supposed to change the function and an external wall becomes an internal wall. In order to test all three specimens in the most unfortunate conditions in each case full fire curve was applied.

## 2.3 Test set-up and procedure

The adopted testing procedure was following the requirements of testing standards DIN EN 1365-1

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

[8] describing test configuration for fire testing of load-bearing walls and DIN EN 1363-1 [9]. The deformations of the walls and temperature at measurement points as well as potential smoke development and general behaviour of walls were monitored during the tests. After fire exposition time of 120 min burners were turned off and three impact loadings were carried out. After approx. two days of cooling down condition of the walls and fire induced damages were analysed.

The fire loading was following the uniform-temperature-time-curve (UTTC) according to ISO 834-1:1999 [10]. The furnace internal temperature was monitored and regulated with six standard plate thermocouples placed approximately 10 cm away from the fire-exposed surface of the sandwich wall.

In each test the load-bearing wythe is placed directly on the testing frame on a 1-2 cm layer of mortar while the facing wythe remains suspended, held only by connectors and bond to thermal insulation which represent common application of PCSP. Such support conditions provide more severe testing conditions since failure of the connectors

can lead to catastrophic failure of fall-off of the facing wythe. The steel full cross-section bar 15 x 15 mm is mortared onto the top edge of the load bearing wythe which is used then as a load introduction. Flexible, relocatable sealing was provided along the vertical gaps between the wall and the testing frame.

The loading of the specimens during exposition to fire was carried out as an eccentric vertical load and applied as a linear uniformly distributed load onto the load-bearing wythe with offset one sixth of its thickness ( $140/6=23$  mm) (see Fig. 3). The line load of 52 kN/m related to the load from upper storey was adopted. The impact load of 3000 Nm simulating impact of falling deck girders in fire was applied after fire loading.

The temperature on the flame-unexposed side was measured with 9 type K thermocouples (TC 1-9) with precision of  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Fig. 4. shows the location of thermocouples. The thermocouples TC 1-5 were used for determining of the mean temperature increase, while the thermocouples TC 6-9 served for determining of the maximal temperature increase on the fire un-exposed side.

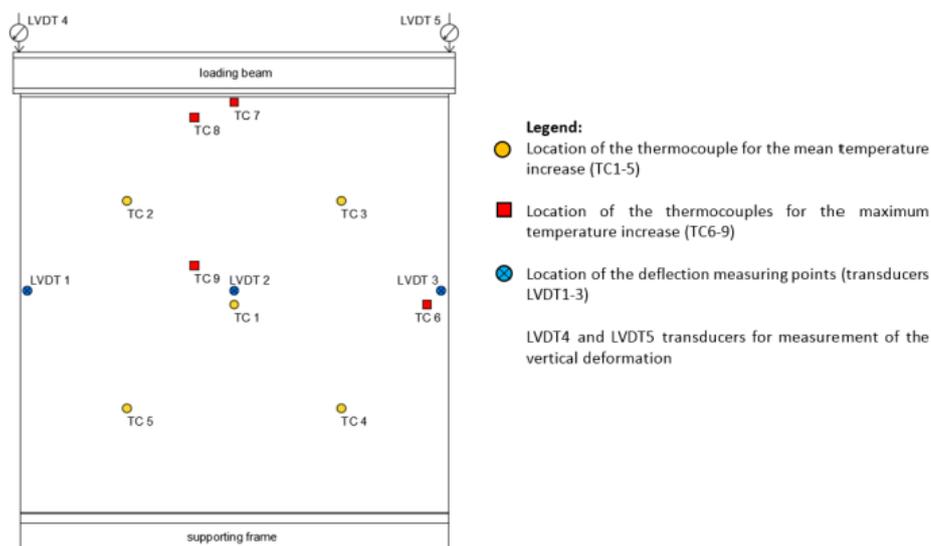


Figure 4.

Locations of the temperature and deformation measuring points

The thermocouples TC 8 and TC 9 were placed in each test at the positions of connectors in the most

upper and the middle connectors' row to measure the maximal temperature under consideration of the potential thermal bridges due to presence of the connectors.

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

The deformations of the walls were measured with linear variable inductive transducers (LVDT). The horizontal deformations were measured at the three points at the height of 1500 mm of the wall, namely in the middle (LVDT 2) and on both, left (LVDT 1) and right (LVDT 3) edges. The location of the measuring points is shown in Fig. 4. The vertical deformations were measured on both, left (LVDT 4) and right (LVDT 5) side of the top of the wall (see Fig. 5). The 400 kN load cell was used to monitor and record applied vertical load throughout the fire exposure time and impact loading phase. All data records were taken at the frequency of 0,2 Hz.



Figure 5. Loading setup for eccentrically loaded fire tests

### 3. Test results and discussion

All three tested sandwich walls fulfilled the REI requirements through 120 minutes of the fire exposure time and withstood the subsequent three impact loadings without showing any substantial damage (criterion M) regarding the criteria set to maintain fire resistance. Following, the observations made during the fire tests and in approx. two days after tests on the cooled-down specimens are described. The structural and thermal performance of the walls during fire loading was analysed regarding requirements set for fire walls. The assessment of the connectors' structural performance during and after fire was made.

#### 3.1 Out of plane behaviour

One-side fire exposition of a concrete wall resulting in heat-induced bowing of the wall is expected to be larger in case of sandwich walls as in case of solid concrete walls of the same thickness due to larger temperature gradient between fire-exposed and un-exposed side. In each test a clear deflection of the wall inwards, in the direction of the furnace, was observed. The recordings of horizontal deflection are shown in Fig. 6. In case of each test an intensive deformation phase can be seen in the period 7-35 min after furnace ignition, after which the walls experienced some deformation stabilisation phase. The observed deflection was caused by heat-induced expansion of concrete and steel reinforcement of the fire-exposed wythe, which being restrained by the second wythe induced deflection of the panel to accommodate the distribution of strains. The relatively small (2-4 mm) initial deflection in case of Test 1 was caused by short pre-heating of the furnace, caused by technical problems with furnace controller.

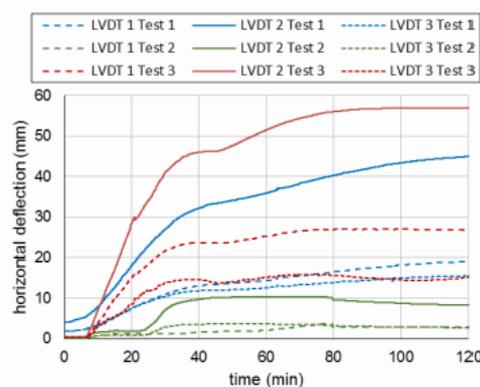


Figure 6. Horizontal deformations

The largest deflection in case of the specimen 3 (56,89 mm) is deemed to be caused by two effects. The thickness of insulation layer in this case equal to 200 mm and therefore lower shear stiffness of connectors resulted in lower degree of composite action leading to lower flexural stiffness of the wall.

As expected the deflection of specimen 2 (10,23 mm) was the smallest due to significantly smaller thickness of the fire-exposed facing wythe. Lower temperature gradient resulting from the smaller

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

thickness induced relatively smaller thermal bowing of the fire-exposed wythe than in Tests 1 and 3. Relatively lower stiffness of facing wythe as well as its partial disconnection from the load-bearing wythe and concrete cover spalling resulted in little imposed deflection of the wall in Test 2 until time of 25 min, when the gradually heated load-bearing wythe started to thermally bow itself.

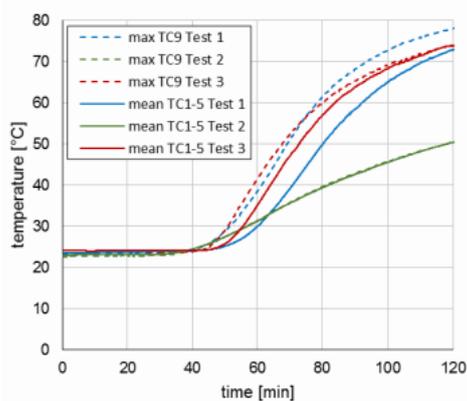


Figure 7. The maximal temperature TC9 and mean temperature TC1-5 on the fire-unexposed side

The maximal temperatures on the fire-unexposed side were observed for each specimen at the positions of the connectors in the middle of the wall - thermocouple TC9. Figure 7 shows the recorded the max (TC9) and the mean (mean value of TC1-5) temperatures. It can be observed that thermal bridging by connectors contributed to some extent to the heat transfer to the fire-unexposed side in Test 1 and 3 and was negligible in Test 2 where the connectors were not fully protruding the fire-unexposed wythe (see Fig. 1). However magnitude of this effect is relatively small and tends to decrease when the wall heats up.

### 3.2 GFRP Connectors

The Specimens were cut after fire test throughout their height in order to investigate the post-fire

condition of the connectors (see Fig. 8). In general in all three walls the connectors in the most upper and the most bottom row (position A) did not show visible thermally induced damage and remained in original colour and shape, while connectors of the inner rows (position B) experienced more or less heavy damage due to exposition to high temperatures.

Visual inspection showed that the connectors in specimen 1 and 3 in position B were significantly damaged in the part close to the fire-exposed wythe. In that section they were partially carbonated and close to the concrete surface of the fire-exposed wythe the resin was partially removed so the glass fibres stayed continuous and firm only partially confined in resin. The carbonation and general damage picture was, however, much more severe in case of specimen 3 where the connectors were carbonated up to ca. 7 cm depth than in specimen 1 where the same level of visual carbonation was visible only ca. 2 cm depth measured from the concrete surface of fire-exposed load-bearing wythe. In case of specimen 1 connectors at the whole visible length between concrete wythes were solid and in the original shape. Importantly, the connectors taken out of the middle of the specimen 1 and 3 after fire were still firm and rigid.

Much more severe damage of connectors was observed in case of Specimen 2 where only the 7 cm thick fire-exposed facing wythe was protecting connectors from heat. In this case the resin of the connectors in position B was melted throughout their entire length embedded in the facing wythe and up to ca. 5 cm of their free length. The serious carbonation was visible on the whole (6 cm) free length. The glass fibres remained intact. The melted connectors, however, could not continue to fulfil their load-bearing function in this case. The facing wythe was supported only by the connectors at the most upper and the most bottom edge of the wall.

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

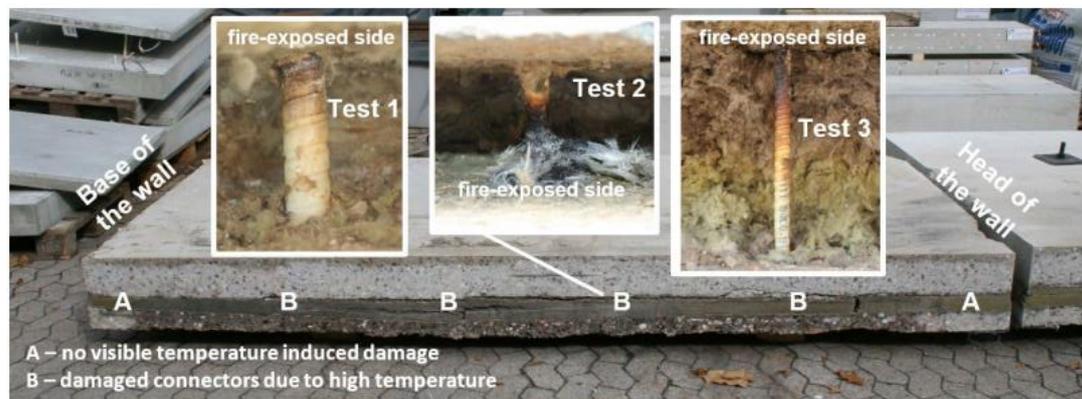


Figure 8. Location of the damaged connectors in the cut sandwich wall after fire tests; exemplarily specimen 2 and typical damage state of connectors for each specimen

No spalling-initiating effect caused by presence of connectors was observed. In the opposite, in Test 2 areas surrounding positions of the connectors experienced smaller or no spalling comparing to the areas farther from connectors' location. This can be caused by lower pore pressure around empty space left by melted connectors, where moisture could escape the concrete. In case of the test specimen 2 empty spaces left after the melted connector and concrete spalling were visible in the facing wythe. Spalling of concrete outer surface occurred in Test 2 and 3 up to the depth of ~4 cm in 15 to 20 minutes after furnace ignition. As a result of good thermally- insulating properties of insulation layer the temperature in the cross-section of the fire-exposed wythe rises faster and higher than in case of single concrete slab of the same thickness. Sudden and high increase of the temperature in concrete leads to high pore pressure and compressive stress on the fire-exposed side leading to spalling. No spalling in case of the specimen 1 can be caused by differences in moisture content of concrete, caused probably by different conditions during curing and drying time, which have not been recorded.

#### 4. Conclusions

The experimental work presented in this paper was aimed at investigation of the fire resistance of sandwich walls with the GFRP connectors. The structural behaviour of sandwich walls has been tested under vertical eccentric loading, exposition to fire and subsequent impact load on three one-

storey size specimens. The structural behaviour of the sandwich walls in fire was tested and evaluated according to the european fire resistance classification concept and in terms of the thermal and structural performance of insulation and connectors under fire load. All the REI requirements have been met during 120 minutes of fire loading and the walls withstood the impact loading (criterion M).

The connectors in the central position of the specimens 1 and 3 experienced significant heat-induced damage, but remained firm and still were able to mechanically couple both wythes. In the specimen 2 the connectors melted through the entire thickness of the fire-exposed facing layer. However also in this case the wall maintained its structural integrity, mainly due to still mechanically bearing connectors at the perimeter of the wall.

Melted connectors left an empty space in the fire-exposed wythe in the Test 2. It was observed that at a few spots on the fire-exposed facing wythe after Test 2 the area surrounding the empty voids left by the melted connectors did not spall during test, what can suggest that the moisture was able to escape through the places left by connectors lowering the pressure in concrete. The empty voids, however, did not lead to any additional expansion of flames and panels could continue its space-enclosing function.

Therefore it can be deemed that the presence of the connectors does not contribute to the concrete spalling but on the opposite, can have a hindering

IABSE Symposium 2019 Guimarães: *Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*  
March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

influence on the surrounding concrete. In all tests connectors remained intact in the fire-unexposed wythe and did not create any empty voids protruding the concrete wythes. Therefore the structural integrity and the space enclosing function could be fully maintained. No smoke development has been observed. Also no indication of the potentially dangerous fall-off of the facing wythe in Test 2 was recorded. Curvature induced cracking of fire-unexposed wythes was observed in Test 1 and 3.

The structural coupling of concrete wythes provided by the shear stiffness of discrete connectors and insulation was found effective even in case of the Test 2 where the fire-unexposed load-bearing wythe, being insulated by facing wythe and insulation layer experienced intensive thermally-induced bowing. This indicates that the contribution of thermal insulation and facing wythe to the flexural stiffness and stabilising function can be significant even in a fire situation. The observed flexural behavior of the walls suggests maintaining of some degree of composite action throughout the fire testing time and during the mechanical impact loading. The degree of this contribution requires further investigation in terms of its magnitude in function of temperature and material type.

## 5. Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support of the German Government (Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung) Project No. SWD-10.08.18.7-17.25 as well as Schöck Bauteile GmbH and Fehr Technologies Deutschland GmbH & Co. KG for providing materials and preparation of the specimens.

## 6. References

- [1] Precast/Prestressed Concrete Institute. *State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels*. Chicago; 2011.
- [2] Pahn M. Beitrag zur Ermittlung von Schnitt- und Verformungsgrößen bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern; 2011.
- [3] FIB bulletin 84. Precast insulated sandwich panels. International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne; 2017.
- [4] Deutsches Institut für Normung e. V.. DIN EN 13823. Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by single burning item. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 02.2015.
- [5] Schmitt A, Carvelli V, Haffke M M, Pahn M. Thermo-mechanical response of concrete sandwich panels reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. *Structural Concrete*. 2018;19(3): 839-850.
- [6] Hulin T, Hodicky K, Schmidt J W, Stang H. Experimental investigation of sandwich panels using high performance concrete thin plates exposed to fire. *Materials and Structures*. 2016; 49: 3879–3891.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V.. DIN EN 13501-2. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten-Teil2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 12.2016.
- [8] Deutsches Institut für Normung e. V.. DIN EN 1365-1. Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile –Teil 1: Wände. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 08.2013.
- [9] Deutsches Institut für Normung e. V.. DIN EN 1363-1. Feuerwiderstandsprüfungen –Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 10.2012.
- [10] International Organisation for Standardization. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. 09.1999.