

# Brandschutztechnische Abschottungen für den Holzbau

Grundlagen zur Entwicklung einer Massivholz-Normtragkonstruktion

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades *Master of Science* an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.



[Quelle: Eigene Aufnahme]

Lehrstuhl

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

Betreuer

Dr.-Ing. Norman Werther  
Dr.-Ing. Michael Merk

Eingereicht von

Andreas Dengl, B.Eng.

Eingereicht am

31. Januar 2023, in München

# Vorwort

Die vorliegende Masters Thesis entstand im Zeitraum von August 2022 bis Januar 2023. An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masters Thesis beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern auf Seiten der Universität Norman Werther und Michael Merk sowie auf Seiten des Praxispartners Simon Haas und Markus Schneider für die vielen anregenden Diskussionen bei der Vorbereitung, Durchführung, Auswertung und Interpretation der Brandversuche.

Für die Hilfe und tatkräftige Unterstützung beim Zusammenbauen der Prüfkörper und bei der Durchführung der Prüfung möchte ich mich beim ganzen Team der Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH in Kaufering bedanken. Ohne eure Hilfe wäre es vor Allem zeitlich nicht möglich gewesen, die Prüfkörper rechtzeitig vorzubereiten und anschließend die Tests durchzuführen.

Ein herzlicher Dank geht an meine Kollegen und Vorgesetzten der Gumpp & Maier GmbH, die mir nicht nur in der Zeit der Masters Thesis, sondern die ganzen zweieinhalb Jahre des Masterstudiums den Rücken freigehalten haben, auch wenn sich die Fertigstellung länger gezogen hat als ursprünglich geplant. Ebenfalls ein herzliches Danke an Kati und Max fürs Korrekturlesen.

Zuletzt danken möchte ich meiner Familie, insbesondere meiner Mutter, die mich, trotz vieler Widerstände, immer unterstützt hat, meinen Weg zu gehen. Danke!

*München, 31. Januar 2023    Andreas Dengl*

# Kurzfassung „Brandschutztechnische Abschottungen für den Holzbau“

Der Nachweis des Feuerwiderstandes hinsichtlich der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses nimmt eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung der brandschutztechnischen Schutzziele ein. Im Zuge einer ganzheitlichen Betrachtung des Feuerwiderstandes müssen neben der Konstruktion selbst die zugehörigen Bauteilfügungen und Durchdringungen der haustechnischen Anlagen beachtet werden, um sicherzustellen, dass der Feuerwiderstand trotz des Einbaus von Kabeln, Rohren oder Lüftungsleitungen erhalten bleibt.

Für den Nachweis von Abschottungen stehen auf europäischer Ebene die Prüfgrundsätze der DIN EN 1366-3 zur Verfügung, welche primär für Abschottungssysteme in Massiv- und Trockenbaukonstruktionen entwickelt wurden. Für diese Bauweisen stehen Norm-Tragkonstruktionen zur Verfügung, die eine breite Anwendung auf Basis von einzelnen Prüfungen ermöglichen. Im Gegensatz dazu existieren keine Norm-Tragkonstruktionen für Holzbauteile wie beispielsweise Brettsperrholzkonstruktionen. Dies erschwert die bauordnungsrechtliche Anwendung, da meist nur der spezifisch geprüfte Gegenstand abgedeckt ist und die Ergebnisse nicht übertragen werden können. In verschiedenen Forschungsvorhaben konnte der Laibungsbereich als kritische Stelle für einen Durchbrand identifiziert werden. Dieser wird daher meist mit einer Bekleidung aus Gipswerkstoffplatten ausgeführt, was jedoch zu einem erhöhten Aufwand führt.

Um Grundlagen für die Entwicklung einer Norm-Tragkonstruktionen aus Massivholz ohne Laibungsbekleidung zu schaffen, wurden die technischen und bauaufsichtlichen Grundlagen von Massivholzkonstruktionen und Abschottungssystemen zusammengefasst. Anschließend wurden drei Brandversuche mit Abschottungssystemen in verschiedenen Massivholzprodukten mit einer Brandbeanspruchung von jeweils 90 Minuten durchgeführt. Die Laibungen der Abschottungen wurden dabei unbedeckt belassen, um die Wechselwirkungen zwischen den Abschottungen und den umliegenden Massivholz-Tragkonstruktionen zu untersuchen und Einflussfaktoren festzustellen.

Die Untersuchungen zeigen, dass Abschottungssysteme aus intumeszierenden Baustoffen den Laibungsbereich durch eine aktive Expansion im Brandfall ausreichend vor einem Durchbrand schützen können. Bei passiven Abschottungssysteme aus Mineralwolleplatten mit ablativen Beschichtungen konnte ein erhöhter Einbrand im Laibungsbereich festgestellt werden. Durch die vorliegenden Ergebnisse der Auswertungen der Temperaturverläufe sowie des Restquerschnittes konnte außerdem nachgewiesen werden, dass das Abbrandverhalten der Tragkonstruktion in der Fläche keinen wesentlichen Einfluss auf einen Einbrand im Laibungsbereich hat. Dadurch können Regeln für die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen mit Massivholz-Tragkonstruktionen vorgeschlagen werden, die als Grundlage für die Entwicklung von Norm-Tragkonstruktionen verwendet werden können.

# Abstract “Penetration Seals for timber construction”

The verification of fire resistance regarding load-bearing capacity, integrity and insulation plays a crucial role in ensuring fire protection objectives. Due to a holistic consideration of fire resistance, not only the construction itself but also the associated joints and penetrations of building services systems must be examined to ensure that the fire resistance of the penetrated component is not negatively affected by the installation of cables, pipes, or ventilation ducts.

At the European level, the test principles of EN 1366-3 are available for verification of fire protection, which were primarily developed based on sealing systems in rigid and drywall construction. For these types of construction, standard supporting constructions are available, which allow for broad application based on few tests. In contrast, there are no standard supporting constructions e.g. timber construction like cross-laminated timber construction. This makes direct application difficult, as usually only the specifically tested supporting construction is covered, and a transfer to other supporting construction is not possible. In various research projects, the aperture edges were identified as critical locations for fire penetration. Therefore, it is usually executed with aperture framing out of gypsum material boards, which, however, leads to increased effort.

To create a basis for the development of standard supporting constructions made of solid timber products without encase cladding, the technical and regulatory foundations of solid timber constructions and sealing systems were summarized. Then, three fire tests with sealing systems were carried out in different solid timber products with a fire exposure of min. 90 minutes. The encase of the seals were left unclad to investigate the interactions between the seals and the surrounding solid timber supporting structure and to determine influencing factors.

The investigations show that sealing systems made of intumescent materials can sufficiently protect the aperture edges from fire penetration through active expansion under influence of fire. With passive sealing systems made of mineral wool panels with ablation coatings, increased charring in the aperture edges was observed. In addition, the present results of the evaluations of the temperature curves and residual cross-sections also demonstrate that the burning behaviour of the supporting structure in the surface area has no significant influence on charring in the aperture edges. Thus, rules for the application of test results with solid timber load-bearing structures can be proposed, which can be used as a basis for the development of standard supporting structures.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung „Brandschutztechnische Abschottungen für den Holzbau“</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract “Penetration Seals for timber construction”</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Symbole und Abkürzungen</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.1 Forschungsthematik .....	1
1.2 Ziel der Arbeit .....	2
1.3 Methoden .....	2
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Brandschutzanforderungen in Deutschland .....	3
2.1.1 Allgemein .....	3
2.1.2 Musterbauordnung .....	3
2.1.3 Klassifizierung von Bauteilen und Baustoffen .....	4
2.2 Abschottungen von Leitungsanlagen .....	5
2.2.1 Arten von haustechnischen Installationen .....	5
2.2.2 Prinzipien der Leitungsführung .....	7
2.2.3 Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Leitungsanlagen .....	8
2.2.4 Klassifizierung von Durchführungen .....	9
2.2.5 Wirkungsweise von Abschottungen .....	10
2.2.6 Abschottungssysteme .....	11
2.2.7 Ver- und Anwendbarkeit von Abschottungssystemen .....	15
2.3 Mehrgeschossiger Holzbau .....	16
2.3.1 Allgemeines .....	16
2.3.2 Bauweisen .....	16
2.3.3 Besondere Brandschutzanforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise .....	20
2.3.4 Nachweis der Ver- und Anwendbarkeit für Bauteile aus Holz .....	22
2.4 Abbrandverhalten von Massivholzprodukten .....	23

2.4.1	Definition Massivholz .....	23
2.4.2	Baustoffe für die Holzmassivbauweise.....	24
2.4.3	Abbrandverhalten von flächigen Massivholzelementen.....	25
2.5	Prüfung und Anwendung von Abschottungssystemen (im Holzbau) .....	31
2.5.1	Allgemeines.....	31
2.5.2	Aktuelle Ausführung von Durchführungen im mehrgeschossigen Holzbau.....	31
2.5.3	Aktuelle Anwendbarkeitsnachweise von Abschottungssystemen im Holzbau ....	34
2.5.4	Prüfgrundsätze der DIN EN 1363-1 .....	35
2.5.5	Tragkonstruktionen nach DIN EN 1363-1 .....	36
2.5.6	Prüf- und Beurteilungsgrundsätze der DIN EN 1366-3.....	37
2.5.7	Normativer Anwendungsbereich der geprüften Gegenstände .....	38
2.6	Bisherige Forschungen zu Abschottungssystemen im Holzbau .....	42
2.6.1	MPA Braunschweig (2006) .....	42
2.6.2	FireIn Timber (2009, TU München) .....	44
2.6.3	Holzforschung Austria „Brandabschottungen im Holzbau“ (2016) .....	45
2.6.4	FireIn Timber (2012, TU München) .....	46
2.6.5	Konstruktionsregeln mehrgeschossiger Holzbau (2014, TU München) .....	48
2.6.6	Firestopping Test Witness Report (2016, GHM Consultants) .....	49
2.6.7	Entwicklung HolzBauRL BW (2020).....	50
2.6.8	LeitHolz (2019) .....	52
<b>3</b>	<b>Brandversuche zur Entwicklung einer Normtragkonstruktion für Abschottungen in Massivholzbauteilen .....</b>	<b>53</b>
3.1	Allgemeines.....	53
3.2	Versagensmechanismen und Einflussfaktoren von Abschottungssystemen in Massivholz-Tragkonstruktionen .....	53
3.3	Beschreibung Versuchsaufbau .....	55
3.3.1	Allgemeines.....	55
3.3.2	Verwendeter Prüfofen.....	58
3.3.3	Verwendete Tragkonstruktionen .....	58
3.3.4	Verwendete Abschottungssysteme .....	59
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Interpretation .....</b>	<b>64</b>
4.1	Auswertung der Versuche .....	64
4.1.1	Allgemeines.....	64

4.1.2	Auswertung der Prüfergebnisse durch Temperaturmessungen.....	66
4.1.3	Auswertung der Prüfergebnisse durch Messung des Restquerschnitts .....	67
4.2	Abschottungssysteme .....	68
4.2.1	Allgemeines.....	68
4.2.2	Kombiabschottung Brandschutzsteine und Brandschutzschaum .....	69
4.2.3	Rohrmanschette .....	70
4.2.4	Brandschutzkabelhülse.....	71
4.2.5	Kombischott Mineralwolle .....	72
4.2.6	Oberflächentemperatur der Tragkonstruktionen.....	74
4.3	Tragkonstruktionen und Laibungsbereiche .....	74
4.3.1	Allgemeines.....	74
4.3.2	Tragkonstruktionen .....	74
4.3.3	Laibungsbereiche .....	79
4.3.4	Kombiabschottungen Brandschutzsteine und Brandschutzschaum .....	81
4.3.5	Rohrmanschette .....	83
4.3.6	Brandschutzkabelhülse.....	85
4.3.7	Kombiabschottung Mineralwolle .....	86
4.3.8	Erkenntnisse und Empfehlungen .....	87
4.4	Vorschlag von Regeln für die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen .....	89
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>92</b>
5.1	Fazit.....	92
5.2	Ausblick.....	93
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>94</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>96</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>97</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>105</b>

# Symbole und Abkürzungen

## Formeln und Einheiten

<b>Buchstabe</b>	<b>Erläuterung</b>
------------------	--------------------

---

$\beta_0$	Abbrandrate gemäß DIN EN 1995-1-2 oder ETA
°C	Temperatur in Grad Celsius
K	Temperatur in Kelvin

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
------------------	--------------------

---

aaRdT	Allgemein anerkannte Regeln der Technik
aBG	Allgemeine Bauartgenehmigung
abhg.	abhängig
abP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BauPVO	Bauproduktenverordnung
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz (engl.: cross-laminated timber, CLT)
CLT	siehe BSP
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAD	European Assessment Document (deu.: Europäisches Bewertungsdokument)
EBS	Einbausituation
ETA	European Technical Assessment (deu.: Europäisch technische Bewertung)
ETK	Einheits-Temperatur-Kurve



GF	Gipsfaser(platte)
GK	Gebäudeklasse
GKF	Gipskartonfeuerschutz(platte)
KVH	Konstruktionsvollholz
MBO	Musterbauordnung
MHFHHolzR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
MHolzBauRL	Muster-Holzbaurichtlinie
MLAR	Muster-Leitungsanlagenrichtlinie
MLT	Mechanically Laminated Timber (deu.: mechanisch verbundenes Brettstapelholz)
MLüAR	Muster-Lüftungsanlagenrichtlinie
MVV TB	Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
MPA	Materialprüfanstalt
MUF	Melamin-Urea-Formaldehyd-(Klebstoff)
NLT	Nailed Laminated Timber (deu.: Genageltes Brettstapelholz)
PK	Prüfkörper
PUR	Polyurethan-(Klebstoff)
RQ	Restquerschnitt
vBG	Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung
vgl.	vergleiche
ZiE	Zulassung im Einzelfall

# 1 Motivation

## 1.1 Forschungsthematik

Das Bauen mit Holz als nachhaltiger Baustoff erfreut sich in der heutigen Zeit einer immer größeren Beliebtheit und kann einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten, da Holz durch den Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre Kohlenstoff über die Lebensdauer binden kann. Zudem wird bei der Produktion von Holz weniger Kohlenstoffdioxid freigesetzt als bei der Produktion von Beton oder Ziegeln [1]. Diese Möglichkeit wurde auch von Seiten der Politik erkannt, wodurch der Einsatz des Baustoffes Holz durch diverse Förderprogramme, wie beispielsweise die „Bayerische Holzbauförderung“ des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr (STMB Bayern) verstärkt werden soll.

Neben den Förderungen für das Bauen mit Holz wurden auch von Seiten der Bauaufsicht die Musterbauordnung und Landesbauordnungen für den breiteren Einsatz von Holz als tragenden Baustoff in den höheren Gebäudeklassen angepasst. Für die Umsetzung dieser Vorgaben ist eine Anpassung der technischen Regeln für das Bauen mit Holz notwendig. Durch den Einsatz eines brennbaren Baustoffes ergeben sich Herausforderungen für die Brandsicherheit von Gebäuden. Ein Ziel muss dabei sein, die Baustoffe für ein definiertes Schutzniveau gleichzustellen und den Planern und Bauausführenden verlässliche Regeln für das Bauen mit Holz zur Verfügung zu stellen. Beispielsweise wird dazu aktuell die DIN 4102-4 sowie der Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-2) auf den aktuell anerkannten Stand der Technik angepasst.

Eine entscheidende Rolle beim Brandschutz nimmt dabei der Raumabschluss zur Verhinderung der Ausbreitung von Feuer und Rauch ein. Der Feuerwiderstand muss in Bereichen von Element- und Bauteilfugen sowie haustechnischer Installationen erhalten bleiben. Durchführungen von Leitungen und Rohren durch raumabschließende Bauteile könnten dabei eine Schwachstelle darstellen. Die sorgfältige Planung, Ausführung und Qualitätssicherung sind daher bei Abschottungen von entscheidender Bedeutung.

Durch die stetige Weiterentwicklung des Holzbaus bilden bestehende Nachweisgrundlagen den aktuellen Stand des Wissens bzw. der Technik nicht bzw. nicht mehr ab. Dies betrifft unter anderem den Einbau von Abschottungssystemen für Kabel, Rohre und Lüftungsleitungen. Deren Prüfgrundsätze und technische Regeln wurden für Massiv- sowie Leichtbauweisen entwickelt und stehen daher häufig einer Anwendung der Produkte im Holzbau entgegen. Beispielsweise lassen die allgemeinen Bauartgenehmigungen (aBG's) zugehöriger Systemlösungen für Abschottungen meist keine geregelte Anwendung in Holzbauteilen zu. Daher müssen die Zulassungsgrundsätze ebenfalls auf die aktuellen Anwendungsbereiche der Holzbaupraxis angepasst werden.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung von Grundlagen für die Entwicklung einer Massivholz-Normtragkonstruktion, um eine Übertragbarkeit der Prüfergebnisse von Abschottungssystemen auf gleichwertige Anwendungssituationen im Holzbau zu ermöglichen. Für die Entwicklung einer Normtragkonstruktion sollen die möglichen Einflussfaktoren und Versagensmechanismen der Abschottungssysteme und Tragkonstruktionen identifiziert und deren Wechselwirkungen untersucht werden.

## 1.3 Methoden

Im ersten Schritt werden mithilfe einer Literaturrecherche die bauordnungsrechtlichen und brandschutztechnischen Grundlagen von Leitungsanlagen und mehrgeschossigen Gebäuden aus Holz erarbeitet, um die Hintergründe der Zulassungsgrundlagen und das Verhalten der Komponenten im Brandfall darzustellen.

Anschließend werden die aktuellen Erkenntnisse anderer Forschungsvorhaben zusammengefasst, um mögliche Einflussfaktoren anhand von Versagensbildern zu identifizieren. Darauf aufbauend sollen orientierende Brandversuche konzipiert, durchgeführt und ausgewertet werden.

Im letzten Teil wird aus den experimentellen Ergebnissen und den theoretischen Überlegungen wieder ein systematischer Ansatz für Anwendungsregeln von Abschottungssystemen in Massivholzbauteilen und Grenzen der Anwendung („kritische Anwendungsfälle“) erarbeitet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Brandschutzanforderungen in Deutschland

#### 2.1.1 Allgemein

In Deutschland stützt sich der Brandschutz auf zwei Bereiche:

- Abwehrender Brandschutz
- Vorbeugender Brandschutz

Der vorbeugende Brandschutz kann dabei weiter in den baulichen, anlagentechnischen und betrieblichen bzw. organisatorischen Brandschutz gegliedert werden. Für den Rahmen dieser Arbeit ist nur der vorbeugende bauliche Brandschutz relevant. Dieser wird in Deutschland über das Bauordnungsrecht der einzelnen Bundesländer mit den dort gültigen Landesbauordnungen geregelt [2]. Durch die länderspezifisch unterschiedlichen Anforderungen an den Brandschutz sind allgemeingültige Aussagen über brandschutzspezifische Themen für ganz Deutschland nicht möglich. Die Bauordnungen und bauordnungsrechtlichen Richtlinien der Bundesländer basieren jedoch weitestgehend auf der von der Bauministerkonferenz veröffentlichten Mustervorschriften und -erlassen. Daher werden in dieser Arbeit die Anforderungen und Inhalte der Musterbauordnung (MBO) [3], der Musterrichtlinien, wie z.B. der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR) [4], sowie die Muster-Verwaltungsvorschrift für technische Baubestimmungen (MVV-TB) [5] als Grundlage verwendet.

#### 2.1.2 Musterbauordnung

Die Musterbauordnung § 14 MBO [3] nennt vier Schutzziele als Grundlage für den Brandschutz von baulichen Anlagen:

- Vorbeugung der Entstehung eines Brandes
- Vorbeugung der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung)
- Rettung von Menschen und Tieren bei einem Brand
- Ermöglichung von wirksamen Löscharbeiten

Diese Grundanforderungen werden in § 26 MBO in Anforderungen für Baustoffe und Bauteile konkretisiert. Dabei beschreibt das Brandverhalten die Entflammbarkeit eines Baustoffs in der Brandentstehungsphase. Es wird zwischen nichtbrennbaren, schwerentflammbaren und normalentflammbaren Baustoffen unterschieden. Bei der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen unterscheidet man zwischen feuerbeständigen, hochfeuerhemmenden und feuerhemmenden Bauteilen. Die Feuerwiderstandsfähigkeit bezieht sich bei tragenden und aussteifenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall, bei raumabschließenden Bauteilen auf deren Widerstand gegen die Brandausbreitung.

Die Anforderungen steigen entsprechend der Gebäudeklasse nach § 2 MBO von Gebäudeklasse 1 bis Gebäudeklasse 5 an. In der MVV TB, Anhang 4 [5] werden den bauaufsichtlichen Anforderungen konkrete Feuerwiderstandsdauern und -klassen zugeordnet, die in Tabelle 2-1 zusammen mit der zugehörigen Gebäudeklasse dargestellt sind. Die Zuordnung zur Gebäudeklasse bezieht sich auf die Anforderung des Raumabschlusses von standardmäßigen Trennwänden und -decken nach § 29 bzw. 31 MBO und damit indirekt auf die Anforderung an Durchführungen von Leitungsanlagen.

Tabelle 2-1 Zuordnung der Feuerwiderstandsdauern zu den bauaufsichtlichen Anforderungen gemäß MVV TB

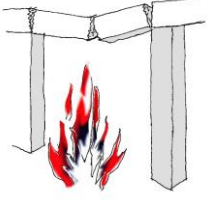
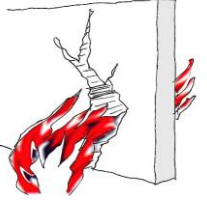
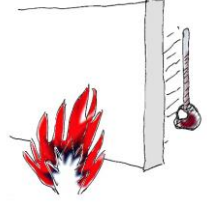
<b>Bauaufsichtliche Anforderung</b>	<b>Feuerwiderstandsdauer gemäß MVV-TB Anhang 4</b>	<b>Zuordnung zu Gebäudeklasse (Raumabschluss)</b>
Feuerhemmend	≥ 30 Minuten	GK 3 (GK 2)
Hochfeuerhemmend	≥ 60 Minuten	GK 4
Feuerbeständig	≥ 90 Minuten	GK 5

Neben der Anforderung an Bauteile bezüglich deren Feuerwiderstandsfähigkeit werden zusätzliche Anforderungen an deren Brandverhalten gestellt. Seit der Anpassung der MBO durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27.09.2019 und deren schrittweiser Umsetzung in den Ländern sind feuerbeständige Bauteile, abweichend auch aus brennbaren Baustoffen, z.B. Holz, zulässig. Voraussetzung dafür ist, dass diese den technischen Baubestimmungen gemäß § 85a MBO und damit, unter Anderem, der MHolzBauRL [6] entsprechen. Deren Anforderungen und Auswirkungen auf die Ausführung von Abschottungen werden im Abschnitt 2.5.3 noch genauer behandelt.

### 2.1.3 Klassifizierung von Bauteilen und Baustoffen

Die bauaufsichtliche Anforderung an den Feuerwiderstand und/oder das Brandverhalten wird durch ein Klassifizierungs- und Benennungssystem konkretisiert. Dabei werden in den technischen Baubestimmungen die einzelnen Klassifizierungen den jeweiligen deskriptiven Anforderungen der Bauordnung zugewiesen. Neben den nationalen Baustoffklassen für das Brandverhalten nach DIN 4102-1 [7] (z.B. Baustoffklasse A2) gibt es parallel dazu europäische Klassen auf Basis der DIN EN 13501-1 [8] (z.B. Brandverhalten A2-s1,d0). Bei den Bauteilen sind die Klassifizierungen national in der DIN 4102-2 [9] als F-Klassen bzw. auf europäischer Ebene in der DIN EN 13501-2 [10] mit den Leistungskriterien R, E und I geregelt. Die europäischen Leistungskriterien werden in Tabelle 2-2 aufgeführt und visualisiert.

Tabelle 2-2 Übersicht über die Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2

Kurzzeichen	Bezeichnung	Abbildung [11]
R	Tragfähigkeit (Résistance)	
E	Raumabschluss (Etanchéité)	
I	Wärmedämmung (Isolation)	

Neben diesen drei Kurzzeichen gibt es noch weitere, die diverse Zusatzkriterien bzw. Beanspruchungsarten beschreiben. Die für Abschottungen relevanten Klassen und Zusatzkriterien werden im Abschnitt 2.2.4 genauer erläutert.

## 2.2 Abschottungen von Leitungsanlagen

### 2.2.1 Arten von haustechnischen Installationen

Gemäß VDI 4700 [12] sind „haustechnische bzw. gebäudetechnische Anlagen“ Anlagen, die der Ver- und Entsorgung von Gebäuden dienen. Dazu zählen unter anderem die Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung, Heizung und Trinkwassererwärmung, elektrische Stromversorgung, sowie die Raumlufttechnik. Als *Installationen* werden in der Anlagentechnik Einrichtungen zur Beförderung von Medien wie Strom, Wasser, Abwasser, Gas, Öl und Luft bezeichnet. Haustechnische Installationen sind damit alle Leitungen, die zur Ver- und Entsorgung von Gebäuden dienen.

Die Muster-Leitungsanlagenrichtlinie (MLAR) [4] und die Muster-Lüftungsanlagenrichtlinie (MLüAR) [13] regeln in Verbindung mit den in der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) aufgeführten Normen und Richtlinien die brandschutztechnischen Anforderungen an haustechnische Installationen. In Abschnitt 2 der MLAR werden Leitungsanlagen als „Anlagen aus Leitungen, insbesondere aus elektrischen Leitungen oder Rohrleitungen“ beschrieben. Dazu zählen neben den Leitungen an sich, alle damit zusammenhängenden Anlagenteile wie beispielsweise

Armaturen und Regeltechnik sowie die Befestigung und Beschichtung der Leitungen. Lichtwellenleiter-Kabel und elektrische Kabel zählen dabei ebenfalls zu den elektrischen Leitungen. Damit werden alle wesentlichen haustechnischen Installationen für die Gewerke Heizung, Sanitär und Elektro abgedeckt. In der MLüAR werden darüber hinaus die brandschutztechnischen Anforderungen an Lüftungsanlagen sowie Klimaanlage, raumluftheizungstechnische Anlagen und Warmluftheizungen geregelt. Dazu zählen neben den Lüftungsleitungen „alle zu ihrer Funktion erforderlichen Bauteile und Einrichtungen“ wie beispielsweise Ventilatoren, Brandschutzklappen und andere Absperrvorrichtungen gegen die Übertragung von Feuer und Rauch.

Da sich bei Lüftungsanlagen durch den (meist) aktiven Lufttransport weiterführende Anforderungen und Maßnahmen hinsichtlich des Brandschutzes ergeben, beschränkt sich diese Arbeit auf die Abschottung von Leitungsanlagen. Dass die Prinzipien hinsichtlich des Einbaus von Abschottungsmaßnahmen auch auf Lüftungsanlagen übertragbar sind, zeigen Untersuchungen der Holzforschung Austria [14].

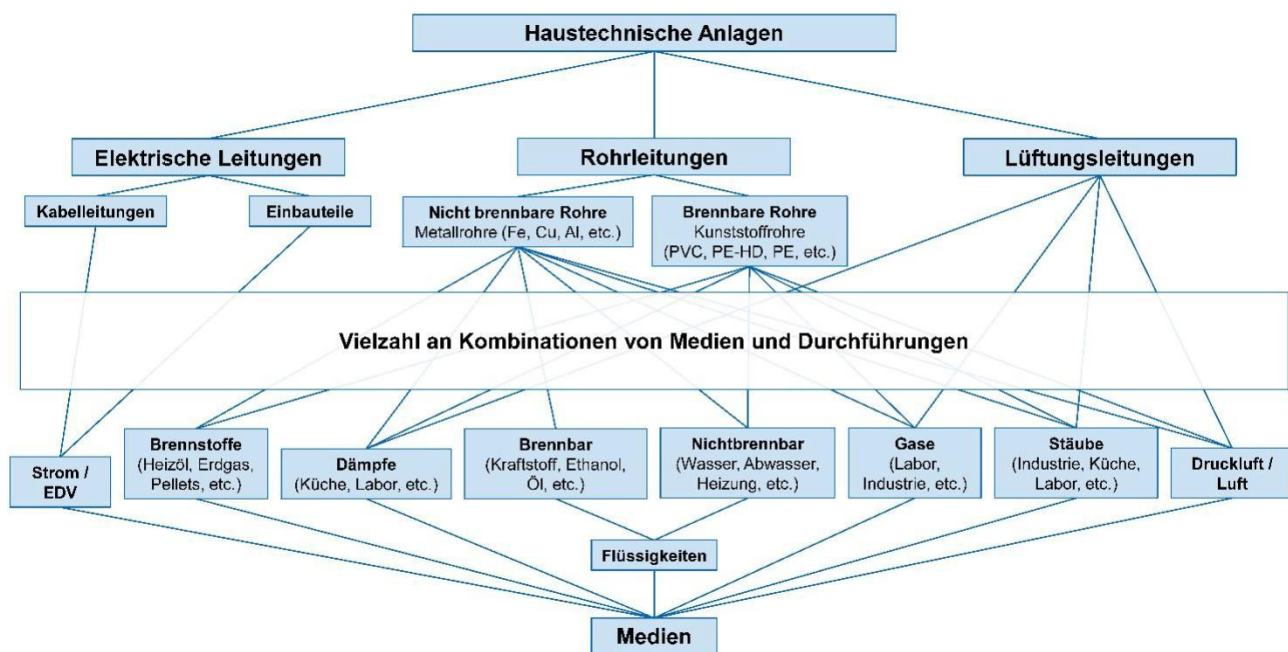


Abbildung 2-1 Kombinationen aus Haustechnischen Anlagen und Medien (entnommen aus [15])

Neben der Art und des Materials der Leitungs- oder Rohrleitungsanlage ist die Art des Mediums, welches darin transportiert wird, von entscheidender Bedeutung für die Leitungsführung und das zu wählende Abschottungssystem. Neben Flüssigkeiten nennt die MLAR noch Dämpfe, Gase und Stäube als Medien. Trinkwasserleitungen (geschlossene Rohrleitungssysteme) sind vollständig mit Wasser gefüllt und haben dadurch einen geringeren Einfluss auf die Brandweiterleitung im Rohrquerschnitt als beispielsweise Abwasserrohre (offenes Rohrleitungssystem), die meist leer sind. Brennbar oder brandfördernde Medien haben darüber hinaus noch einen beschleunigenden Einfluss auf die Brandweiterleitung [16]. Insgesamt ergibt sich eine hohe Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten zwischen Leitungsart und Art des Mediums, die in Abbildung 2-1 von Maximilian Egenhofer [15] zusammengefasst wurden. Es zeigt sich hierbei, dass brennbare Medien

immer mit nichtbrennbaren Rohrmaterialien kombiniert werden, während nichtbrennbare Medien eine breitere Auswahl Rohrmaterialien zulassen.

## 2.2.2 Prinzipien der Leitungsführung

Für die Leitungsführung gibt es in der Praxis drei verschiedene Prinzipien, die in Abbildung 2-2 dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden.

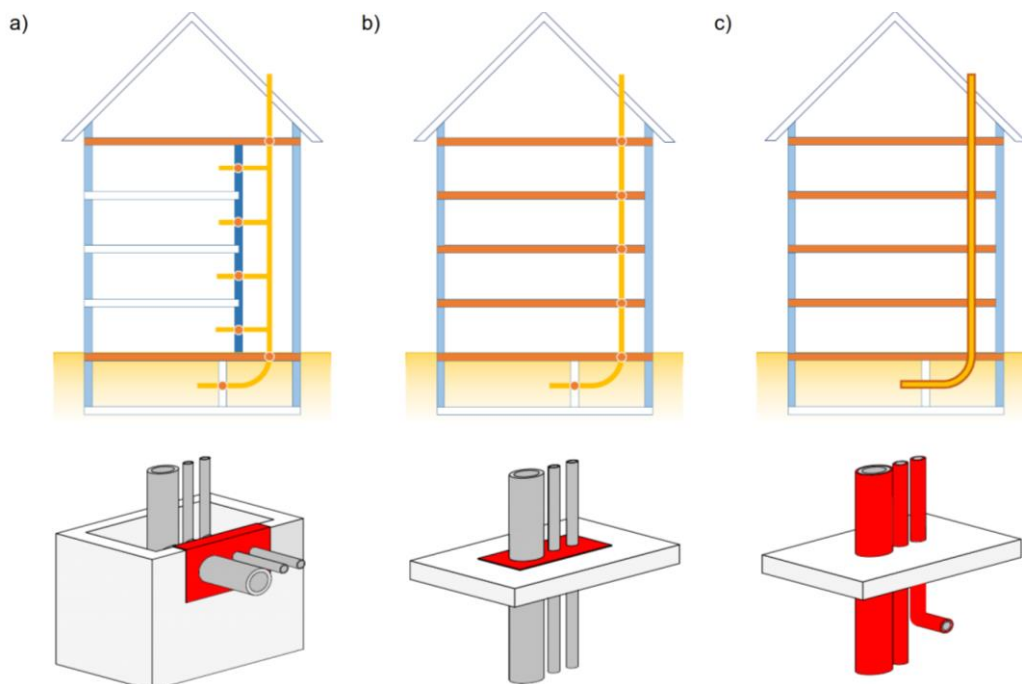


Abbildung 2-2 Brandschutztechnische Erschließungssystematik für haustechnische Installationen [17]

**Prinzip a)** – in der Literatur [14] als Schachttyp A bezeichnet – zeigt die Installation in Schächten und Kanälen mit Feuerwiderstand (z.B. I-Kanal). Dies wird üblicherweise bei einer vertikalen Erschließung von Wohnhäusern oder Bürogebäuden verwendet. Dabei müssen alle Leitungen, die aus dem Schacht oder Kanal ein- oder austreten abgeschottet werden.

Bei **Prinzip b)** bzw. Schachttyp B werden alle Leitungen, die ein raumabschließendes Bauteil wie eine Trennwand oder Decke durchdringen in der entsprechenden Feuerwiderstandsdauer abgeschottet (Decken-/Wandabschottungsprinzip). Eine Führung in einem Schacht oder Kanal ohne Feuerwiderstand ist aus Schallschutzgründen dabei trotzdem sinnvoll.

Die dritte Möglichkeit **Prinzip c)** ist die Ummantelung der Installationen. Das heißt, dass die Leitungen wie beim Prinzip b) in Schächten oder Kanälen oder offen geführt werden können, jedoch selbst einen Feuerwiderstand aufweisen. Dafür werden häufig nichtbrennbare Isolierungen in einer bestimmten Dicke verwendet. In der Praxis werden die drei Prinzipien häufig entsprechend der baulichen Rahmenbedingungen kombiniert, um eine wirtschaftliche Ausführung zu erreichen. Die Haustechnikinstallation sollte laut Dederich et al. [18] über zentrale Erschließungen erfolgen und



anschließend feinverteilt werden, um die Haustechnikinstallation auf festgelegte Brandabschnitte zu beschränken. Dafür können prinzipiell alle Prinzipien verwendet werden, aber Dederich et al. [18] sowie Gräfe et al. [19] bevorzugen aufgrund der geringeren Anzahl an Abschottungen und der einfacheren Schachtkonstruktionen ohne Feuerwiderstand Schachttyp B.

### **2.2.3 Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Leitungsanlagen**

Die Anforderungen an die Ausführung von Leitungsanlagen werden in § 40 MBO [3] definiert. Dabei nennt die Musterbauordnung keine konkreten Anforderungen, wie z.B. feuerhemmend für Gebäudeklasse 3 sondern verlangt lediglich, dass „Leitungen [...] durch raumabschließende Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit vorgeschrieben ist, nur hindurchgeführt werden [dürfen], wenn eine Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten ist oder Vorkehrungen hiergegen getroffen sind [...]“. Dies gilt jedoch nicht für Gebäude der Gebäudeklasse 1 und Gebäudeklasse 2 sowie innerhalb von Wohnungen oder innerhalb von Nutzungseinheiten mit maximal 400 m<sup>2</sup>, die sich nicht über mehr als zwei Geschosse strecken.

Konkretere Anforderungen an die Ausführung von Leitungsanlagen finden sich in der MLAR, welche als Technische Baubestimmung durch die Verwaltungsvorschriften Technische Baubestimmungen (VV TB) in den Bundesländern eingeführt ist. Für Gebäude, deren tragende oder aussteifende Bauteile aus Holz bestehen gilt ab Gebäudeklasse 4 ebenso die im Oktober 2020 veröffentlichte Musterholzbaurichtlinie (MHolzBauRL) [6]. Diese ist noch nicht in allen Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt wird jedoch in dieser Arbeit als Grundlage für die weitere Bearbeitung verwendet.

#### **Muster-Leitungsanlagenrichtlinie (MLAR) [4]**

Im Abschnitt 4 der MLAR werden in Bezug auf § 40 Abs. 1 MBO die Anforderungen an die Führung von Leitungsanlagen durch raumabschließende Wände und Decken hinsichtlich deren Abstände, Baustoffklassen der Materialien, etc. konkretisiert. Leitungen müssen entsprechend ihres Führungsprinzips entweder durch Abschottungen in der Feuerwiderstandsfähigkeit der durchdringenden Bauteile oder in Leitungsschächten oder -kanälen mit der entsprechenden Feuerwiderstandsfähigkeit geführt werden. Das bedeutet, dass die klassifizierte Abschottung mindestens die gleiche Feuerwiderstandsdauer (30/60/90 Minuten) wie die klassifizierte Wand oder Decke aufweisen muss und diese nicht unterschritten werden darf. [16]

Da sich diese Arbeit auf Gebäude ab Gebäudeklasse 4 fokussiert, werden die Erleichterungen für feuerhemmende Wände (MLAR 4.2) sowie einzelne Leitungen (MLAR 4.3) nicht genauer behandelt.

#### **Musterholzbaurichtlinie (MHolzBauRL) [6]**

Gemäß Abschnitt 4.7 der MHolzBauRL müssen Durchführungen, die durch hochfeuerhemmende Bauteile in Holztafelbauweise mit einer Brandschutzbekleidung in entsprechender Qualität im Bereich der Laibung der Öffnung ausgeführt werden (siehe Abbildung 2-3). Zudem muss ein

entsprechender Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweis, sowie eine Einbauanleitung für den Einbau in hochfeuerhemmende Bauteile aus Holz vorliegen.

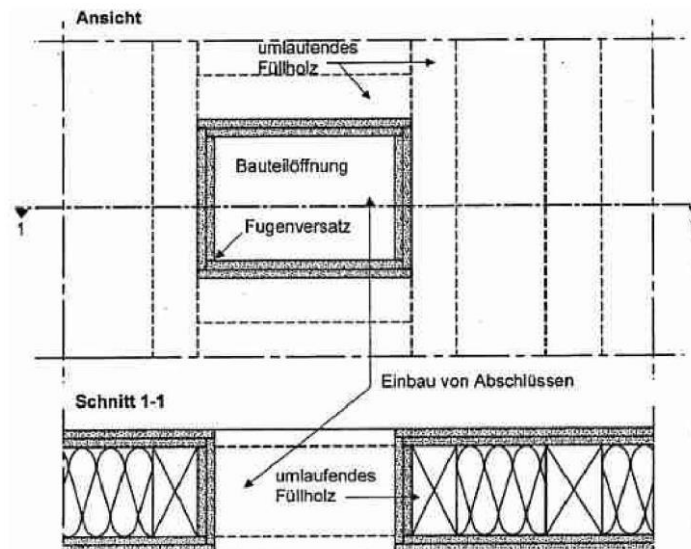


Abbildung 2-3 Prinzipskizze zur Ausführung der Laibungsbekleidung einer Öffnung gemäß MHolzBauRL [6]

Für die Ausführung von Durchführungen in Bauteile in Holzmassivbauweise werden in der MHolzBauRL keine expliziten Ausführungsregeln definiert. In der Praxis werden diese Durchführungen daher häufig in Anlehnung an Abschnitt 4.7 mit einer Laibungsbekleidung ausgeführt oder entsprechend mit bauaufsichtlichen Abweichungen objektbezogen gelöst.

## 2.2.4 Klassifizierung von Durchführungen

Durchführungen bzw. Abschottungen können entweder national oder europäisch auf Basis von Feuerwiderstandsprüfungen klassifiziert werden. Die Prüfung und Klassifizierung für den Raumabschluss erfolgt national nach DIN 4102-9 [20] für Kabelabschottungen und nach DIN 4102-11 [21] für Rohrabschottungen. Europäisch erfolgt die Klassifizierung nach der DIN EN 13501-2 [10] und die Prüfung nach DIN EN 1366-3 [22]. Zusätzlich können weitere Kriterien hinsichtlich besonderer Anforderungen je nach Durchführungsart klassifiziert werden (siehe Tabelle 2-3). Die Prüfungen erfolgen für beide Klassifizierungssysteme anhand der Einheits-Temperatur-Kurve (ETK) und die Prüfkriterien sind ebenfalls vergleichbar bzw. ähnlich. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf beide Klassifizierungssysteme ist jedoch nicht möglich und auch bauordnungsrechtlich nicht vorgesehen [18].

Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die nationalen und europäischen Klassen für Rohr- und Kabelabschottungen. Für einen Vergleich der nationalen und europäischen Prüfkriterien soll hier auf Dederich et al. [18] verwiesen werden.

Tabelle 2-3 Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen an Kabel- und Rohrabschottungen zu den Feuerwiderstandsklassen auf nationaler Ebene sowie auf europäischer Ebene (in Anlehnung an [16, Tabelle A-II-14 und Tabelle A-II-15])

Bauaufsichtliche Anforderung	Klassen auf nationaler Ebene nach DIN 4102-11 und -9	Klassen auf europäischer Ebene nach DIN EN 13501-2	Zusätzliche Leistungskriterien auf europäischer Ebene
<b>Rohrabschottungen</b>			
Feuerhemmend	R 30	EI 30	<b>c/u</b> für nichtbrennbare Rohre (geschlossen/offene Systeme)  <b>u/u</b> für brennbare Rohre (offene Systeme)  <b>u/c</b> für brennbare Rohre (geschlossene Systeme)
Hochfeuerhemmend	R 60	EI 60	
Feuerbeständig	R 90	EI 90	
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Min.	R 120	EI 120	
<b>Kabelabschottungen</b>			
Feuerhemmend	S 30	EI 30	Keine zusätzlichen Leistungskriterien vorgesehen.
Hochfeuerhemmend	S 60	EI 60	
Feuerbeständig	S 90	EI 90	
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Min.	S 120	EI 120	

Auf europäischer Ebene ist darüber hinaus eine Klassifizierung für Feuerwiderstandsdauern von 15, 45, 180 und 240 Minuten möglich, die jedoch national keiner eigenen bauaufsichtlichen Anforderung zugewiesen werden können und daher immer der nächstniedrigeren Anforderung zugeordnet werden müssen.

### 2.2.5 Wirkungsweise von Abschottungen

Die in Abschnitt 2.2.1 gezeigten Arten von Leitungsdurchführungen erfordern unterschiedliche brandschutztechnische Ausführungen der Abschottung. Brennbar Rohre müssen anders abgeschottet werden als nicht-brennbare, metallische Rohre oder elektrische Leitungen. Ein weiterer Einflussfaktor für die Wahl der Abschottung ist die Brennbarkeit der Rohrdämmung. Für die Abschottung üblicher Leitungsarten wurden daher in den letzten Jahrzehnten verschiedene Produkte entwickelt und auf den Markt gebracht. Sie können dabei hinsichtlich ihrer Wirkungsweise in (re-)aktive und passive Produkte unterschieden werden. Bei den aktiven Produkten werden

dämmschichtbildende, intumeszierende Materialien verwendet, um unter Brandeinwirkung entstehende Hohlräume, Spalten, Lücken und Fugen durch eine Volumenzunahme zu verschließen [23]. Mit dieser Funktionsweise wird beispielsweise der Rohrquerschnitt eines brennbaren Rohres oder die brennbare Dämmung bzw. Isolierung von Rohren/Leitungen „abgedrückt“ und damit verschlossen. Wichtig für die Leistungsfähigkeit der Rohrverschlusseinrichtung ist ein stabiles Widerlager auf der Außenseite des Rohres. Dies kann beispielsweise durch die umliegende Konstruktion oder durch das Gehäuse von Manschetten hergestellt werden.

Im Gegensatz dazu gibt es passive Produkte die dämmend wirken oder eine hohe Menge an Energie aufnehmen und/oder ableiten können. Dazu zählen beispielsweise Mineralwolleabschottungen („Weichschott“) oder Mörtelabschottungen („Hartschott“). Mineralwolleabschottungen bestehen aus nicht-brennbaren Mineralfaserplatten und ablativen Brandschutzbeschichtungen sowie Brandschutzdichtmassen zum Verschluss von Fugen und Spalten. Die Ablationsbeschichtungen nutzen chemische und/oder physikalische Reaktionen, um Energie zu verbrauchen und/oder Materie freizusetzen [24] und werden dadurch brandschutztechnisch wirksam. Mörtelschotts verschließen durch Verguss die Hohlräume und können aufgrund ihrer hohen spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sehr viel Energie aufnehmen und ableiten.

In der Praxis werden häufig sowohl aktive als auch passive Brandschutzprodukte in einem Abschottungssystem verwendet, um die Ausbreitung von Feuer und Rauch zu verhindern. Diese werden im Folgenden beispielhaft vorgestellt.

### 2.2.6 Abschottungssysteme

Seit mehreren Jahrzehnten werden verschiedene Produkte für Abschottungen entwickelt und zu Systemen kombiniert. Bekannte Hersteller sind unter Anderem Hilti, Zapp Zimmermann, Aestuver, Würth und Wichmann.

Dabei wird zwischen Einzel-, Mehrfach- und Kombiabschottungen unterschieden. Einzeldurchführungen (engl.: single penetration seal) schotten nur eine einzelne Leitung (z.B. Abflussrohr) ab. Mehrfachdurchführungen (engl.: multiple penetration seals) schotten, wie Kombiabschottungen mehr als eine Leitung ab, werden jedoch nur für eine Gruppe von Leitungen (z.B. Kabel, Metallrohre oder Kunststoffrohre) verwendet. In Kombiabschottungen (engl.: mixed penetration seals) ist die Durchführung verschiedener Leitungsgruppen (z.B. Kabel, Metallrohre und Kunststoffrohre) innerhalb einer Öffnung möglich. Um innerhalb einer Öffnung verschiedene Leitungsgruppen wirksam abzuschotten, werden häufig zusätzlich Produkte für Einzeldurchführungen innerhalb einer Kombiabschottung verbaut. In Abbildung 2-4 wird beispielsweise zusätzlich eine Brandschutzmanschette für die Abschottung des brennbaren Rohres

verwendet, da die Kombiabschottung ab einer gewissen Größe nicht genügend Widerstand für einen sicheren Öffnungsverschluss<sup>1</sup> des Rohres aufbringen könnte.

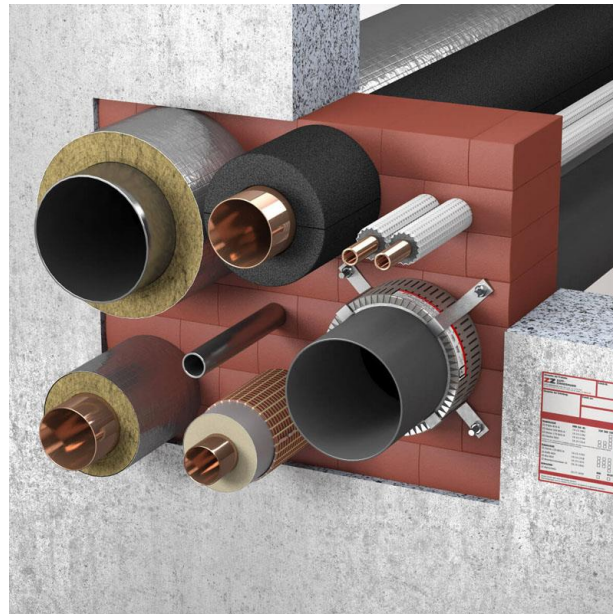






Abbildung 2-4 Beispiel einer Kombiabschottung mit intumeszierenden Brandschutzsteinen und Zusatzprodukten [25]





In Tabelle 2-4 werden verschiedene Abschottungssysteme gemäß des europäischen Bewertungsdokuments (EAD) 350454-00-1104 [26], der Prüfnorm für Abschottungssysteme der DIN EN 1366-3 [22] sowie erweiterten Produkten aus der DIN EN 15822-3 [27] aufgeführt und Beispielprodukte genannt.

Tabelle 2-4 Auswahl verschiedener am Markt erhältlicher Abschottungssysteme

Bezeichnung	Beispielprodukte	Abbildung	Kennzeichen
Block, Füllstück (engl.: block, plug)	Hilti CFS-BL P oder Zapp Zimmermann ZZ® 220-120	 [28]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv)</li> <li>- Verwendung für Kombischotts und Mehrfachdurchführungen</li> </ul>

<sup>1</sup> Öffnungsverschluss nach DIN EN 1366-3

Bezeichnung	Beispielprodukte	Abbildung	Kennzeichen
<p>Kabelbox (engl.: cable box)</p>	<p>Wichmann WD 90 oder Hilti CFS-SL GA</p>	 [29]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierender (aktiv) Kern mit Blechgehäuse</li> <li>- Verwendung hauptsächlich für Elektroleitungen</li> </ul>
<p>Beschichtete Mineralwolleplatten (intumenszierend oder ablativ) (engl.: Coated mineral wool slab (intumescent or ablative coating))</p>	<p>Hilti Brandschutzplatte CP 673 oder Rockwool Conlit Penetration Board</p>	 [30]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorrangig passives System</li> <li>- Fugen müssen verschlossen werden</li> <li>- Verwendung für Kombischotts und Mehrfachdurchführungen</li> </ul>
<p>Geschäumte Abschottung (engl.: foam)</p>	<p>Zapp Zimmermann ZZ® 330 Brandschutzschaum oder Hilti CFS-F FX</p>	 [31]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv)</li> <li>- Verwendung für Kombischotts und Mehrfachdurchführungen</li> </ul>
<p>Modul-System (engl.: modular system)</p>	<p>Hilti Kabelmodul CFS-T oder svt Pyro-Safe CMS</p>	 [32]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv)</li> <li>- Verwendung für (Kabel)mehrfachdurchführungen</li> </ul>
<p>Mörtel (engl.: mortar)</p>	<p>Hilti Brandschutzmörtel CP 636 oder Würth Brandschutzmörtel</p>	 [33]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- passives System</li> <li>- Verwendung für alle Arten von Durchführungen, teilweise in Kombination mit anderen Produkten</li> </ul>

Bezeichnung	Beispielprodukte	Abbildung	Kennzeichen
Manschette (engl.: Collar)	Deutsche Rockwool Conlit® Brandschutzmanschette oder Hilti Endlosmanschette CFS-C EL	 [34]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierender Öffnungsverschluss (aktiv)</li> <li>- Verwendung für Einzeldurchführungen (z.B. brennbare Rohre)</li> </ul>
Bandage (engl. wrap)	Rockwool Kabelabschottung Conlit® Bandage oder Hilti CFS-B	 [35]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv)</li> <li>- Verwendung für Einzeldurchführungen (z.B. nichtbrennbare Rohre)</li> </ul>
Spachtelmassen / Kite (engl.: putty)	Hilti Brandschutzkitt CP 619 oder Rockwool Conlit Masse	 [36]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv) oder abdichtend (passiv)</li> <li>- Als Verschluss für Fugen oder Ringspalte</li> </ul>
Dichtstoff/Mastix, formbar (engl.: Sealants/Mastics)	Hilti CFS-FIL (intumeszierend) oder Würth Brandschutzfugenmasse (Brandschutzacryl)	 [37]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intumeszierend (aktiv) oder abdichtend (passiv)</li> <li>- Als Verschluss für Fugen oder Ringspalte</li> </ul>

Es zeigt sich, dass für jede Art von Leitung und Durchführung verschiedene Systeme zur Verfügung stehen, die je nach konkreter Bausituation gewisse Vor- und Nachteile aufweisen. Die einzelnen Hersteller bieten dabei häufig eine Vielzahl von Produkten, die sich teilweise entsprechend den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen (ugs.: „Zulassungen“) miteinander kombinieren lassen. Dies wird insbesondere bei Kombiabschottungen mit Formteilen angewandt, da sich die verbleibenden Hohlräume durch Brandschutzschäume vollständiger und wirtschaftlicher schließen lassen, als die Formteile an sämtliche Geometrien der Leitungen anzupassen [38].

## 2.2.7 Ver- und Anwendbarkeit von Abschottungssystemen

In Deutschland wird zwischen Bauprodukten nach § 17 MBO, sowie Bauarten nach § 16a MBO unterschieden. Ein Abschottungssystem wird auf der Baustelle aus verschiedenen Bauprodukten zusammengefügt und ist damit eine Bauart. Für das Inverkehrbringen von Bauprodukten ist entweder national eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder nach europäischer Bauproduktenverordnung (BauPVO) [39] eine Europäische Technische Bewertung (engl.: European Technical Assessment, ETA) auf Basis des europäischen Bewertungsdokuments (engl.: European Assessment Document, EAD) 350454-00-1104 „Fire stopping and fire sealing products – Penetration seals“ als **Verwendbarkeitsnachweis** notwendig.

Für Abschottungssysteme gibt es gemäß MVV TB, Anhang 4, Abschnitt 6 keine allgemein anerkannte Regel der Technik für die Planung, Bemessung und Ausführung von Kabel- und oder Rohrleitungsdurchführungen. Daher benötigen Abschottungssysteme für die Errichtung der Abschottung in Deutschland zusätzlich eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) als **Anwendbarkeitsnachweis**.

Für Bauarten, die nach allgemein anerkannten Prüfverfahren (z.B. für metallische Rohrabschottungen nach DIN 4102-11) beurteilt werden können, ist ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) als Anwendbarkeitsnachweis ausreichend [40]. Die meisten aktuellen Abschottungssysteme können jedoch nicht nach dieser Norm klassifiziert werden und benötigen daher die o.g. allgemeine Bauartgenehmigung.

Zur Erlangung der aBG sind Brandprüfungen an anerkannten Prüfstellen notwendig. Abschottungen werden gemäß der Prüfkriterien der DIN EN 13501-2 in Verbindung mit der DIN EN 1363-1 (Feuerwiderstandsprüfung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen) [41] klassifiziert. Die Prüfung erfolgt gemäß der Prüfnorm DIN EN 1366-3 (Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 3: Abschottungen) oder, wie bereits genannt, alternativ gemäß der DIN 4102-11 für metallische Rohrabschottungen bzw. gemäß der DIN 4102-9 für Kabelabschottungen.

Für den Einbau von Abschottungen muss der Anwender (z.B. die Haustechnik-Firma) die Übereinstimmung der Anwendung der Bauart mit den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen erklären (Übereinstimmungserklärung) und zusammen mit dem Ü-Zeichen oder der Leistungserklärung des Herstellers des Bauprodukts (z.B. Würth oder Hilti) dokumentieren. Da die reale Bausituation häufig von den Rahmenbedingungen der Ver- und Anwendbarkeitsnachweise abweicht, kann von einer technischen Regel oder einem Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweis (abZ, abP, aBG, aaRdT, TB) abgewichen werden. Hier wird zwischen wesentlichen und nicht wesentlichen Abweichungen unterschieden.

Nicht wesentliche Abweichungen können vom Anwender erklärt werden, wesentliche Abweichungen benötigen eine Erteilung einer vBG und bei Abweichungen von den Produktzulassungen eine ZiE. In der Praxis wird häufig über die Grenze zwischen wesentlich und nicht wesentlich diskutiert. Einen Versuch einer Definition stammt von Dipl.-Phys. J. Pennings (Leiter der Prüfstelle Brandverhalten von Bauteilen; MPA NRW):



*„Eine nicht wesentliche Abweichung ist eine Abweichung von einer durch einen Verwendbarkeitsnachweis beschriebenen Konstruktion, die keinen so negativen Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit der Konstruktion hat, dass sich die Feuerwiderstandsklasse der Konstruktion verschlechtert.“ [42]*

Da der Anwender nicht immer die notwendige Fachkenntnis für eine differenzierte Beurteilung hat, werden hier in der Praxis häufig Gutachten von Experten oder Prüfstellen als Grundlage für die Erklärung einer nicht wesentlichen Abweichung verwendet.

## **2.3 Mehrgeschossiger Holzbau**

### **2.3.1 Allgemeines**

Die Holzbaubranche war lange Zeit geprägt von einer kleinteiligen Struktur mit vielen kleinen Betrieben, hat sich jedoch in den letzten Jahrzehnten unter anderem durch viele Innovationen in Technik und Abläufen zu einer Alternative zum Massivbau entwickelt. Neben den aus stabförmigen Einzelteilen bestehenden Holztafelbau- bzw. Holzrahmenbauweisen ist durch die Entwicklung von Brettsperrholz in Deutschland und Österreich Anfang der 1990er Jahre die sogenannte Holzmassivbauweise (oder Massivholzbauweise) entstanden. Im Jahr 2021 wurden in Zentraleuropa (DACH-Region, Italien, Tschechien) ca. 1,1 Mio. m<sup>3</sup> Brettsperrholz produziert [43] (zum Vergleich: BSH-Produktion 2021: 2,91 Mio. m<sup>3</sup> [44]). Der moderne Holzbau ist geprägt durch einen hohen Vorfertigungsgrad der Elemente. Dafür ist eine frühere Einbindung von Ausführungskompetenz in die Planung notwendig. Die Vorfertigung der Elemente ist ebenfalls bei der Planung der Haustechnik zu beachten. Aus Erfahrung des Autors zeigt sich, dass bei Architekten, Tragwerksplanern und Bauphysikern in den letzten Jahren das Know-how um den modernen Holzbau gewachsen ist, jedoch die haustechnischen Schnittstellen meist zu spät geplant werden und vor allem auf Seiten der Haustechnikplaner das Wissen um den aktuellen Vorfertigungsgrad und den daraus entstehenden Abhängigkeiten noch nicht flächendeckend vorhanden ist. Dies führt häufig zu Umplanungen während der Bauphase und damit zu höheren Kosten. Im Folgenden werden die verschiedenen Holzbauweisen kurz erläutert und aktuelle Entwicklungen in der Holzbaubranche aufgezeigt.

### **2.3.2 Bauweisen**

Im Wesentlichen werden im mehrgeschossigen Holzbau aktuell drei Bauweisen angewandt und häufig auch miteinander kombiniert (Prinzipiskizzen siehe Abbildung 2-5):

- Skelettbauweise (engl.: Post-and-Beam Construction)
- Holztafelbauweise (engl.: Timber Frame Construction)
- Holzmassivbauweise (engl.: Mass Timber Construction)

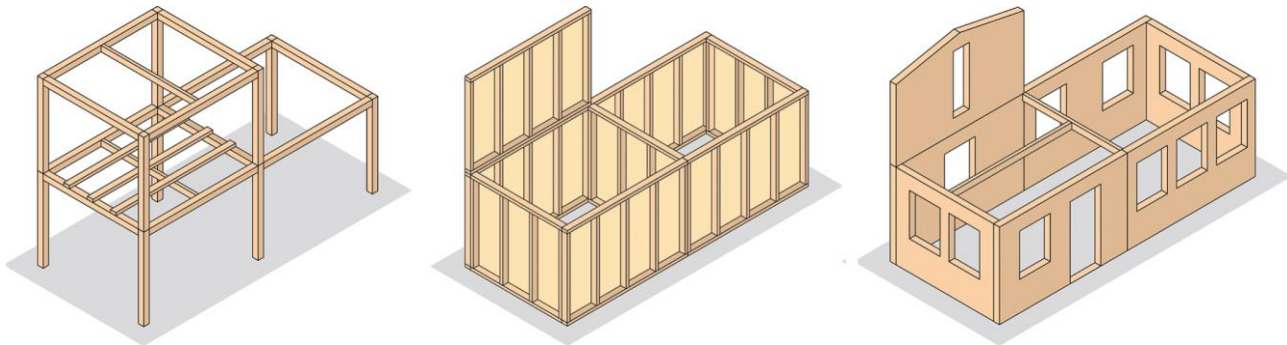


Abbildung 2-5 Übersicht über Holzbauweisen für den mehrgeschossigen Holzbau [45]

### **Skelettbauweise**

Die Skelettbauweise entwickelte sich aus der Fachwerkbauweise und besteht aus Stützen und Trägern, die miteinander gelenkig oder biegesteif verbunden werden. Die Bauweise wird im englischsprachigen Raum auch „heavy timber construction“ genannt, da die Konstruktionselemente häufig aus dickeren Querschnitten als bei anderen Konstruktionsweisen gebildet werden und die Verbindungselemente meist aus Stahl bestehen. Inzwischen werden für die Verbindung der Stützen und Träger häufig lange und schlanke Schrauben, wie beispielsweise Vollgewindeschrauben, eingesetzt. Die Konstruktionselemente bestehen in der modernen Skelettbauweise meist aus stabförmigen Brettschicht- oder Furnierschichtholzquerschnitten, die hohe Lasten abtragen können, die mit Stahlkonstruktionen vergleichbar sind. Insbesondere der Einsatz von Laubhölzern, wie z.B. der Buche als Furnierschichtholz, birgt Potential für hohe Biegebeanspruchungen oder hohe Lasten parallel zur Faser. Im Brandfall können die Bauteile durch die Berechnung des Abbrands verhältnismäßig einfach auf die Tragfähigkeit bemessen werden [46]. Die Vorfertigung beschränkt bei der Skelettbauweise meist auf den Abbund der Konstruktionselemente mit CNC-gesteuerten Maschinen und der Vormontage von Verbindungen. Die Vorfertigung von flächigen Wand- oder Deckenelementen ist eher unüblich, da die tragende Konstruktion meist von der später montierten, nicht tragenden Gebäudehülle getrennt wird und der Transport und die Montage von stabförmigen Bauteilen wirtschaftlicher sind.

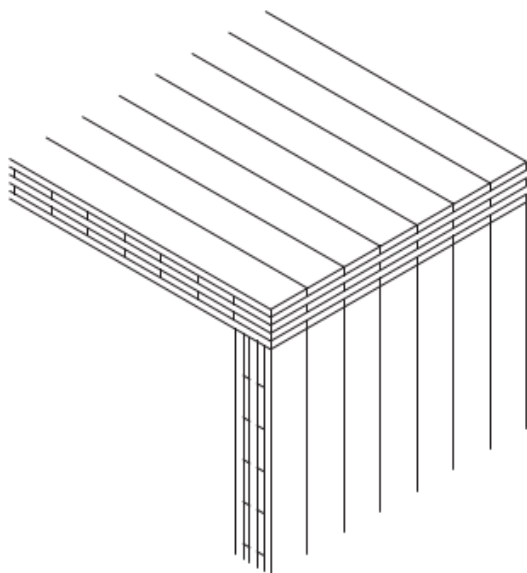
### **Holztafel- bzw. Holzrahmenbauweise**

Die Holztafelbauweise entwickelte sich aus der in Nordamerika verbreiteten Holzrahmenbauweise und besteht aus schlanken stabförmigen Einzelquerschnitten aus Vollholz, die zusammen mit Plattenwerkstoffen zu Holztafeln zusammengesetzt werden. Die Bauweise zeichnet sich insbesondere durch den ressourcenschonenden Materialeinsatz, einen niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten (u-Wert) im Verhältnis zur Dicke sowie einen hohen Vorfertigungsgrad aus. Dadurch wird diese Bauweise bei mehrgeschossigen Gebäuden aus Holz häufig für Außenwände eingesetzt welche einschließlich Fenster und Fassadenbekleidung vorgefertigt werden können. Müssen höhere punktförmige Lasten abgetragen werden, können größere Querschnitte aus Brettschichtholz oder Furnierschichtholz in die Wandelemente eingebaut werden [46]. Der Einsatz von Holztafelbauteilen in Geschosdecken oder Flachdächern ist bei

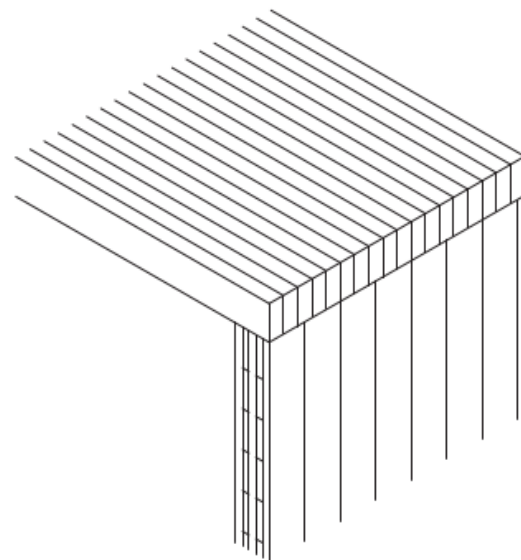
mehrgeschossigen Gebäuden aufgrund der bauphysikalischen Eigenschaften eher unüblich. Beispielsweise sind aufgrund der geringen Masse sind die Anforderungen an Schallschutz sowie Schwingungsverhalten schwieriger zu erreichen. Zur Sicherstellung des Brandschutzes werden Holztafelbauelemente ab Gebäudeklasse 4 mit Gipswerkstoffplatten bekleidet, um die schlanken Holzquerschnitte vor Brandeinwirkung zu schützen, sowie einen Einbrand in die Hohlräume zu verhindern.

### Holzmassivbauweise

Die Holzmassivbauweise wurde klassischerweise in Blockbauweise oder Konstruktionen aus Brettstapelelementen hergestellt, besteht jedoch heutzutage häufig aus großformatigen Plattenwerkstoffen wie Brettsperrholz oder Brettschichtholz. Die Brettsperrholzelemente setzen sich aus kreuzweise angeordneten Brettlagen zusammen, die in industriellen Fertigungslinien miteinander zu großen Platten verklebt werden [1]. Die Holzmassivbauweise zeichnet sich durch eine höhere Masse und die flächige Tragwirkung (insbesondere bei Brettsperrholz) aus und wird daher vor Allem für Geschossdecken sowie tragende, aussteifende Innenwände eingesetzt. Die beiden üblichen Kombinationen bei mehrgeschossigen Holzgebäuden sind in Abbildung 2-6 dargestellt. Die Planung und Montage von Bauteilen aus Massivholz ist einfacher als bei der Skelettbauweise oder der Holztafelbauweise, der Vorfertigungsgrad jedoch beschränkter im Vergleich zur Holztafelbauweise. Hinsichtlich des Brandschutzes können Holzmassivbauteile ebenfalls einfach mit Restquerschnitten statisch bemessen werden.



(a) Holzmassivbauweise aus Brettsperrholzelementen für Decke und Wand [1]



(b) Kombinierte Holzmassivbauweise aus (Brettschichtholz-) Brettstapeldeckenelementen und Brettsperrholzwänden [1]

Abbildung 2-6 Prinzipskizzen der üblichen Kombinationen von Holzmassivbauweisen

## Das „Standardgebäude“ im mehrgeschossigen Holzbau

Durch Forschung und Entwicklung, Innovationen auf Fertigungs- sowie Materialseite sowie der Weiterführung von Regeln und Richtlinien ist inzwischen ein „reiner“ Holzbau<sup>2</sup> bis über die Hochhausgrenze hinaus möglich und vor allem in skandinavischen Ländern umgesetzt worden. In der Praxis hat sich jedoch der Einsatz bis zur Hochhausgrenze sowie eine Mischbauweise aus den genannten Bauweisen [1] in Kombination mit Gebäudeteilen aus Stahlbeton bewährt. Ein häufiger Einsatzort von Stahlbeton bei mehrgeschossigen Gebäuden ist hierbei neben erdberührenden Bauteilen ein Erschließungskern, der auch für die Gebäudeaussteifung bemessen wird und die Brandschutzanforderungen an Flucht- und Rettungswege einfach löst.

Zur Fokussierung auf übliche Bausituationen, soll im Folgenden die Bauteile eines „Standardgebäudes“ für den mehrgeschossigen Holzbau aufgrund der Erfahrung des Autors festgelegt werden. Das „Standardgebäude“ soll dabei nicht alle möglichen Situationen darstellen, sondern bewährte Konzepte aufzeigen, die häufig eingesetzt werden.

**Geschossdecken** bestehen häufig in Massivholzbauweise aus Brettsperrholz- oder Brettschichtholzelementdecken, die meist unterseitig sichtbar verbleiben und oberseitig einen mehrschichtigen Fußbodenaufbau mit Zementestrich, Mineralwollgedämmung und Splittschüttung aufweisen.

**Tragende Innenwände** werden aufgrund der vertikalen Lasten, sowie der Aussteifung ebenfalls aus Brettsperrholz ausgeführt und werden meistens mit Gipswerkstoffen bekleidet. Alternativ oder ergänzend dazu werden als vertikale Elemente Stahlstützen und in den Decken Stahlträger als Unter- bzw. Überzüge in Kombination mit ein- oder zweiachsig gespannten Brettsperrholzdeckenelementen und nicht-tragenden Innenwänden in Trockenbauweise eingesetzt.

**Wohnungstrennwände** werden häufig in Holzmassivbauweise aus Brettsperrholz in Kombination mit entkoppelten Vorsatzschalen in Trockenbauweise ausgeführt. Auch hier könnten nicht-tragende Wohnungstrennwände eingesetzt werden.

**Außenwände** werden häufig in Holztafelbauweise mit innenseitiger Installationsebene in Trockenbauweise ausgeführt, um den hohen Vorfertigungsgrad und Wärmeschutz der Holztafelbauweise zu genügen. Werden die Außenwände als tragende Bauteile eingesetzt, besteht

---

<sup>2</sup> Unter „reinem“ Holzbau versteht der Autor, dass die Konstruktion der flächigen Bauteile vorwiegend aus Holz besteht. Stützen, Unterzüge und Anschlüsse werden auch hier teilweise aus Stahl eingesetzt.

hier zudem die Möglichkeit, tragende Elemente mit größeren Querschnitten und höheren Festigkeitsklassen in die Wände einzubauen.

Neben den flächigen Bauweisen ist seit einigen Jahren eine starke Entwicklung der sogenannten „Modulbauweise“ mit Raumzellen erkennbar. Insbesondere für kleinteilige Raumsituationen, die sich häufig wiederholen, wie z.B. Apartments, Hotels und (Studenten-)Wohnheime eignet sich diese Bauweise.

Theoretisch sind alle vorher genannten Bauweisen für den Einsatz in Raumzellen möglich, jedoch ist auch hier die Kombination aus Massivholzbauteilen bei Decken- und Innenwänden sowie Holztafelbauelementen als Außenwände am weitesten verbreitet [1]. Neben der reinen Raumzellenbauweise werden bei aufgelösten Raumsituationen mit individuellen Grundrissen häufig Bäder als Raumzellen inkl. fertig montierter Sanitäreinrichtung vorgefertigt und in den Montageprozess integriert.

Durch die starke Innovation der letzten Jahrzehnte ist eine Entwicklung der bauordnungsrechtlichen Vorgaben notwendig, welche in den letzten Jahren, unter anderem durch eine politische Ausrichtung auf klimaschonende Bauweisen, zusätzlich angeregt wurde. Ebenfalls notwendig ist eine Anpassung der technischen Regeln als Grundlage für Planung und Ausführung, die durch die Anpassung des Eurocodes 5 sowie national durch die Anpassung der DIN 4102-4 vorgenommen wird.

### **2.3.3 Besondere Brandschutzanforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise**

Durch die Novellierung der Bauordnungen ist ein geregelter Holzbau bis zur Hochhausgrenze in fast allen Bundesländern (bis auf Sachsen, Stand: 01/2023) möglich. Wesentlicher Bestandteil der Novellierung ist die bereits genannte Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenbandbekleidungen in Holzbauweise („Muster-Holzbaurichtlinie“, MHolzBauRL) als Ersatz für die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (MHFHolzR) [47]. Im Folgenden werden die Anforderungen gemäß MHolzBauRL (Fassung Oktober 2020), welche direkt oder indirekt für Abschottungssysteme in Holzbauteilen relevant sind, zusammengefasst.

Die neue Richtlinie definiert Anforderungen an Bauteile mit der Anforderung hochfeuerhemmend in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise für Standardgebäude der Gebäudeklasse 4 sowie an Bauteile mit der Anforderung abweichend zu hochfeuerhemmend oder feuerbeständig in Massivholzbauweise für Standardgebäude der Gebäudeklasse 4 und 5. Ebenfalls definiert werden die Anforderungen an Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5. Standardgebäude sind Gebäude die keinen Sonderbautatbestand nach § 2 Abs. 4 MBO erfüllen und keine Mittel- bzw. Großgaragen sind.

Für Holzrahmen- bzw. Holztafelbauteile in Gebäudeklasse 4 ist raumseitig eine Brandschutzbekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen notwendig, die eine Entzündung der tragenden und aussteifenden Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen für mindestens 60 Minuten

verhindert. Dies entspricht der Klassifizierung K<sub>2</sub>60 gemäß DIN EN 13501-2, die durch detailliertere Vorgaben hinsichtlich der Befestigung nun auch auf Bauteile mit der nationalen Klassifizierung F60-B angewandt werden können. Bisher war nur eine europäische Klassifizierung der Bauteile möglich [48]. Die Bekleidung erfolgt mit zwei Lagen aus je 18 mm Gipskartonfeuerschutzplatten (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF) und muss in der Fläche mit einem Fugenversatz und an den Ecken und Öffnungen mit einem Stufenfalz ausgebildet werden. Innerhalb der Konstruktionsebene müssen die hohlraumfüllenden Dämmstoffe aus nichtbrennbarer Mineralwolle mit einem Schmelzpunkt von  $\geq 1000^{\circ}\text{C}$  bestehen. Wände notwendiger Treppenräume sowie Wände anstelle von Brandwänden sind in Holztafelbauweise ebenfalls möglich, müssen jedoch zusätzlich einer mechanischen Stoßbeanspruchung standhalten, die mit einer Bauartgenehmigung nachzuweisen ist. Sichtbare Holzoberflächen sind bis auf einzelne hohlraumfreie Träger und Stützen bei dieser Bauweise nicht zulässig.

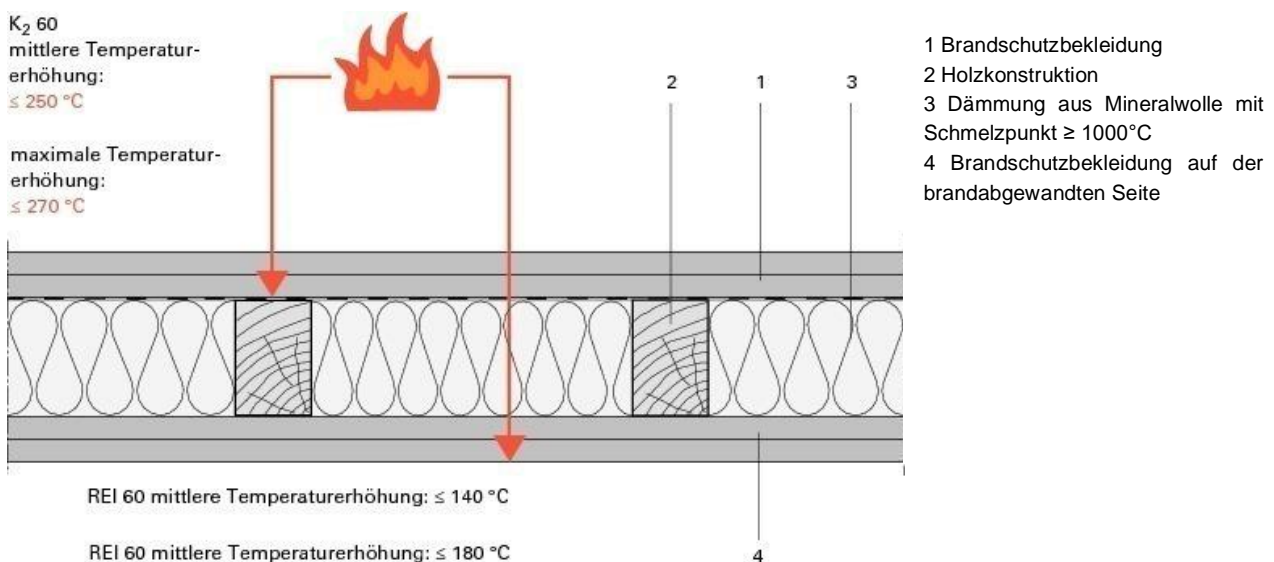


Abbildung 2-7 Prinzipskizze Brandschutzbekleidung K<sub>2</sub>60 bzw. K<sub>2</sub>30 nach MHolzBauRL (entnommen aus [49])

Für Holzmassivbauteile in Gebäudeklasse 4 und 5 ist die Anforderung an die Brandschutzbekleidung reduziert. Die brennbaren Bauteile müssen nur für mindestens 30 Minuten vor einer Entzündung geschützt werden, was der Klassifizierung K<sub>2</sub>30 entspricht und mit einer 18 mm dicken Lage GKF oder GF erfüllt wird. Im Gegensatz zur Holztafelbauweise sind für Holzmassivbauweisen sichtbare Holzoberflächen möglich. Es können entweder an der Decke oder an 25% der Wände das Holz sichtbar gelassen werden. Hintergrund dafür ist die Begrenzung der immobilen Brandlast in den Räumen. Raumabschließende Wände wie Trennwände, Wände anstelle von Brandwänden und Treppenraumwände müssen brandschutztechnisch bekleidet werden. Des Weiteren werden Anforderungen und Ausführungsvorgaben an die Rauchdichtigkeit von Elementfugen von Holzmassivbauteilen gestellt.

In der Praxis wird, unter anderem aus gestalterischen Gründen, häufig die Unterseite der Decke sichtbar gelassen. Da darüber hinaus nur tragende, nicht raumabschließende Wände mit Sichtoberfläche ausgeführt werden dürfen, ist die Geschosdecke das einzige raumabschließende

Bauteil, in welchem Durchführungen geschottet werden müssen und eine sichtbare Holzoberfläche nach aktuellem Stand der Regelwerke zulässig ist.

### 2.3.4 Nachweis der Ver- und Anwendbarkeit für Bauteile aus Holz

Für Bauteile aus Holz als Bauart nach §16a MBO müssen die Tragfähigkeit sowie der Raumabschluss nachgewiesen werden. Dieser Nachweis kann für geregelte Bauarten nach einer technischen Regel (DIN EN 1991-1-2 [50] oder DIN 4102-4 [51]) erfolgen oder für nicht geregelte Bauarten mittels eines Anwendbarkeitsnachweises für Bauarten (aBG, abP oder vBG) erbracht werden. Für alle in einer Bauart verwendeten Bauprodukte muss ebenfalls die Verwendbarkeit über eine technische Regel, einen Verwendbarkeitsnachweis oder eine Leistungserklärung nachgewiesen werden. Wie bei Abschottungssystemen sind hier nicht wesentliche Abweichungen von den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen möglich, die vom Hersteller des Bauprodukts bzw. des Anwenders der Bauart zu bescheinigen sind.

Gemäß der Veröffentlichung „Bauaufsichtliche Nachweise im Holzbau“ des DIBt vom 27.06.2022 sind aktuell die Nachweismöglichkeiten für Bauarten gemäß MHolzBauRL stark eingeschränkt. Die Hintergründe dafür sind:

- fehlende technische Regeln für die Holzmassivbauweise,
- fehlende technische Regeln für den Nachweis des Feuerwiderstands von Bauarten aus Holz von mehr als 60 Minuten
- der Ausschluss von abP's als Anwendbarkeitsnachweise für Bauteile gemäß MHolzBauRL (siehe MVV TB, Lfd. Nr. C 4.1).

Da in den letzten Jahren vorwiegend abP's für den Nachweis von Bauteilen gemäß der M-HFHolzR („alte Holzbaurichtlinie“) verwendet wurden, liegen sehr wenig allgemeine Bauartgenehmigungen und damit allgemeingültige Anwendbarkeitsnachweise für Bauarten aus Holz, insbesondere in Holzmassivbauweise vor. Dadurch müssen aktuell häufig kosten- und zeitintensive vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen erwirkt werden.

Neben den fehlenden Nachweisgrundlagen für den Feuerwiderstand der Bauarten selbst, ist dieser Sachverhalt auch für die Zulassung und Anwendung von Abschottungssystemen in diesen Bauarten von Relevanz. Die Hintergründe werden in Abschnitt 2.5.3 aufgeführt.

Zukünftig werden durch die Überarbeitung der DIN 4102-4/A1 [52] und des Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025 [53]) aktualisierte technische Regeln vorliegen, die dieses formale Problem lösen. Dort werden Nachweise in Form von Berechnungen und Tabellenwerten für Holzbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten möglich, sowie verlässliche Bemessungsgrundlagen für Holzmassivbauweisen vorliegen.

## 2.4 Abbrandverhalten von Massivholzprodukten

### 2.4.1 Definition Massivholz

Im Folgenden werden anhand von Beispielen die Unterschiede zwischen Massivholz und Vollholz erläutert und versucht eine Definition für den Rahmen dieser Arbeit zu geben.

Vollholz wird von Kaufmann et al als „Holz in seiner unveränderten gewachsenen Struktur im Unterschied zu den durch Trennen und erneutes Zusammenfügen hergestellten Holzwerkstoffen“ [1] definiert.

Im Gegensatz dazu werden die modernen Massivholzprodukte in kleinere Bestandteile wie Bretter oder Furnieren aufgetrennt, sortiert und anschließend wieder miteinander zu höherwertigeren, homogeneren Baustoffen verklebt oder mechanisch verbunden.

Beispiele dafür sind:

- Brettschichtholz (BSH; engl.: Glued Laminated Timber, Glue Lam)
- Brettsperrholz (BSP, engl.: cross-laminated Timber, CLT)
- Brettstapelholz aus vernagelten oder verdübelten Brettern oder Balken (engl.: Dowel Laminated Timber, DLT)
- Furnierschichtholz (FSH, engl.: Laminated veneer Timber, LVL)

Kennzeichen von Massivholz sind eine homogenere Struktur mit geringen Hohlraumanteilen und ein meist geringeres Quell- und Schwindverhalten sowie höhere Festigkeitskennwerte als von Vollholz aus der gleichen Holzart.



## 2.4.2 Baustoffe für die Holzmassivbauweise



(a) Brettsperrholz



(b) Brettschichtholz



(c) Furnierschichtholz



(d) Brettstapelholz

Abbildung 2-8 Übersicht der Massivholzprodukte für den konstruktiven Holzbau (entnommen aus [54])

Bei mehrgeschossigen Holzgebäuden in Holzmassivbauweise werden aktuell hauptsächlich Brettsperrholz- und Brettschichtholz-Elemente eingesetzt. Brettsperrholz (Abbildung 2-8 a) wurde in den 1990er Jahren in Deutschland und Österreich entwickelt und bietet aufgrund der einfachen Anwendung sowie der hohen Leistungsmerkmale ein hohes Potential für den Einsatz bei mehrgeschossigen Gebäuden [55]. BSH (Abbildung 2-8 b) wird bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts vor allem für weitspannende Hallentragwerke eingesetzt. In seiner heutigen Form mit Keilzinkung wird es seit den 60er Jahren ausgeführt [56]. Durch eine Industrialisierung in der Herstellung von BSH wurde eine immer breitere Anwendung wirtschaftlich möglich. So ist neben der Anwendung in stabförmigen Konstruktionen als Stützen oder Träger auch die Verwendung als Massivholzdecke inzwischen weit verbreitet.

Brettsperrholzprodukte werden aktuell auf Basis von ETA's gemäß EAD 130005-00-0304 oder abZ's vertrieben. Die europäische Brettsperrholznorm DIN EN 16351 wurde von der europäischen Kommission noch nicht formal eingeführt [46]. Im Gegensatz dazu ist Brettschichtholz bereits ein harmonisiertes Bauprodukt, welches nach DIN EN 14080 hergestellt und auf den Markt gebracht wird.

Beide Baustoffe bestehen aus aufgetrennten, sortierten und gehobelten Vollholzbrettern, die mit Hilfe von Keilzinkung und anschließender Verleimung der Lamellen zu höherwertigen, homogeneren

Produkten im Vergleich zu Vollholz zusammengefügt werden. Sie können beide als flächige und scheibenförmige Elemente für tragende und aussteifende Deckenbauteile eingesetzt werden. Brettsperrelemente werden im mehrgeschossigen Holzbau außerdem als tragende und aussteifende Wände verwendet [1]. BSP minimiert gegenüber BSH die Inhomogenität und Anisotropie (Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften) aufgrund der kreuzweisen Verleimung der Lamellen, die durch die Faserstruktur des Holzes bei faserparallel verleimten Holzprodukten auftreten [1].

Brettsperrelemente werden in verschiedenen Varianten hergestellt. Übliche Parameter sind dabei:

- Holzart
- Gesamtdicke als Kombination von Lagenanzahl, Lagendicken
- Orientierung der Decklage(n)
- Brettdicken, Brettbreiten, Festigkeitsklasse der Bretter
- Oberflächenqualität (Nichtsicht, Industriesicht, Wohnsicht, Sonderoberflächen)
- Abstand der Bretter (Fugenbreite), Schmalseitenverklebung, Einsatz von Entlastungsnuten
- Art des Klebstoffes für die Fläche, Schmalseite und die Keilzinkung

Neben Brettsperrelementen, Brettschichtholz und Furnierschichtholz (Abbildung 2-8 c) werden noch mechanisch verbundene Massivholzprodukte (engl.: mechanically laminated timber, MLT) hergestellt. Dazu gehören beispielsweise vernagelte (engl.: nailed laminated timber, NLT, Abbildung 2-8 d) oder verdübelte (engl.: dowel-laminated timber, DLT) Brettstapelelemente nach EAD 130011-00-0304. Diese haben jedoch aufgrund der durchgehenden Fugen geringere Feuerwiderstände, höhere Unterschiede beim Brandverhalten und werden im Rahmen dieser Arbeit daher nicht genauer untersucht [46].

Das Brandverhalten eines Baustoffs beschreibt dessen Entzündungsverhalten und den Beitrag zur Brandentwicklung in den frühen Phasen eines Brandereignisses. In Bezug auf das Brandverhalten unterscheiden sich Brettsperrelemente und Brettschichtholz aus Fichte/Tanne unwesentlich voneinander und sind in die Baustoffklasse B2 bzw. D-s2,d0 einzuordnen. Davon zu unterscheiden ist das Abbrandverhalten von Baustoffen aus Holz, welches im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird. Beim Abbrandverhalten sowie beim Brandbeitrag sind je nach Orientierung der Bauteile Unterschiede aufgrund der Klebfugenintegrität bei Brandeinwirkung zu beachten [57].

### **2.4.3 Abbrandverhalten von flächigen Massivholzelementen**

Als erstes wird das grundsätzliche Verhalten von Holz unter thermischer Einwirkung beschrieben, bevor das Abbrandverhalten von Holz im Allgemeinen und Massivholzprodukten im Speziellen eingegangen wird.

#### **Grundlagen**

Holz besteht hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulose sowie Lignin und weiteren Bestandteilen in geringen Mengen. Je nach Holzart unterscheidet sich die Zusammensetzung der Hauptbestandteile,

und damit das Verhalten im Brandfall. Für das Verbrennen von Holz ist der Pyrolyseprozess notwendig, da Holz nicht direkt brennt. Dies ist ein endothermer Vorgang, bei dem aufgrund von thermischen Einwirkungen organische Materialien chemisch zersetzt werden, bevor die dort entstehenden Pyrolysegase an der Oberfläche exotherm oxidieren (verbrennen). Das Material verbrennt unter Flammenbildung und die Verbrennung wird durch immerwährende Pyrolyse selbstständig fortgeführt [58]. Auf der brandzugewandten Seite entsteht durch die Zersetzung eine Kohleschicht, die als dämmende Schutzschicht zwischen Feuer und der Pyrolyseschicht wirkt und die Pyrolyse von frischem Holz verlangsamt [59]. Diese Kohleschicht ist ein wesentlicher Faktor für den Feuerwiderstand von Holzbauteilen und deren kontinuierlichem Abbrand.

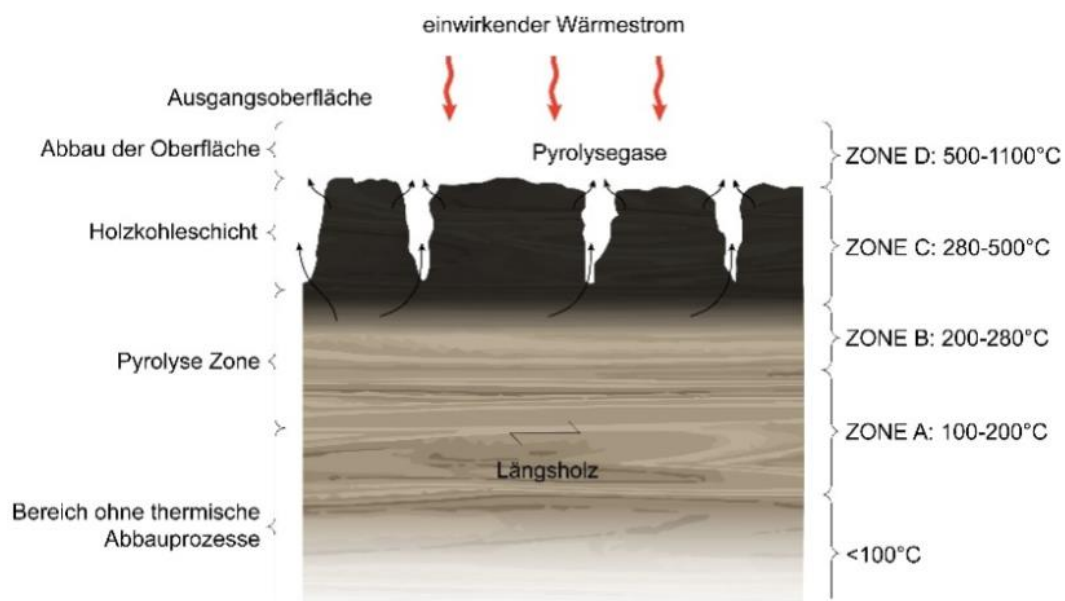


Abbildung 2-9 Das Zonenmodell der thermischen Holzzerlegung entnommen aus [58], Ursprung aus [59]

In Abbildung 2-9 werden die verschiedenen Zonen bei der Zersetzung von Holz unter Brandeinwirkung gezeigt. Es zeigt sich, dass die Pyrolyse vertikal zur brandbeanspruchten Oberfläche stattfindet. Schon ab einer Temperatur von 100°C finden Zersetzungsprozesse im Holz aufgrund von ungebundenem gasförmigem Wasser statt. Ab ca. 200°C beginnt der Pyrolyseprozess. Die Abbrandgrenze bzw. der Beginn der Verkohlung wird in dieser Abbildung sowie in weiteren Veröffentlichungen ab einer Temperatur von 280°C angegeben [58; 59]. Für die weitere Bearbeitung wird in dieser Arbeit jedoch der normative Wert des EC 5 von 300°C verwendet. Für eine genauere Beschreibung der Temperaturzonen und der dort stattfindenden chemischen Vorgängen wird auf Werther [58] bzw. Friquin [59] verwiesen.

### Normative Regelung und Klebfugenintegrität

Das Abbrandverhalten von brennbaren Baustoffen wird in der DIN EN 1955-1-2 [50] geregelt. Die Abbrandtiefe ist dabei der Abstand der Abbrandgrenze von der ursprünglichen Bauteiloberfläche. Sie ist abhängig von der Brandbeanspruchungsdauer und der maßgebenden Abbrandrate. Durch die Abbrandtiefe wird der Restquerschnitt für die Bemessung der Tragfähigkeit sowie des

Raumabschlusses berechnet. Diese Grenzschrift wird in der DIN EN 1995-1-2 mit der 300°C Isotherme beschrieben und als Abbrandgrenze definiert. Die Abbrandrate ist damit die Geschwindigkeit, mit der die Abbrandgrenze vertikal zur beanspruchten Oberfläche des Holzes durch die Brandeinwirkung über die Dauer der Brandbeanspruchung fortschreitet. Die Abbrandrate ist je nach Holzart und Anwendungsfall unterschiedlich. Der EC5 unterscheidet bei den Anwendungsfällen zwischen ungeschützten Oberflächen, anfänglich geschützten Oberflächen bei denen der Abbrand vor Versagen der Schutzbekleidung beginnt und Oberflächen die dem Feuer nach dem Versagen der Schutzbekleidung direkt ausgesetzt sind. Durch die direkte Brandbeanspruchung des bereits vorgewärmten Holzes nach dem Versagen der Bekleidungen ist die thermische Schutzwirkung der Kohleschicht nicht vorhanden. Daher ist, bis die schützenden Kohleschicht eine Dicke von 25 mm erreicht hat, die doppelte Abbrandrate zu berücksichtigen.

Die Formel für die Berechnung der eindimensionalen Abbrandtiefe, wie sie für Vollholz mit einer entsprechenden Breite angenommen werden darf, ist in Formel (2-1) dargestellt. Da in dieser Arbeit flächige Massivholzbauteile betrachtet werden, wird die geforderte Mindestbreite  $b_{min} \geq 197$  mm für eine Brandbeanspruchungsdauer von 90 Minuten in jedem Fall erreicht. Das Abbrandverhalten kann bei Vollholz mit einer konstanten Abbrandrate von  $\beta_0 = 0,65$  mm/min beschrieben werden.

$d_{char} = \beta_0 \times t$	[mm]	aus DIN EN 1995-1-2, Gleichung 3.1	(2-1)
$d_{char}$	[mm]	Eindimensionale Abbrandtiefe	
$\beta_0$	[mm/min]	Eindimensionale Abbrandrate bei Normbeanspruchung	
$t$	[min]	Zeitdauer der Brandbeanspruchung	

Bei geklebten Holzbauteilen wie Brettsperrholz und Brettschichtholz kann diese Formel ebenfalls angewandt werden, wenn die Verklebung über die Dauer der Brandbeanspruchung gewährleistet ist. Verschiedene Studien zum Abbrandverhalten von Brettsperrholz haben jedoch festgestellt, dass je nach Klebstoff ein Abfallen der Kohleschicht zu beobachten ist [60; 61]. Dadurch verliert das Holzelement, wie beim Versagen von Bekleidungen, die Schutzwirkung der Holzkohleschicht und ein erhöhter Abbrand ist zu berücksichtigen [60]. Dabei ist bei vertikalen Bauteilen (Wänden) ein Abfallen später zu beobachten als bei horizontalen Bauteilen (Decken), da bei Wänden eine gegenseitige Abstützung der Holzkohle zu einem späteren Abfallen führt [61]. Die Eigenschaft, ob sich die Kohleschicht ablöst oder nicht, nennt man Klebfugenintegrität im Brandfall (engl.: Glue-Line Integrity in Fire) und ist abhängig von der Wahl des Klebstoffes. Dieser Hintergrund wird im Entwurf des Eurocodes 5 [53] aufgegriffen und es werden zwei Berechnungsverfahren für den Fall „mit“ und „ohne“ Abfallen von Kohleschichten aufgenommen.

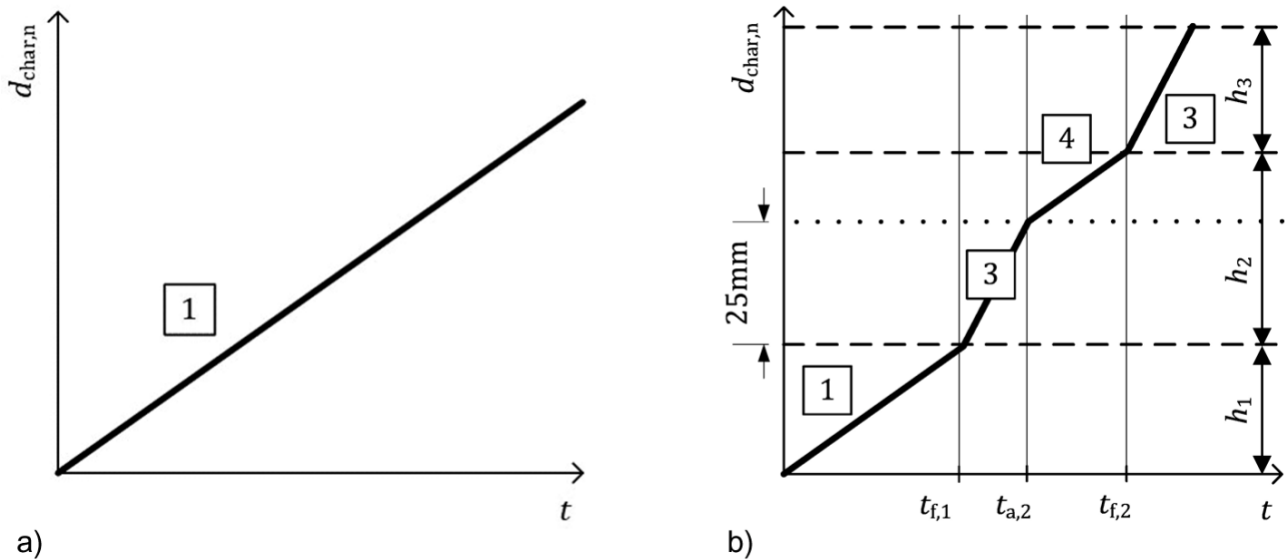


Abbildung 2-10 Abbrandverlauf von a) Massivholzprodukten, deren Klebfugenintegrität keinen Einfluss auf die Abbrandrate hat und b) Massivholzprodukten deren Klebfugenintegrität im Brandfall versagt und ein Abfallen der Lagen stattfindet (entnommen aus [55], Ursprung aus [53])

Das sogenannte „Treppenmodell“ wird bei abfallenden Lagen angewendet. Dabei muss nach dem Abfallen die doppelte Abbrandrate von meist 1,3 mm/min (Decken) bzw. 0,85 mm/min (Wände) angesetzt werden, bis sich eine Kohleschicht von 25 mm aufgebaut hat, falls sich diese nicht vorher erneut ablöst [53]. Die Abbrandverläufe der beiden Fälle wird in Abbildung 2-10 dargestellt. Dieses Phänomen kann zu signifikant höheren Abbrandraten bei Brettsperrholz führen und muss in der Bemessung der Tragfähigkeit sowie des Raumabschlusses beachtet werden.

Bei anfänglich geschützten Bauteilen tritt das Verhalten ähnlich zu Abbildung 2-10 b) auf, wird jedoch über die Schutzzeit  $t_{ch}$  bis zum Einsetzen des Abbrands hinter der Schutzbekleidung und eine Zeit bis zum Abfallen der Schutzbekleidung  $t_{f,pr}$  verzögert. In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf unbedeckte Massivholzbauteile gelegt, da dieser Anwendungsfall kritischer ist. Daher werden anfänglich geschützte, bekleidete Bauteile nicht weiter behandelt.

Bei Brettschichtholzelementen die als Brettstapel-Deckenelemente eingesetzt werden ist aufgrund der vertikal zur brandbeanspruchten Fläche verlaufenden Lamellen kein Abfallen von verkohlten Brettlagen zu berücksichtigen. Es kann daher wie bei Vollholz von einer konstanten Abbrandrate von 0,65 mm/min und dadurch geringeren Abbrandtiefen ausgegangen werden.

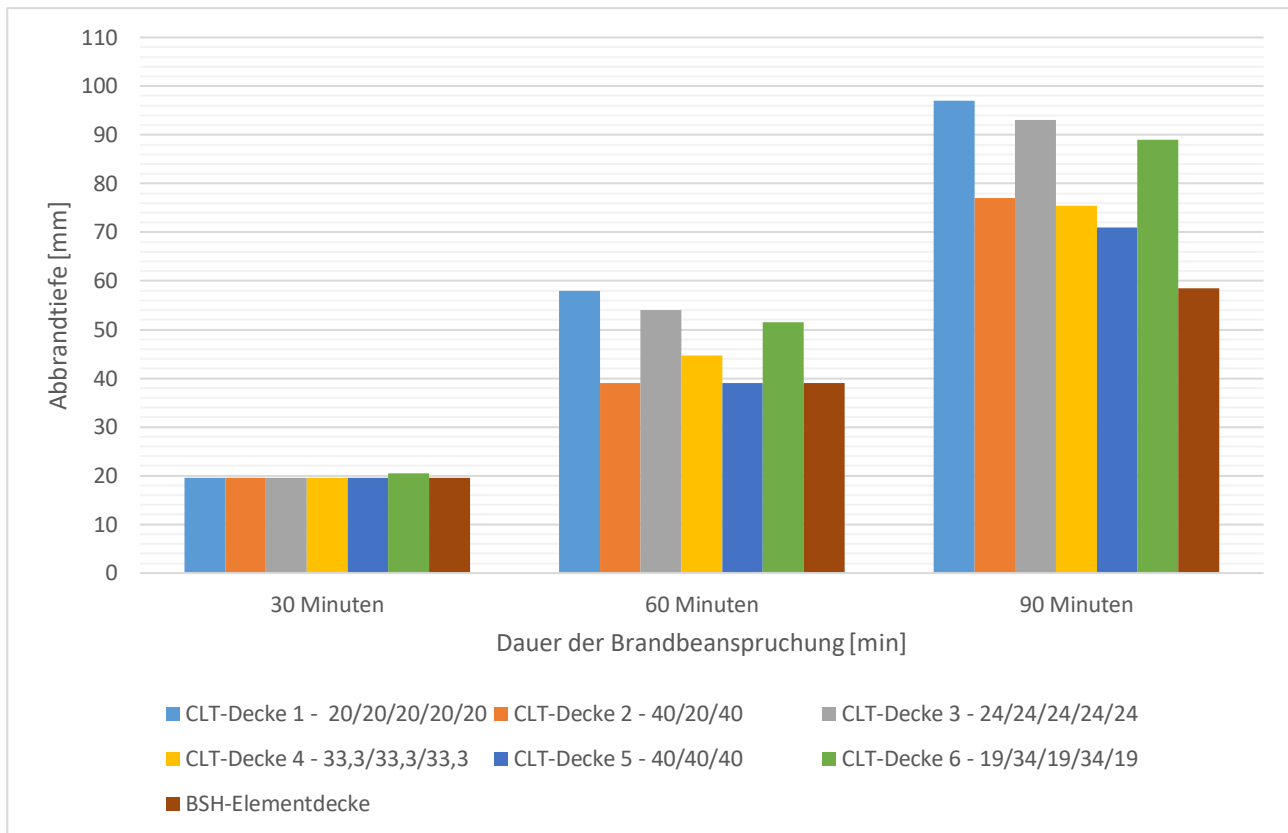


Abbildung 2-11 Vergleich der rechnerischen Abbrandtiefen verschiedener Massivholzprodukte (eigene Darstellung)

Aufgrund des Abfallens von Kohlstücken und der daraus resultierenden höheren Abbrandraten bis zu einem Erreichen einer Kohleschichtdicke von 25 mm, ergibt sich ein Einfluss der Dicken der Brettlagen auf die Abbrandtiefe. Dieser Einfluss ist besonders bei langen Brandbeanspruchungsdauern von Bedeutung. Die verschiedenen Abbrandtiefen für verschiedene Lagenaufbauten von Decken werden in Abbildung 2-11 dargestellt. Die Berechnung basiert dabei auf dem Treppenmodell von [53] und unter Annahme des Versagens der Klebfugenintegrität im Brandfall. Es zeigt sich, dass die Unterschiede erst ab einer Branddauer von über 30 Minuten Einfluss auf die Abbrandtiefe haben, da Decklagen mit mindestens 20 mm rechnerisch erst nach 30,8 Minuten abfallen und damit kein erhöhter Abbrand berücksichtigt werden muss.

Aufbauten mit einer dickeren Decklage, wie beispielsweise CLT 2 oder CLT 4, weisen eine niedrigere Abbrandtiefe auf, da die Dauer bis zum Durchbrand dieser Decklage immer mit dem einfachen Abbrand berechnet wird. Brettsperthölzer mit einer Lagendicke von maximal 25 mm besitzen rechnerisch immer die maximale Abbrandrate ab der zweiten Lage. Hier wird der Einfluss der Decklage besonders deutlich (CLT 6, CLT 2). Als Vergleich ist bei allen Säulenreihen die Abbrandtiefe einer BSH-Decke dargestellt. Diese steht ebenso für alle Produkte deren Klebfugenintegrität im Brandfall erhalten bleibt.

Ob Brettlagen abfallen oder nicht ist von der Feuer- und Hitzebeständigkeit des Klebstoffs abhängig. Untersuchungen der letzten Jahre ergaben, dass insbesondere 1-Komponenten-Polyurethan-

Klebstoffe (1K-PUR) dazu neigen unter Brandeinwirkung die Festigkeit zu verlieren, wodurch die verkohlten Brettlagen abfallen. Bei Melamin-Urea-Formaldehyd-Klebstoffen (MUF) trat dieser Effekt weniger stark auf [61]. Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch PUR-Klebstoffe auf dem Markt sind, die diese Eigenschaft nicht aufweisen [62]. Daher sollte nicht anhand des Klebstofftyps die Abbrandtiefe berechnet werden, sondern anhand der Klebfugenintegrität des Klebstoffs im Brandfall. Der amerikanische Standard fordert grundsätzlich brandsichere Klebemittel zur Verhinderung des Abfallens, wodurch das Treppenmodell nicht angewendet werden muss [46].

Eine Analyse der ETA-Zulassungen anhand der EAD 130005-00-0304 [63] zeigt, dass viele Brettsperrholzhersteller in den ETA's beide Klebstoffe als mögliche Klebstoffe angeben. Auch in den Datenblättern und Leistungserklärungen wird dies nicht immer eindeutig angegeben. Das bedeutet, dass bei der Bestellung von Brettsperrholz darauf geachtet werden muss, dass der entsprechende Klebstoff, der für die Bemessung angenommen wurde, auch tatsächlich bei der Produktion verwendet wird.

Weitere Einflussfaktoren auf das Abbrandverhalten sind:

- Anzahl und Breite der Fugen und Entlastungsnuten
- Rohdichte des Holzes
- Holzart

Auf diese wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da deren Einfluss in den Abbrandraten der entsprechenden Zulassungen berücksichtigt sind.

## **2.5 Prüfung und Anwendung von Abschottungssystemen (im Holzbau)**

### **2.5.1 Allgemeines**

Durch die aktuellen bauordnungsrechtlichen Vorgaben hinsichtlich der Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Tragkonstruktionen ergeben sich aufgrund der fehlenden harmonisierten Normen für Brettsperrholz Schwierigkeiten bei der Erweiterung der bestehenden Bauartgenehmigungen auf Massivholzkonstruktionen. Es wird hinterfragt, ob sich die technischen Gegebenheiten und das differenzierte Abbrandverhalten auf den Raumabschluss von Abschottungssystemen auswirken. Ein kritischer Punkt ist an dieser Stelle der Laibungsbereich der Öffnung, an dem es zu einem stärkeren Einbrennen kommen könnte.

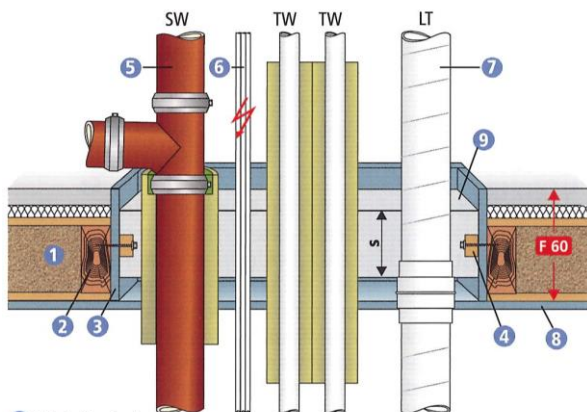
Um die Grundsätze der Prüfung und Zulassung von Abschottungssystemen zu verstehen, sollen in diesem Abschnitt die aktuelle Anwendungspraxis von Durchführungen im Holzbau aufgezeigt, die Prüfgrundsätze der entsprechenden Normen kurz aufgeführt und der normative Anwendungsbereich der geprüften Gegenstände erläutert werden. Anschließend soll die Problematik der Anwendbarkeit und Übertragbarkeit von Abschottungssystemen im Holzbau erläutert und aktuelle Forschungsergebnisse zu diesem Thema zusammengefasst werden.

### **2.5.2 Aktuelle Ausführung von Durchführungen im mehrgeschossigen Holzbau**

Bisher wurden geprüfte und bauaufsichtlich zugelassene Abschottungslösungen vorrangig für den Massiv- und Trockenbau entwickelt und am Markt vertrieben. Eine Übertragung der Ergebnisse auf den Holzbau, ohne genauere Betrachtung und Nachweise der Gleichwertigkeit, ist technisch nicht möglich [18]. Die geregelte Ausführung von Leitungsdurchführungen in Holzbauteilen beschränkt sich daher auf die Konstruktionen gemäß MLAR, die jedoch auf feuerhemmende Bauteile oder einzelne Leitungen beschränkt sind und daher nicht im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden sollen.

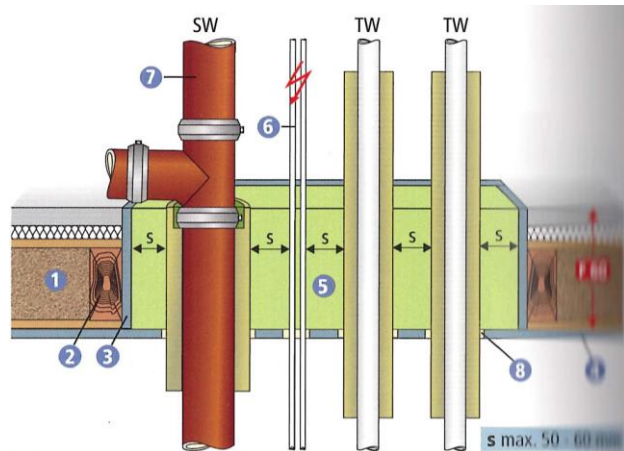
Aufgrund der Vorgaben der MHFHolzRL (alt) bzw. MHolzBauRL (neu) und der MLAR (siehe Abschnitt 2.2.3) sowie der Prüfnormen wurde bei Durchführungen in mehrgeschossigen Gebäuden aus Holz in den letzten Jahren vorrangig auf eine gewerkeübergreifende Ausführung, insbesondere für Decken mit Schachttyp B, zurückgegriffen. Die Ausführung der Deckendurchführungen erfolgt mit einer Laibungsbekleidung der Holzbauteile in entsprechender Qualität der Brandschutzbekleidung des flächigen Bauteils und einem Verguss mit Mörtel bzw. Beton (Abbildung 2-12a) oder mit einem Einbau von Mineralwolle-Weichschotts (Abbildung 2-12b). Letztere wurden insbesondere bei Durchführungen durch raumabschließende Trennwände angewendet, da bei Wänden ein Verguss mit Mörtel oder Beton nach der Montage der Leitungen nur schwer möglich ist.





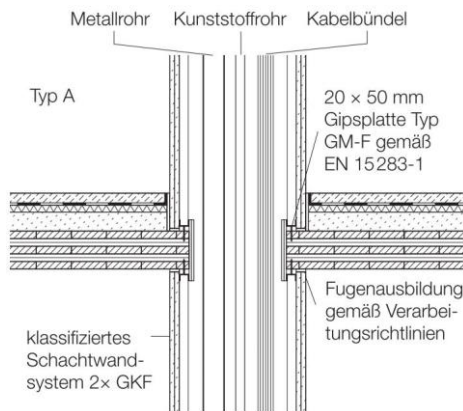
- 1 Holzbalkendecke
- 2 umlaufendes Füllholz
- 3 Auslaibung gemäß MHolzBauRL, Abschnitt 4.7
- 4 umlaufende Halteleiste
- 5 SML-Entwässerungsleitung oder brennbare Entwässerungsleitung mit R 30-/60-/90- bzw. EI 30-/60-/90-u/u-Brandschutzmanschette
- 6 Kabelbündel/Elektroleerrohre  $d \leq 32$  mm (kann als Einzelleitung gewertet werden)
- 7 Lüftungsleitung nach DIN 18017
- 8 Brandschutzbekleidung/Unterdecke nach MHolzBauRL, Abschnitt 4.2
- 9 Beton  $\geq 150$  mm, gemäß Verwendbarkeitsnachweis

(a) Prinzipdarstellung Kombiabschottung mit Laibungsbekleidung und Betonverguss einer Holzbalkendecke [16]

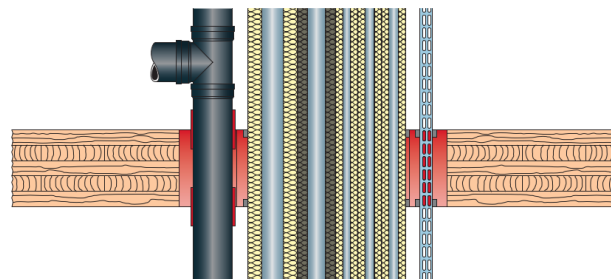


- 1 Holzbalkendecke
- 2 umlaufendes Füllholz
- 3 Auslaibung gemäß MHolzBauRL, Abschnitt 4.7
- 4 Brandschutzbekleidung/Unterdecke nach MHolzBauRL, Abschnitt 4.2
- 5 Mineralstopfwolle Stopfgewicht  $90 \text{ kg/m}^3$ , Schmelzpunkt  $> 1000$  °C
- 6 Einzelne Elektroleitungen Abstand  $1 \times d$
- 7 SML-Entwässerungsleitung
- 8 Restquerschnitt mit im Brandfall aufschäumendem Baustoff verschließen

(b) Prinzipdarstellung Kombiabschottung mit Laibungsbekleidung und Mineralwolle-Weichschott [16]



(c) Prinzipdarstellung Ausführung einer Laibung bei Schachttyp A mit sichtbarer Massivholzdecke [1]



(d) Prinzipdarstellung Ausführung einer Kombiabschottung bei Schachttyp B mit sichtbarer Massivholzdecke und intumeszierenden Brandschutzprodukten ohne Laibungsbekleidung [45]

Abbildung 2-12 Verschiedene Ausführungen von Durchführungen gemäß MHolzBauRL und MLAR sowie mögliche Ausführungen mit klassifizierten Brandschutzprodukten

Die Laibungsbekleidung soll eine äquivalente Anschlusssituation zu denen im Trocken- oder Massivbau sicherstellen. In Kaufmann et al. [1] wird zusätzlich zur Ausführung einer Laibungsbekleidung ein Gipsstreifen an den Rändern der Öffnung innerhalb der Schächte empfohlen, um einen Einbrand in den Laibungsbereich zusätzlich zu verhindern (Abbildung 2-12c). Die Ausführung mit Betonverguss oder Mineralwolleabschottungen stellt eine nicht wesentliche

Abweichung von den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen der verwendeten Abschottungssysteme dar.

Bei Schachttyp A beschränken sich die Maßnahmen auf die Verhinderung eines Einbrands in die Holzkonstruktion sowie die Sicherstellung des Raumabschlusses der Schachtwände im Anschlussbereich an die Deckenkonstruktion [1]. Dazu muss die Laibungsbekleidung entsprechend der Anforderungen an die flächige Brandschutzbekleidung ausgeführt werden (siehe Abbildung 2-12c) sowie im Anschlussbereich entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung eines Brandüberschlags über die brennbare Konstruktion getroffen werden.

Diese Prinzipien gelten in der MHolzBauRL für Bauteile in Holztafelbauweise, werden jedoch in der Praxis mangels gültiger Regelungen auf die Holzmassivbauweise übertragen. Eine Übertragung der Prinzipien auf Durchführungen in Trennwänden ist ebenfalls möglich. Hier ist jedoch ein Verguss der Öffnung mit Beton oder Mörtel baupraktisch schwieriger in der entsprechenden Qualität umzusetzen und daher unwirtschaftlich.

Eine Ausführung von Durchführungen mit Laibungsbekleidung wird von mehreren Veröffentlichungen empfohlen [14; 18], da sowohl ein Einbrand in die Konstruktion selbst als auch ein früherer Einbrand im Laibungsbereich der Abschottung verhindert wird. Dies wird jedoch aufgrund des Aufwands für die baustellenseitige Montage der Laibung, des Schalungsbaus sowie der, aus abbundtechnischen Gründen, meist ausgerundeten Ecken von Massivholzelementen vermehrt hinterfragt [1; 45]. Die Ausführung der Laibung in den Ecken des Durchbruchs stellt umgekehrt sogar einen Schwachpunkt hinsichtlich der Rauchdichtigkeit dar (siehe Abbildung 2-13). Wenn die Ecken nicht sauber ausgeführt werden, müssen diese im Nachgang durch zusätzliche Maßnahmen dauerhaft abgedichtet werden.



Abbildung 2-13 Mangelhafte Ausführung einer Laibungsbekleidung in den Ecken (eigene Darstellung)

Aus diesen Gründen haben führende Hersteller von Abschottungssystemen bestehende Abschottungssysteme in Bauteilen aus Holz ohne Laibungsbekleidung prüfen lassen und die

Leistungsfähigkeit nachgewiesen [34; 64; 65]. Auch in orientierenden Prüfungen von Universitäten, Hochschulen und Forschungsinstituten wurde die Leistungsfähigkeit dieser Art der Ausführung bestätigt. Diese Erkenntnisse werden in Abschnitt 2.6 genauer betrachtet. Eine breite Anwendung dieser Prüfergebnisse ist jedoch aktuell aufgrund der bauordnungsrechtlichen Situation nicht möglich und die Anwendbarkeit erfolgt auf Basis von nicht wesentlichen Abweichungen. Die bauordnungsrechtliche Problematik wird im nächsten Abschnitt nochmals zusammengefasst und anschließend genauer auf die Prüf- und Beurteilungsgrundsätze der einschlägigen Normen eingegangen.

### **2.5.3 Aktuelle Anwendbarkeitsnachweise von Abschottungssystemen im Holzbau**

Wie im letzten Abschnitt erläutert, können gemäß MHolzBauRL klassifizierte und bauaufsichtlich zugelassene Abschottungssysteme in Öffnungen mit Laibungsbekleidung eingebaut werden. Neben dem genannten Betonverguss und Mineralwolleplatten als Weichschott können damit grundsätzlich auch andere Brandschutzprodukte, wie beispielhaft in Abschnitt 2.2.6 aufgeführt, eingebaut werden. Der Nachweis erfolgt anschließend auf Basis der Anwendbarkeitsnachweise des Abschottungssystems in Verbindung mit dem Nachweis des Raumabschlusses der Tragkonstruktion.

Es ist dabei zu berücksichtigen, dass Abschottungsprodukte maximal die Feuerwiderstandsdauer der zugrunde liegenden Konstruktion erreichen können [45]. Da für den Einbau in Holzbauteile sehr wenige allgemeine Anwendbarkeitsnachweise (wie z.B. aBG's oder abP's) vorliegen, erfolgt der Einbau meist durch die Bescheinigung einer nicht wesentlichen Abweichung des Errichters.

Dass die Abweichung nicht wesentlich ist, ist laut Lippe et al. durch die baurechtliche Festlegung gesichert [16]. Diese Abweichung erfolgt häufig auf Basis von gutachterlichen Stellungnahmen, die bei den Systemgebern hinterlegt sind oder projektspezifisch angefertigt werden. In der Praxis kommt es hier jedoch durch die Trennung von Planung und Ausführung sowie die zusätzliche gewerkeübergreifende Ausführung häufig zu Fehl- oder Nichtplanungen, Ausführungsmängeln hinsichtlich Qualität (siehe beispielsweise Abbildung 2-13) sowie Diskussionen hinsichtlich Haftung und Dokumentation. Es stellt sich die Frage, wer für die nicht wesentliche Abweichung die Haftung übernimmt, wenn mehrere Gewerke (z.B. Holzbau, Trockenbau, Betonbau, Sanitär und Elektro) an einer Ausführung beteiligt sind, die die Fachplaner im Idealfall richtig und frühzeitig geplant haben.

Eine Liste [66] von Produkten, welche grundsätzlich für den Holzbau tauglich sind, wurde im Zuge eines Forschungsprojekts [18] erstellt und ist frei verfügbar.

Eine Ursache für das Fehlen von Anwendbarkeitsnachweisen sind der in der DIN EN 1366-3 definierte direkte Anwendungsbereich von Prüfergebnissen, welcher für Holzbauteile bis zur Änderung im Mai 2022 gar nicht vorhanden war und auch die neue Fassung die gängige Holzbaupraxis nicht adäquat abbildet. Dadurch beschränkte sich die Anwendbarkeit der Prüfergebnisse auf „das was geprüft wurde“ und eine Übertragbarkeit auf andere Varianten war nicht gegeben.

Der zweite Grund sind die fehlenden technischen Regeln für Massivholzbauteile und allgemein Holzbauteile mit einer Feuerwiderstandsfähigkeit von mehr als 60 Minuten (siehe Abschnitt 2.3.4. Dies führt dazu, dass keine Grundlage für eine allgemeine Beschreibung der Anwendbarkeit in Bezug auf Bauteile gemäß einer technischen Regel vorhanden ist und sich dadurch die Anwendbarkeit auf die, in der Prüfung verwendeten, nicht geregelten Bauarten beziehen muss. Durch die Erneuerung der technischen Regeln wird hier in den nächsten Jahren eine erweiterte Anwendung grundsätzlich möglich sein.

Im Folgenden werden die Prüfgrundsätze der DIN EN 1363-1 zusammengefasst und deren Bedeutung für die Anwendbarkeit von Abschottungen in Holzbauteilen erläutert.

#### **2.5.4 Prüfgrundsätze der DIN EN 1363-1**

Die *DIN EN 1363-1 – Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen* definiert allgemeine Grundsätze für die Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von verschiedenen Bauteilen, um die Ergebnisse der Prüfungen vergleichbar zu machen und einen Rahmen für die europäische Klassifizierung von Bauteilen festzulegen. Diese Prinzipien gelten für alle Prüfnormen der DIN EN 1364-Reihe bis DIN EN 1366-Reihe, welche darüber hinaus für die jeweiligen Bauteile (z.B. Abschottungen) detailliertere Prüfvorgaben und Anwendungsregeln festlegen.

In der DIN EN 1363-1 werden Anforderungen an folgende Bestandteile einer Feuerwiderstandsprüfung gestellt:

- Prüfgeräte (z.B. Prüfofen, Thermoelemente und sonstige Messeinrichtungen)
- Prüfbedingungen (z.B. Ofentemperatur(kurve), Ofendruck, Belastung, Umgebungstemperatur)
- Probekörper (z.B. Größe, Anzahl, Ausführung)
- Einbau der Probekörper (z.B. (Norm)-Tragkonstruktion)
- Anwendung der Messeinrichtung (z.B. Thermoelemente, Druckmessung)
- Durchführung der Prüfung (z.B. Einspannung, Messungen und Beobachtungen, Kriterien für Prüfung des Raumabschlusses)
- Leistungskriterien (Tragfähigkeit, Raumabschluss, Wärmedämmung)
- Prüfbericht (Aufbau und Darstellung)

In den Anhängen der Norm werden zusätzliche Anwendungsregeln, Vorgaben für die Beschaffenheit von Messgeräten und Materialien sowie spezielle Prüfsituationen geregelt.

Die Ofentemperatur muss der in Formel Formel (2-2) aufgeführten Einheits-Temperatur-Kurve (ETK) entsprechen und unterliegt definierten Grenzabweichungen.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{aus DIN EN 1363-1 [41]} \quad \text{Formel (2-2)}$$

---

$T$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Mittlere Ofentemperatur
$t$	[min]	Zeit ab Beginn der Prüfung

Außerdem werden die Leistungskriterien Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung hinsichtlich möglicher Versagenskriterien definiert. Für das Leistungskriterium Raumabschluss sind eine Entzündung des Wattedauschs, ein Durchdringen der Spaltlehre oder eine anhaltende Flammenbildung Versagenskriterien. Für das Leistungskriterium Wärmedämmung sind es eine mittlere Temperaturerhöhung der Oberflächenthermoelemente von mehr als 140 K oder eine Temperaturerhöhung an einer Stelle von mehr als 180 K. Wenn das Kriterium Raumabschluss nicht erfüllt wird, ist automatisch auch die Wärmedämmung nicht erfüllt. Während der Prüfung müssen zudem Flammenbildung, Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Abplatzen, Verkohlen oder Abfallen aufgezeichnet werden.

In der DIN EN 1363-1 werden zudem Norm-Tragkonstruktionen definiert, die eine Übertragung auf andere Konstruktionen vereinfacht ermöglichen. Deren Prinzipien und Funktionen im Zulassungswesen werden im nächsten Abschnitt behandelt.

### 2.5.5 Tragkonstruktionen nach DIN EN 1363-1

Prüfkörper müssen teilweise in sogenannte Tragkonstruktionen eingebaut werden, wenn diese beispielsweise zu klein zum Verschließen der Ofenöffnung sind oder, wie beispielsweise bei Türen und Abschottungssystemen, die Interaktion zwischen Tragkonstruktion und Prüfkörper relevant für das zu erwartende Leistungsverhalten und damit die Klassifizierung sind.

In der DIN EN 1363-1 werden hierzu die Begriffe „Norm-Tragkonstruktionen“ und „nicht genormte Tragkonstruktionen“ unterschieden. Norm-Tragkonstruktionen sind Massivkonstruktionen aus Mauerwerk oder Massivbeton, Porenbeton oder leichte Trennwände in Trockenbauweise mit Stahlständern und Gipskartonplatten. Alles andere und damit alle Tragkonstruktionen aus Holz sind „nicht genormte Tragkonstruktionen“.

Für die Norm-Tragkonstruktionen werden entsprechende Vorgaben gemäß dem Baustoff sowie der Ausführungsweise definiert. Die Vorgaben beziehen sich hierbei auf das Material selbst (z.B. Massivbeton oder Mauerwerk), die Rohdichte des Gesamtaufbaus sowie eine entsprechende Dicke oder Beschaffenheit, die vom Prüfinstitut anhand der Feuerwiderstandsdauer festgelegt werden soll. Welche Dicke für welche Feuerwiderstandsdauer zu verwenden ist, wird für die Massivkonstruktionen in der DIN EN 1363-1 nicht explizit festgelegt.

Bei den Leichtbau-Norm-Tragkonstruktionen werden sehr genaue Angaben zur Materialität und Dicke der Profile, zum Typ der Gipskartonplatte, zu den Befestigungsmitteln, zur Fugenspachtel,

sowie zur Wärmedämmung gemacht. Ebenfalls definiert sind Anforderungen an die Konstruktion, wie beispielsweise die Anschlüsse, Befestigungsmittelabstände, Ständerabstände, Lage der Stöße sowie eine Tabelle mit genauen Vorgaben je vorgesehener Feuerwiderstandsklasse. Es zeigt sich, dass für komplexere, mehrschichtige Konstruktionen detailliertere Vorgaben als für massive, monolithische Konstruktionen definiert werden. In Bezug auf Tragkonstruktionen aus Holz stellt sich damit die Frage, welche Vorgaben gemacht werden müssten, um Norm-Tragkonstruktionen zu entwickeln.

Im Anhang B werden Hintergründe der Norm-Tragkonstruktionen genauer erläutert. Ziel ist es einen quantitativ bestimmbareren Einfluss der Wärmeübertragung zwischen der Tragkonstruktion und dem Probekörper zu gewährleisten und den Widerstand der Tragkonstruktion gegen ein wärmeinduziertes Verformen zu kennen. Durch den direkten Anwendungsbereich wird anschließend sichergestellt, dass Prüfkörper für den Einbau in die entsprechenden Tragkonstruktionen geeignet sind und selbst eine entsprechende Feuerwiderstandsfähigkeit besitzen.

Durch Prüfungen in nicht genormten Tragkonstruktionen soll das breite direkte Anwendungsspektrum aus den Norm-Tragkonstruktionen um einzelne Sonderkonstruktionen ergänzt werden. Als Hintergrund wird genannt, dass bei diesen Tragkonstruktionen die Einflüsse aus der Wärmeübertragung sowie wärmeinduzierten Verformungen nicht bekannt sind und damit die Aussagekraft einer Prüfung in nicht genormten Tragkonstruktionen nicht mit der Prüfung in einer Norm-Tragkonstruktion vergleichbar sei.

### **2.5.6 Prüf- und Beurteilungsgrundsätze der DIN EN 1366-3**

Die *DIN EN 1366-3 – Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen – Teil 3: Abschottungen* definiert ein Prüfverfahren und Kriterien zur Beurteilung von Abschottungssystemen hinsichtlich ihrer Fähigkeit den Raumabschluss von Bauteilen aufrechtzuerhalten. Außerdem sollen die Wechselwirkungen zwischen Abschottung und den Tragkonstruktionen, die stellvertretend für Wände und Decken verwendet werden, nachgestellt werden [22]. Die Prüfmethode gelten dabei nur für Kabel- und Rohrabschottungen, sowie für Kombischotts. Lüftungsleitungen und Brandschutzklappen werden in anderen Teilen der Normreihe behandelt.

Die Norm greift bei den Regelungen, Vorgehensweisen und Anforderungen im Allgemeinen auf die Grundregeln der DIN EN 1363-1 zurück. Die Regelungen werden ergänzt, spezifiziert oder teilweise auch davon abgewichen, da bei einer Prüfung von Abschottungen häufig spezielle Rahmenbedingungen beachtet werden müssen. Beispielsweise wird bei den Druckbedingungen festgelegt, dass ein Mindestdruck von 10 Pascal an den Leitungen herrschen muss. Ein weiteres Beispiel ist der Ausschluss der mittleren Temperaturerhöhung als Kriterium für die Wärmedämmung oder die genauere Definition zum Einbau von Leitungen und deren Abschottungen.

Insgesamt zielt die DIN EN 1366-3 darauf ab, einen großen Bereich von Situationen mit einer Mindestanzahl von Prüfungen abzudecken, um die kostenintensiven Brandversuche auf ein Minimum zu beschränken, ohne das Sicherheitsniveau von Abschottungen zu verschlechtern. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass es möglich ist kritischere bzw. ungünstigere Situationen zu

prüfen und auf sicherere Situationen zu übertragen. Beispielsweise sind kleinere Abschottungen inbegriffen, wenn eine größere Abschottung positiv bewertet wurde. Außerdem können Prüfungen in Leichtbauwänden auf eine Anwendung in Massivkonstruktionen übertragen werden und Prüfungen ohne Öffnungslaibungsbekleidung dürfen für Anwendungen mit Laibungsbekleidungen verwendet werden.

Ein weiterer, nachvollziehbarer Grundsatz ist die „Nachbildung der Praxis“, welche in vielen Abschnitten als Vorgabe zu finden ist. Diese bezieht sich in der Regel auf die Einbausituation in die Tragkonstruktion oder den Aufbau der Tragkonstruktion selbst. Hintergrund hierfür sind die Wechselwirkungen zwischen Abschottung und dem umliegenden Teil der Tragkonstruktion, wie in Abschnitt 2.5.2 aufgeführt. Um eine sichere Anwendung auf der Baustelle zu gewährleisten, müssen diese Gegebenheiten und Anschlussdetails auch in den Prüfungen weitestgehend abgebildet werden.

Da die Tragkonstruktionen für die Leistungsfähigkeit von Abschottungssystemen von entscheidender Bedeutung sind, werden diese auch in der DIN EN 1366-3 spezifisch behandelt und insbesondere für Leichtbau-Tragkonstruktionen gegenüber der DIN EN 1363-1 detaillierter definiert. Neben Massivkonstruktionen und Leichtbaukonstruktionen werden in der Neufassung der DIN EN 1366-3 erstmals auch Konstruktionen aus Brettsperrholzplatten als mögliche, jedoch nicht normierte Tragkonstruktion aufgenommen und Regelungen für den direkten Anwendungsbereich von Prüfungen in Brettsperrholzkonstruktionen definiert.

Der direkte Anwendungsbereich ist ein zentraler Bestandteil der DIN EN 1366-3 und definiert, auf welche Situationen die Ergebnisse aus der Prüfung direkt angewendet werden dürfen. Neben dem direkten Anwendungsbereich können Prüfungen auf Grundlage der zugehörigen *DIN EN 15882-3 - Erweiterter Anwendungsbereich der Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen – Teil 3: Abschottungen* erweitert angewendet werden. Der direkte und erweiterte Anwendungsbereich der geprüften Gegenstände werden im folgenden Abschnitt behandelt und insbesondere auf die Vorgaben bei Brettsperrholzkonstruktionen eingegangen.

### **2.5.7 Normativer Anwendungsbereich der geprüften Gegenstände**

Da in der Regel neben den geprüften Probekörpern sehr viele verschiedene Untervarianten der Produkte vertrieben werden, ist es praktisch unmöglich diese in jeder Variante und Kombination zu prüfetechnisch zu beurteilen. Gleichzeitig dürfen keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem geprüften Gegenstand vorgenommen werden, die die Feuerwiderstandsfähigkeit negativ beeinflussen würden. Um Abweichungen von den geprüften Probekörpern mit einem angemessenen Grad an Sicherheit vornehmen zu können, wird ein Anwendungsbereich von Prüfergebnissen definiert. [41] Es wird zwischen einem direkten und erweitertem Anwendungsbereich unterschieden. Diese werden allgemein in der DIN EN 1363-1, Anhang A beschrieben. Die DIN EN 15725 definiert die Struktur und Inhalt der Berichte zum direkten und erweiterten Anwendungsbereich. In den einzelnen Prüfnormen (z.B. DIN EN 1366-3) werden darüber hinaus die baustoff- oder typenspezifischen Kriterien für den direkten und erweiterten

Anwendungsbereich je Art des Baustoffs definiert. So gelten für Prüfergebnisse von Kombiabschottungen beispielsweise andere Anwendungsregeln als für Prüfergebnisse von Kabelboxen.

Außerdem ist zu beachten, dass der in einer Prüfnorm definierte normative Anwendungsbereich nur indirekt eine Anwendung in der Praxis zulässt. Das Anwendungsspektrum, welches in den bauaufsichtlich erlassenen Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen wie z.B. allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder allgemeinen Bauartgenehmigungen festgelegt wird, basiert zwar häufig auf dem direkten oder erweiterten Anwendungsbereich der Prüfnorm, ist jedoch nicht damit gleichzusetzen.

### **Direkter Anwendungsbereich**

*„Ergebnis aus einer Vorgehensweise (unter Berücksichtigung von festgelegten Regeln), bei der das Prüfergebnis bei Änderungen in einer oder mehreren Produkteigenschaft(en) und/oder beabsichtigten Endanwendung(en) als gleichwertig angesehen wird“ [67]*

Im Anhang A der DIN EN 1363-1 wird der direkte Anwendungsbereich eines Prüfergebnisses als „[zulässiger] Umfang, in dem ein geprüftes Produkt in einem direkten Anwendungsbereich [ohne erneute Beurteilung oder Berechnung] verändert werden kann“ beschrieben. Die Festlegung dient dazu die üblichen baulichen Ausführungsvarianten gefahrlos zu ermöglichen. Der direkte Anwendungsbereich liegt auf der sicheren Seite, damit die Bauaufsicht das Produkt anerkennen kann, ohne dieses nochmal selbst zu beurteilen oder extern gutachterlich beurteilen zu lassen.

Ein klassisches Beispiel ist die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen von Abschottungssystemen in Ziegelmauerwerken. Es wäre unmöglich, das Abschottungssystem in allen, auf dem Markt existierenden Ziegelmauerwerken, mit allen für das Mauerwerk zulässigen Mauerwerksfugen (Mörtelfugen) und in allen Größen und Dicken zu prüfen. Daher ist im direkten Anwendungsbereich der DIN EN 1366-3 definiert, dass eine Übertragbarkeit der Prüfergebnisse mit Massiv-Normtragkonstruktionen auf sämtliche Ziegelmauerwerke, die den Norm-Kriterien der Norm-Tragkonstruktion entsprechen, gegeben ist, da eine gefahrlose Abweichung vorliegt. Die Übertragbarkeit basiert beim direkten Anwendungsbereich häufig auf einer Interpolation zwischen zwei (positiven) Prüfergebnissen.

### **Erweiterter Anwendungsbereich**

*„Ergebnis aus einem Verfahren (unter Berücksichtigung von festgelegten Regeln, die Berechnungsverfahren beinhalten können), mit dem bei Änderung einer Produkteigenschaft und/oder der beabsichtigten Endanwendung(en) ein Prüfergebnis auf der Basis eines Prüfergebnisses oder mehrerer Prüfergebnisse nach der gleichen Prüfnorm ermittelt wird“ [67]*

Da sich der direkte Anwendungsbereich von Prüfergebnissen auf konservative, bewährte Anwendungsregelungen beschränkt, treten in der Praxis häufig Lücken in der Anwendbarkeit der Prüfergebnisse auf. Diese können beispielsweise durch neuere, innovative Baustoffe oder



Veränderungen des Prüfkörpers auf bestimmte bauliche Situationen auftreten, die nicht durch Interpolation zwischen zwei Prüfergebnissen abgedeckt sind.

Der erweiterte Anwendungsbereich von Prüfergebnissen ist eine Methode, um Anwendungen, die über den direkten Anwendungsbereich hinausgehen, allgemein anhand von normativ festgelegten Berechnungsverfahren oder vereinbarten Expertenbeurteilungen extrapolierend zu ermöglichen. Er ist daher nicht mit Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) oder vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen (vBG) gleichzusetzen, sondern ein Instrument um projektbezogene Gutachten durch allgemeine Gutachten zu ersetzen, die in die allgemeinen Anwendbarkeitsnachweise einfließen.

Die Umsetzung des erweiterten Anwendungsbereichs erfolgt über Berichte gemäß DIN EN 15725 [67] durch anerkannte Stellen, die die bauliche Situation oder Produktvariante bewerten. Der Rahmen für die Bewertung erfolgt nach den Regelungen der sogenannten EXAP-Standards, die für jede Prüfnorm und damit jeden Bauteiltyp separat festgelegt werden. Der erweiterte Anwendungsbereich der Ergebnisse von Feuerwiderstandsprüfungen für haustechnische Installationen wird in der Normenreihe der DIN EN 15882 geregelt. Für Abschottungen ist der Teil 3 [27] maßgebend.

Dort werden kritische Parameter und Faktoren definiert, die bei einer nicht direkten Anwendung der Prüfergebnisse geändert werden können, wie beispielsweise die Lage der Durchdringungen oder Brandbeanspruchung. Die einzelnen Faktoren haben einen Einfluss auf die Kriterien Raumabschluss, Wärmedämmung und Rauchleckage (Verschlechterung oder Gleichwertigkeit). Für jeden Einfluss auf die Kriterien werden dann Regeln formuliert, wie mit der Änderung umgegangen werden muss, damit diese beurteilt werden kann. Die Regel besagt oftmals eine zusätzliche Prüfung der Installation nach DIN EN 1366-1 bzw. 2. Für Abschottungen hingegen werden die Änderungen (Variationen) des direkten Anwendungsbereiches auf ihre Zulässigkeit hin beurteilt. Der Teil 3 der DIN EN 15882 lässt bestimmte Änderungen der geprüften Konstruktion zu.

Die Normen zur erweiterten Anwendung beschreiben Prüfverfahren zur Bestimmung und Beurteilung erweiterter Anwendungen einer nach Norm geprüfter Konstruktion. Mit den Regelungen kann also ermittelt werden, ob eine Abänderung der geprüften Konstruktion ohne weitere Bauteilprüfung möglich ist. Es ist immer möglich, eine spezielle Einbausituation prüfen zu lassen. Die Prüfergebnisse gelten dann aber nur für diese eine Konstellation [15].

### **Anwendungsbereich der DIN EN 1366-3 für Massivholzbauteile**

Wie bereits erwähnt wurden Massivholzbauteile im Zuge der Änderung der DIN EN 1366-3 in Abschnitt 13.3 „Direkter Anwendungsbereich der Prüfergebnisse – Tragkonstruktionen“ aufgenommen. Dieser Abschnitt soll im Folgenden zusammengefasst und die darin enthaltenen Formulierungen erläutert werden.

Im ersten Absatz von Abschnitt 13.3.4 wird beschrieben, dass „mit Brettsperrholzwänden erzielte Ergebnisse [...] ebenfalls für dieselbe Brettsperrholzwand mit größerer Dicke [gelten]“. Dies

bedeute, dass eine Übertragbarkeit praktisch nicht gegeben sei, da „dieselbe“ Brettsperrholzwand nur einmal verbaut werden kann. Nachdem diese im Versuch abgebrannt wurde, wäre eine Anwendung auf der Baustelle gar nicht möglich. Außerdem ist damit eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Brettsperrholz-Hersteller nicht möglich, auch wenn die anderen Bedingungen erfüllt sind.

Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Autoren diesen Absatz anders gemeint haben oder ein Übersetzungsfehler aus dem Englischen vorliegt, da „Brettsperrholzwände mit größerer Dicke“ als möglich gesehen werden. Darüber hinaus werden weitere Einschränkungen genannt, die alle erfüllt sein müssen, um eine Übertragbarkeit zu ermöglichen. Diese werden hier nicht im Einzelnen genannt und analysiert, da sich darin Unklarheiten hinsichtlich Begrifflichkeiten und Formulierungen ergeben, die in einer weiteren Überarbeitung genauer präzisiert werden müssen, um individuelle Auslegungen zu vermeiden.

Insgesamt zeigt sich, dass grundsätzlich versucht wird, zu beschreiben, unter welchen Umständen ein Brettsperrholzelement mindestens gleichwertig zum geprüften Element ist. Die Einflussfaktoren von Brettsperrholz im Brandfall (siehe Abschnitt 2.4.3) sind jedoch nur zum Teil in die geforderten Eigenschaften eingeflossen. Es fehlen beispielsweise Definitionen zum Lagenaufbau, zur Brettlagendicke, zum Klebstoff und zu einer Abbrandtiefe. Man könnte unter der Eigenschaft „die Konstruktion der Wand ist gleich“ verstehen, dass damit der Lagenaufbau gemeint ist. Jedoch ergäben sich auch daraus beispielsweise offene Fragestellungen hinsichtlich der Verwendung des Klebstoffs zusammen mit einem Lagenaufbau.

Die Definitionen in der DIN EN 1366-3 bezüglich Massivholz sollten daher angepasst oder über die Anpassung der DIN EN 15882-3 genauer geregelt werden, damit eine breitere Anwendbarkeit von Prüfungen gegeben ist. Aufgrund des Abbrandverhaltens von unbekleideten Massivholzprodukten, insbesondere der Variabilität der Abbrandtiefen, sind außerdem genauere Kenntnisse der Wechselwirkungen zwischen Tragkonstruktion und Abschottungssystem notwendig, um sinnvolle Anwendbarkeitsregeln zu definieren und ein Sicherheitsniveau zu gewährleisten. Dazu müssen kritische Parameter identifiziert und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bewertet werden können.

Im Folgenden werden daher die Erkenntnisse aus bestehenden Forschungsprojekten zusammengefasst.

## 2.6 Bisherige Forschungen zu Abschottungssystemen im Holzbau

In den letzten Jahren wurden bereits einige Forschungsprojekte zu Abschottungssystemen in Holzbauteilen durchgeführt. Die Prüfungen bezogen sich häufig auf Abschottungen in Holztafelbauwänden, die mit entsprechender Brandschutzbekleidung nach MHolzBauRL und einer Laibungsbekleidung ausgeführt wurden. Erst neuere Forschungsprojekte beschäftigten sich mit einem direkten Einbau in die Holzelemente. Nachfolgend werden die Ergebnisse der wichtigsten Projekte aufgeführt.

### 2.6.1 MPA Braunschweig (2006)

An der MPA Braunschweig wurden 2006 orientierende Untersuchungen mit Mineralwolle-Kombiabschottungen durchgeführt, die in K<sub>2</sub>60-bekleidete Wand- und Deckenelemente in Holztafelbauweise eingebaut waren. Die Laibungen der Durchdringungen waren ebenfalls mit einer K<sub>2</sub>60-Bekleidung, mit einem einfachen Stufenversatz, ausgeführt. Ziel der Untersuchung war der Nachweis der Brandschutzbekleidung im Laibungsbereich sowie die Prüfung der Leistungsfähigkeit der Abschottungen in den entsprechenden Konstruktionen. Die Kombiabschottungen wurden mit verschiedenen Leitungsarten (Kabeltrassen mit Kabeln, brennbare und nichtbrennbare Rohre) belegt. Die Leitungen wurden bei beiden Prüfungen sowohl mittig als auch mit Nullabstand zur Laibung eingebaut. Bei der Wandprüfung wurden die Mineralwolleplatten zweischalig, beidseitig bündig eingebaut (siehe Abbildung 2-14). Bei der Deckenprüfung wurden zwei Einbausituationen geprüft. Einmal zweischalig, beidseitig bündig sowie einmal oberseitig bündig, einschalig. (siehe Abbildung 2-15). Die Bauteile wurden jeweils 60 Minuten nach ETK beansprucht.

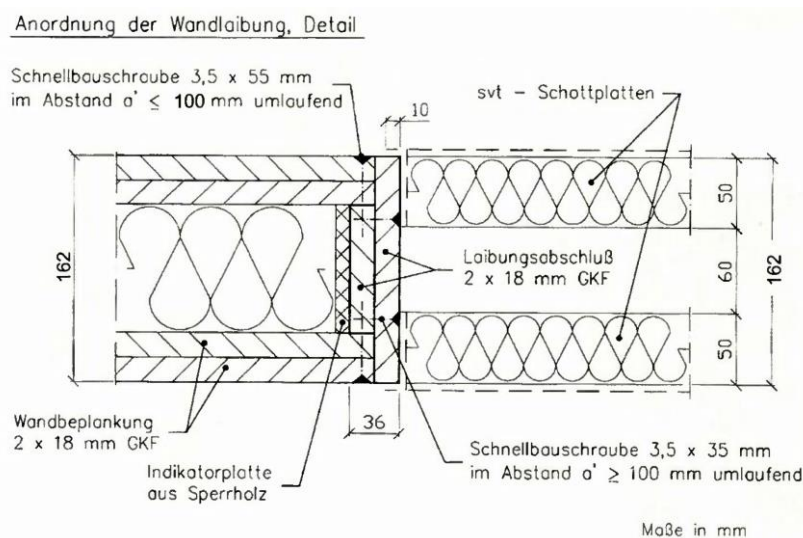


Abbildung 2-14 Schnitt durch die Laibungsausbildung der Abschottung bei der Wandprüfung [68]

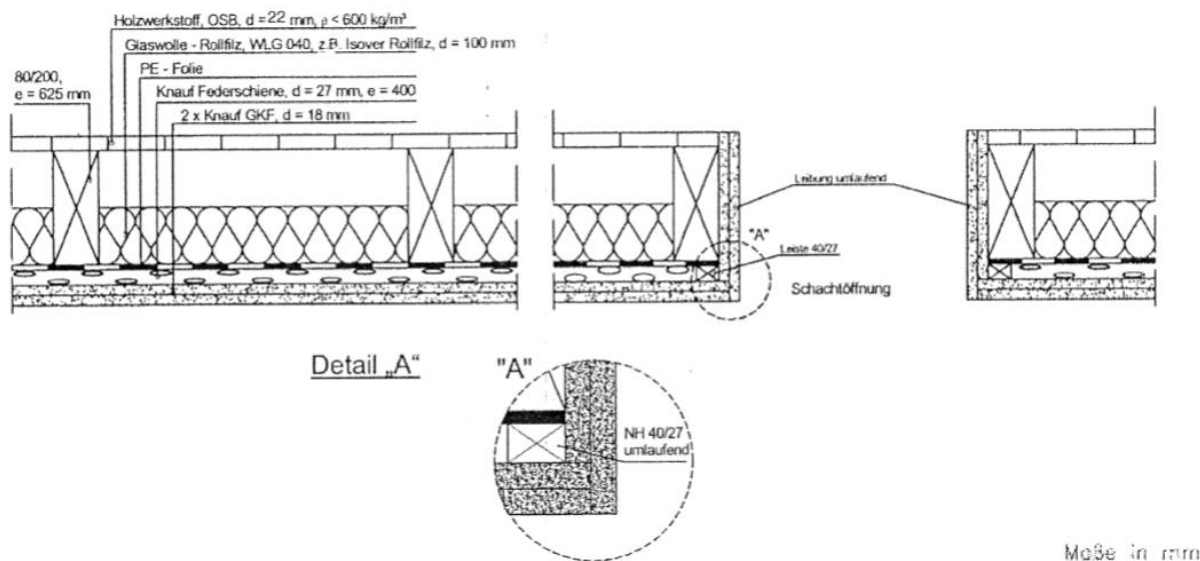


Abbildung 2-15 Schnitt durch die Laibungsbildung der Abschottung bei der Deckenprüfung

#### Ergebnisse Wandprüfung (Prüfbericht (3049/9435)-7-TP)

- Keine unzulässigen Temperaturerhöhungen an Kabel, Rohrleitungen und Kabeltrassen
- Temperaturerhöhungen auf Oberseite der Spanplatte im Bereich von 35 K bis 95 K
- Erhöhter Rauchaustritt an brennbaren Rohren bei Abschottung 1 (Kriterien nach DIN 4102-9 nicht eingehalten)
- Verfärbung der Indikatorplatte im Laibungsbereich an einer Schraubengruppe (keine Verkohlung!)

#### Ergebnisse Deckenprüfung (Prüfbericht (3049/9435)-13-TP)

- Keine unzulässigen Temperaturerhöhungen an Kabel, Rohrleitungen und Kabeltrassen
- Rauchaustritt bei Kabeln und brennbaren Rohrleitungen bei Abschottung 1 und 2
- Rauchdurchtritt in Laibungsbereich bei Abschottung 1 (ab Minute 25)
- Verkohlungen an den Holzbalken im Bereich des brandraumseitigen Laibungsbereiches bei Einbausituation „einschalig, oberseitig bündig“, Versagen des Kapselkriteriums

Die Ergebnisse zeigen die Funktionstüchtigkeit einer Laibungsbekleidung hinsichtlich des Einflusses auf die Leistungsfähigkeit der Mineralwolle-Kombiabschottungen aufgrund der Verhinderung einer Brandbeteiligung der umliegenden Konstruktion. Das Versagen des Kapselkriteriums aufgrund Verkohlung des Holzbalkens ist laut Prüfbericht auf die oberseitig bündige Anordnung der Abschottung zurückzuführen, da dadurch im unteren Bereich der Durchführung die Kanten zweiseitig beansprucht werden. Bei einer beidseitig bündigen, zweiseitigen Anordnung trat dieses

Versagen nicht auf. Ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Abschottung selbst besteht jedoch nicht. Dieser bezieht sich nur auf den Schutz der Konstruktion selbst.

## 2.6.2 FireIn Timber (2009, TU München)

Die TU München untersuchte für das Forschungsprojekt „Fire safety in timber buildings“ (kurz: FireIn Timber) [69] an der MFPA Leipzig klassifizierte Abschottungen, die in Holztafelbauwänden mit unterschiedlicher Beplankung eingebaut wurden (siehe Abbildung 2-16). In zwei Versuchen wurden die Abschottungssysteme und deren Tragkonstruktionen auf ihre Leistungsfähigkeit für eine Brandbeanspruchung von 30 bzw. 90 Minuten ausgelegt. Die Prüfungen wurden 43 bzw. 111 Minuten bis zum Versagen durchgeführt.

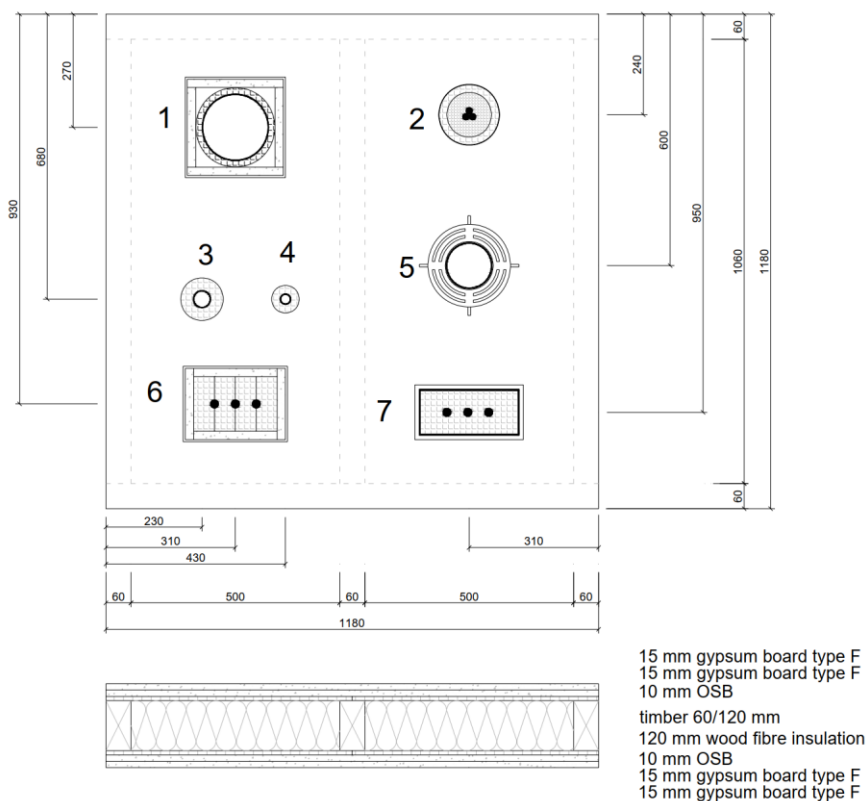


Abbildung 2-16 Ansicht und H-Schnitt des EI 90-Brandversuchs zu FireIn Timber [69]

Die Ergebnisse zeigen, dass die für den Massiv- und Trockenbau entwickelten Abschottungssysteme auch für Installationsdurchdringungen in Holztafelbauelementen geeignet sind und dass kein negativer Einfluss der Anschlussfugen auf das Versagensverhalten der Gesamtkonstruktion erkennbar war.

Es wird empfohlen, besondere Sorgfalt auf die Ausführung der Fugen zwischen Abschottungssystem und Holzkonstruktion zu legen, da diese bei den Prüfungen als kritisch identifiziert wurden. Dabei werden zwei Systeme unterschieden:



mit einer ober- und unterseitigen, umlaufenden Aufleistung aus 50 mm breiten GKF-Streifen (Gipsplatten Typ F) mit einer Dicke von 20 mm (Massivholz) bzw. 2 x 20 mm (Holztafelbaudecke), die einen Einbrand in den Fugenbereich ausreichend lange verhindern sollen.

Bei Mineralfaser-Abschottungen ohne Laibungsbekleidung wird eine Beschichtung der Laibung mit intumeszierenden oder ablativen Beschichtungen empfohlen.

Beim Einbau von wassergeführten Rohren wird ein Ausstopfen des Ringspalts mit Mineralwolle (Schmelzpunkt  $\geq 1000$  °C und Rohdichte  $\geq 40$  kg/m<sup>3</sup>) sowie eine beidseitige Abdichtung mit intumeszierenden Dichtstoffen empfohlen. Bei brennbaren Rohren sollen zusätzlich entsprechende Rohrmanschetten eingesetzt werden, die den Rohrquerschnitt im Brandfall abdrücken. Für die Befestigung dieser Manschetten wird die Befestigung in der Konstruktion mit einer Mindestverankerungslänge aus der berechneten Abbrandtiefe + 10 mm empfohlen.

Für den Einbau von Elektroleitungen wird auf die Herstellerangaben sowie deren Prüf- und Klassifizierungsberichte verwiesen sowie einige Beispiele gezeigt. Für Elektroleitungen werden keine genaueren Handlungsempfehlungen gegeben.

#### 2.6.4 FireIn Timber (2012, TU München)

Die TU München führte 2012 weitere Versuche für das Forschungsvorhaben FireIn Timber durch [70; 71]. Dieses Mal wurden unbekleidete Brettsperrholzelemente als Wand- und Deckenbauteile mit klassifizierten Abschottungssystemen geprüft.

Bei der **Wandprüfung** [70] wurden in eine 120 mm dicke, 5-lagige, melaminharzverklebte Brettsperrholzwand fünf verschiedene Einzelabschottungen sowie eine Mineralwolle-Kombiabschottung als Leerschott eingebaut. Beim Leerschott wurde brandzugewandt umlaufend ein Rahmen aus zwei Lagen Gipskartonplatten als Aufleistung verwendet. Die Laibung selbst wurde umlaufend mit einer Laibungsbekleidung ausgeführt, wobei zweiseitig zwischen Brettsperrholz und Gipsplatte noch eine Dämmung aus Mineralfaser eingelegt wurde. Die Ecken der Laibung wurden mit einem Stufenfalz ausgeführt. Die Einzeldurchführungen für nichtbrennbare Rohre, Elektrokabel(-bündel) und brennbare Rohre wurden alle ohne Laibungsbekleidung eingebaut. Die Ringspalte wurden teilweise mit Brandschutzdichtmasse verfüllt.

Neben den Messstellen nach DIN EN 1366-3 [22] wurden bei einigen Abschottungssystemen die Temperaturen in der Laibung in einer Tiefe von 60 mm aufgezeichnet. Die Brandbeanspruchung nach ETK betrug 93 Minuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass keine Abschottung hinsichtlich des Raumabschlusses versagte und keine Verfärbungen auf der brandabgewandten Seite erkennbar sind. Bei zwei Messstellen wurden unzulässige Temperaturerhöhungen über 180 K festgestellt, wodurch das Kriterium Wärmedämmung nicht eingehalten wird. Die gemessenen Temperaturen liegen jedoch weit unter der Entzündungstemperatur von Holz.

Bei der Kabelbox und bei der intumeszierenden Brandschutzdichtmasse wurde die 300°C-Grenze in einer Tiefe von 60 mm nach 65 Minuten erreicht, beim Brandschutzstopfen nach 73 Minuten und bei der Rohrmanschette blieb die Temperaturerhöhung dauerhaft unter 50 K. Extrapoliert auf eine Brandbeanspruchungsdauer von 95 Minuten entspricht dies einer Laibungsabbrandtiefe von 88 mm bzw. 78 mm. Ausgewertete Restquerschnitte hinsichtlich der Einbrandtiefen in die Laibungsbereiche sind nicht bekannt.

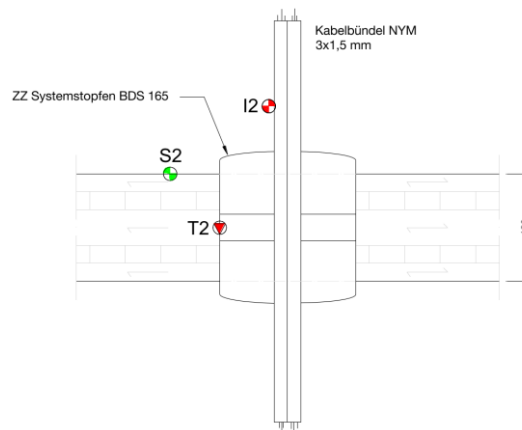


Abbildung 2-18 Detail Kabelabschottung bei Deckenprüfung FireIn Timber 2012 [71]

Bei der **Deckenprüfung [71]** wurden sechs Einzelabschottungssysteme sowie ein Mineralwolle-Kombiabschottung als Leerschott in eine gleich aufgebaute Brettsper Holzdecke eingebaut. Der Einbau und der Verschluss erfolgte gemäß den jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen der Systeme für den Einsatz in den Massiv- bzw. Trockenbau. Die Ausführung der Laibungen erfolgte wie bei der Wandprüfung, jedoch wurden die Temperaturen nur bei drei Abschottungssystemen in der Laibung gemessen. Die Brandbeanspruchung betrug ebenfalls 93 Minuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass außer bei der Rohrmanschette die Kriterien für EI 90 eingehalten werden. Bei der Rohrmanschette sorgte ein Montagefehler für das frühe Versagen nach nur 15 Minuten.

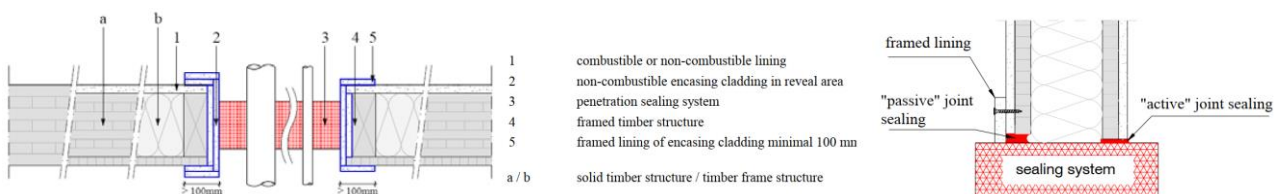


Abbildung 2-19 Empfehlung der Ausführung der Laibungsbereich bei Abschottungen in Holzbauteilen [72]

Die Abbrandgrenze in den Laibungen bei einer Tiefe von 60 mm wurde beim intumeszierenden Stopfen nach 68 Minuten erreicht (siehe Abbildung 2-18). Hier ergibt eine Extrapolation auf eine Brandbeanspruchung von 95 Minuten eine Laibungsabbrandtiefe von ca. 84 mm. Aus diesen Prüfungen wurden Empfehlungen abgeleitet, die von Werther et al. (2012) in [72] veröffentlicht wurden.



Darin werden für Mineralwolle-Kombiabschottungen für die Feuerwiderstandsdauer ausgelegte Laibungsbekleidungen inkl. Aufleistungen und für Einzelabschottungen umlaufende Aufleistungen inkl. Fugenverfüllung empfohlen (siehe Abbildung 2-19).

## 2.6.5 Konstruktionsregeln mehrgeschossiger Holzbau (2014, TU München)

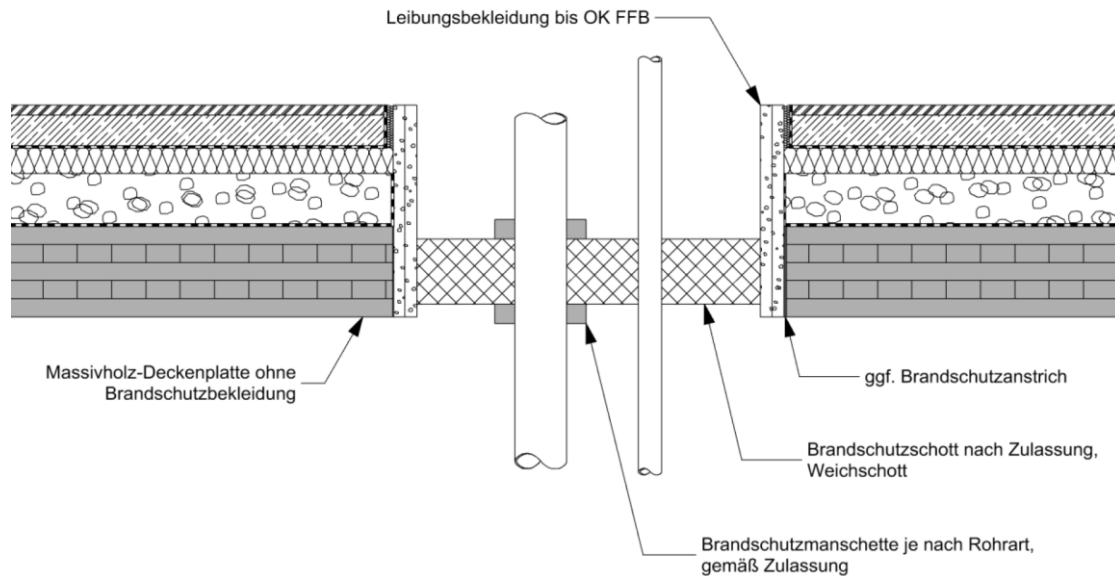


Abbildung 2-20 Empfehlung der Ausführung von Abschottungen in sichtbaren Massivholzdecken [19]

Für das Forschungsvorhaben der TU München „Konstruktionsregeln mehrgeschossiger Holzbau“ [19] wurden anhand bestehender Richtlinien und zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Erkenntnissen aus Brandprüfungen Empfehlungen für den Einbau von Abschottungen in hochfeuerhemmende Bauteile gegeben. Die durchgeführten Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens beschränken sich auf den Einbau von Leitungen in die Bauteile, nicht auf deren Durchdringung.

Es wird empfohlen die Laibung mit einer entsprechenden Brandschutzbekleidung in der Qualität der flächigen Bekleidung zu „kapseln“. Die Eckausbildungen können mit einem einfachen Versatz ausgeführt werden. Der Einbau von bauaufsichtlich zugelassenen Weichschotts aus Mineralfaserplatten sowie Abschottungen aus intumeszierenden schaumartigen Materialien (z.B. Brandschutzschaum) wird als geeignet beschrieben. In den Detailvorschlägen wird ergänzend genannt, dass die Aussparungen in den Massivholzplatten scharfkantig und passgenau auszuführen sind, welcher bei Bedarf mit einem Brandschutzanstrich an den Schnittkanten ergänzt werden soll, um Fugen bis zu 5 mm abzudichten.

## 2.6.6 Firestopping Test Witness Report (2016, GHL Consultants)

GH-Consultants verfassten 2016 im Auftrag des Canadian Wood Councils und des Brettsperrholzherstellers Nordic Structures eine Bewertung verschiedener Prüfungen mit Hilti-Abschottungssystemen in BSP-Elementen von Intertek und leiteten Empfehlungen für die Planung und Ausführung ab [73; 74].

Die Prüfungen wurden nach nordamerikanischem Standard durchgeführt, welche abweichende Kriterien und Klassifizierungen zu europäischen Prüfnormen aufweisen. Die Zusammenfassung beschränkt sich daher auf die allgemeinen Erkenntnisse und nicht auf die erreichten Feuerwiderstandsklassen. Unterschiede bestehen auch in den Prüfbedingungen. In Kanada werden die Brandversuche für Abschottungssysteme mit einem Überdruck von 50 Pascal statt 20 Pascal ausgeführt.

Geprüft wurden in drei Tests metallische und brennbare Rohrleitungen und Kabel, die mit Mineralwolle ausgestopftem Ringspalt und einem Dichtstoff auf der brandabgewandten Seite in massive Brettsperrholzelemente eingebaut wurden. Die Brandbeanspruchungsdauer betrug beim ersten Versuch 60 Minuten sowie bei den beiden weiteren Versuchen je 90 Minuten. Die Versuche waren grundsätzlich erfolgreich, auch wenn an einigen Stellen die Temperaturerhöhungen über dem geforderten Wert lagen und dadurch die Einstufung für Raumabschluss und Wärmedämmung getrennt erfolgte. Außerdem konnten die Öffnungsverschlüsse der brennbaren Rohrleitungen dem hohen Überdruck nicht standhalten und versagten bereits nach kurzer Zeit.

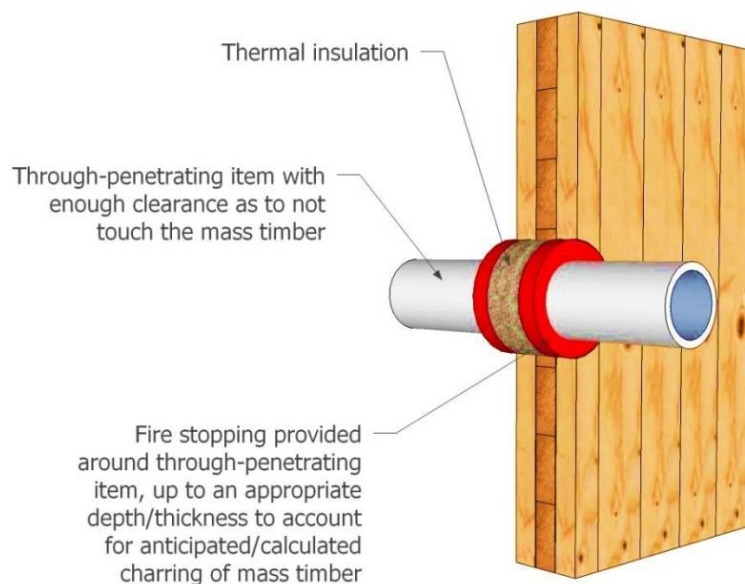


Abbildung 2-21 Vorschlag der Ausführung von Rohrabschottungen gemäß Bericht des Canadian Wood Councils [75]

Bei weiteren Versuchen wurde der Einfluss von metallischen Rohren auf die Verkohlung in den Laibungsbereichen untersucht. Dazu wurden verschiedene Rohrquerschnitte in verschiedenen Abständen geprüft. Außerdem wurden die brennbaren Rohrabschottungen aus der ersten Versuchsreihe durch Stahlhülsen ergänzt, die ein Widerlager für die Rohrabdrückeinrichtung bilden

sollen, die beim ersten Versuch versagte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abstände zwischen den Abschottungen eingehalten werden müssen, sowie die Stahlhülsen als Widerlager funktionieren.

Aus den vorliegenden Versuchen wurden Empfehlungen abgeleitet:

- Einsatz von Mineralwolle + Dichtstoff im 25 mm breiten Ringspalt bei brennbaren Rohren, zur Vermeidung eines erhöhten Wärmestroms an die Laibung
- Für Fugen kleiner 6 mm werden 25 mm tiefe Verfüllungen mit Dichtstoffen oder intumeszierenden Stoffen zur Verhinderung konvektiver Strömungen empfohlen
- Bei Fugen von 6 bis 25 mm wird das Ausstopfen mit Mineralwolle über die ganze Tiefe empfohlen + 25 mm tiefe Verfüllung auf brandabgewandter Seite. Beides ist unabhängig von der Dicke des Brettsperrholzelements (Abbildung 2-21).

### 2.6.7 Entwicklung HolzBauRL BW (2020)

Nach der Novellierung der LBO in Baden-Württemberg zum baurechtskonformen Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze waren Leitdetails zur Planung und Ausführung entsprechender Gebäude notwendig. Im Rahmen des dafür durchgeführten Forschungsvorhabens „Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise in den Gebäudeklasse 4 und 5 gemäß der LBO BW - HolzbauRLBW-“ [18] wurden von verschiedenen Forschungseinrichtungen Bauteilanschlüsse hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zum Raumabschluss und Wärmedämmung untersucht und Empfehlungen für die Ausführung ausgearbeitet. Der Fokus wurde auf Anschlüsse von verschiedenen Holzbauteilen gelegt, zudem wurden auch Anschlüsse bei Abschottungen betrachtet.

Die Autoren unterscheiden zwischen aktiven und passiven Maßnahmen und empfehlen Laibungsbekleidungen, um einen Einbrand bzw. Durchbrand um das Abschottungssystem herum auszuschließen. In Abbildung 2-22 werden die möglichen Versagenswege im Laibungsbereich dargestellt.

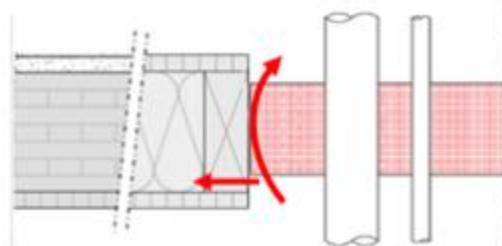


Abbildung 2-22 Mögliche Versagenswege bei Durchführungen in Holzbauteilen [18]

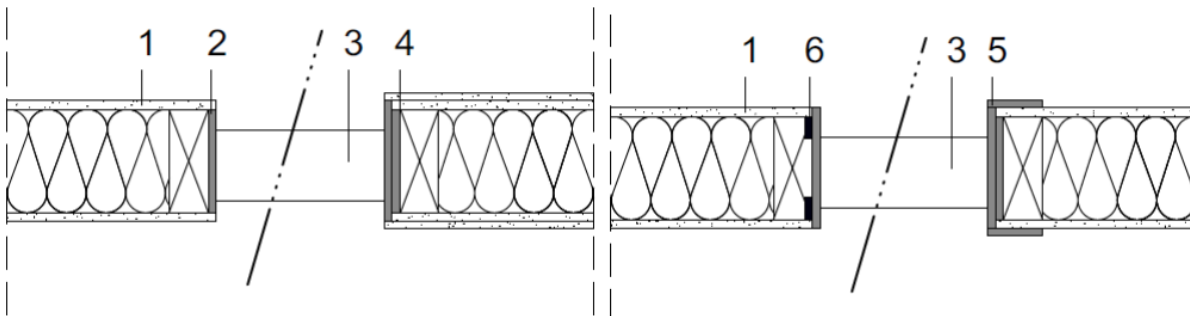
Als Einflussfaktor werden dabei die konvektiven Strömungen aufgrund von Leckagen und Überdruckbedingungen identifiziert. Diese können durch übliche Luftdichtungsmaßnahmen begrenzt bzw. ausgeschlossen werden, wenn diese über die gesamte Brandbeanspruchungsdauer wirksam sind und beispielsweise auf der brandabgewandten Seite angebracht werden.

Als allgemeine Empfehlungen werden folgende Punkte genannt:

- beidseitiger Verschluss in der jeweiligen Dicke der Bekleidungs-lagen (Holztafelbau)
- beidseitiger Verschluss mit Verschluss-tiefe in Höhe der Hälfte des zu erwartenden Abbrandes, mindestens 20 mm (Holzmassivbau)
- Konvektionsdichte Ausführung durch Anwendung von aufschäumenden dauerelastischen Dichtstoffen auf beiden Seiten

Für die Laibungsbekleidung wird empfohlen:

- Qualität wie Fläche, aber mind. 18 mm GKF/GF
- Umlaufende Rahmenkonstruktion mind. 40 mm breit
- Durchgehende Fugen mit intumeszierenden Dichtstreifen ausschließen



- a/b - raumabschließendes Holzbauteil
- 1 - Bekleidung
  - 2 - Laibungsbekleidung (Befestigung am Füllholz beidseitig im Abstand von maximal 100 mm)
  - 3 - Schottung
  - 4 - umlaufende Holzrahmenkonstruktion,  $b \geq 40$  mm
  - 5 - Kragen aus nichtbrennbaren Bekleidungs-werkstoffen,  $b = 100$  mm, optional bei brennbaren Bekleidungen
  - 6 - umlaufendener intumeszierender Dichtungsstreifen auf beiden Seiten

Abbildung 2-23 Empfehlungen für die Ausführung von Laibungsbekleidungen nach Dederich et al. [18]

Weitere Empfehlungen sind:

- Beachtung der Wärmeleitung metallischer Rohrleitungen sowie Verbindungsmitteln (z.B. durchgehende Gewindestangen)
  - o Ausführung mit durchgehender Rohrschale  $d \geq 25$  mm als Streckenisolierung aus nichtbrennbarer Mineralwolle
  - o Abdichtung beidseitig mit Dichtmasse
- Verwendung klassifizierter Rohrmanschetten oder Bandagen für brennbare Rohrleitungen mit beidseitiger Abdichtung des Ringspaltes und herstelllerspezifischem Nachweis
- Einsatz von Haltekonstruktionen für die Abtragung des Eigengewichts der Leitungen

- Mindestbefestigung von 10 mm in unverkohltem Restquerschnitt
- Ausschluss durchgehender Fugen durch Falze zum Ausschluss von Strömungspfaden für konvektive Strömungen

### **2.6.8 LeitHolz (2019)**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Leitungsdurchführungen im Holzbau (LeitHolz)“ [76] wurden 16 Kleinversuche und zwei Großversuche mit verschiedenen Abschottungssystemen durchgeführt, die in BSH- bzw. OSB-Modulboxen eingebaut wurden. Erarbeitet wurden Vorschläge für eine Holz-in-Holz-Lösung als äquivalenter Ersatz für die gewerkeübergreifende Betonverguss-Lösung (siehe Abschnitt 2.5.2). Die Versuche bestätigten frühere Versuche, dass die bestehenden Abschottungsprodukte für einen Einsatz in Tragkonstruktionen aus Holz ohne separate Laibungsbekleidung geeignet sind. Durch das Zerlegen der Module zeigte sich eine trichterförmige Verkohlung im Bereich der Laibungen, die abhängig von den jeweiligen Abschottungssystemen ausgeformt sind. Es wird empfohlen eine Norm-Tragkonstruktion für Holzkonstruktionen zu entwickeln, die die verschiedenen Abbrandverhalten von geklebten Massivholzprodukten bzw. Holzwerkstoffen aufgrund Holzart, Holzqualität, Lamellenanordnung, Klebstoff und Schichtdicken berücksichtigen.

Durch die Holzmodule entsteht zusätzlich eine Fuge in der Decke, die entsprechend mit der gleichen Feuerwiderstandsdauer ausgeführt werden muss, um die Leistungsfähigkeit aufrecht zu erhalten.

Es werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Auswahl der Abschottungssysteme entsprechend ihrer Eignung für den Einsatz in Holz
- Dimensionierung des Ringspalt zwischen Abschottungen und Brettsperrholz entsprechend der Leitungsart
- Einhaltung der Mindestabstände zwischen den einzelnen Bohrungen in den Holzmodulen
- Mindestverankerungstiefe der Befestigungsmittel im unverkohlten Restquerschnitt

# 3 Brandversuche zur Entwicklung einer Normtragkonstruktion für Abschottungen in Massivholzbauteilen

## 3.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben zeigen, dass eine technisch sichere Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Massivholzbauteilen gegeben ist. Darüber hinaus sind im internationalen Vergleich auch Richtlinien und Empfehlungen vorhanden, die eine bauordnungsrechtliche gesicherte Anwendung erlauben. Im Gegensatz dazu sind die nationalen und europäischen Anwendbarkeitsregelungen in Kombination mit den Prüfgrundlagen noch nicht für eine breite Anwendung von Abschottungssystemen in Massivholzbauteilen ohne Laibungsbekleidung ausgelegt.

Daher werden die Versagensmechanismen und Einflussfaktoren analysiert und anschließend in einer Versuchsreihe exemplarisch untersucht, um Empfehlungen zur Entwicklung einer Massivholz-Normtragkonstruktion abzuleiten.

## 3.2 Versagensmechanismen und Einflussfaktoren von Abschottungssystemen in Massivholz-Tragkonstruktionen

Auf Basis der Brandprüfungen in Abschnitt 2.6 sowie theoretischer Überlegungen lassen sich verschiedene Einflussfaktoren auf mögliche Versagensmechanismen des Raumabschlusses und der Wärmedämmung identifizieren.

### Versagensmechanismen

- Einbrand bzw. Durchbrand in Fuge zwischen Abschottung und Massivholz durch Materialeigenschaften (z.B. Wärmeleitung)
- Einbrand bzw. Durchbrand in Fuge zwischen Abschottung und Massivholz durch Konvektionsströme
- Einbrand bzw. Durchbrand in Fuge zwischen Abschottung und Massivholz durch geometrische Randbedingungen (z.B. Abkürzen des Brandweges durch Holzbauteil oder Versagen des Halteeffekts der Abschottung)
- Hinterbrennen abschottungsrelevanter Komponenten im System
- Versagen von Unterstützungsstrukturen oder Befestigungen aufgrund des Abbrands der tragenden Holzquerschnitte

## Einflussfaktoren

- Bezüglich der Leitung:
  - o Materialeigenschaften: Brennbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, Schmelztemperatur, spez. Wärmekapazität
  - o Anzahl: Bündelung oder Einzelleitungen
  - o Art der Isolierung: Material, Dicke, Streckenisolierung oder Teilisolierung
  - o Medium welches durch Leitung geführt wird: Brennbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität, Rohdichte (nicht bei Prüfungen relevant)
  - o Abstände der Leitungen zueinander
- Bezüglich der Abschottung:
  - o Wirkungsweise: (re-)aktiv (z.B. intumeszierend) oder passiv (z.B. ablativ)
  - o Position der abschottungsrelevanten Komponenten im Bezug zur Abbrandtiefe
  - o Befestigungstiefe, Wärmeleitfähigkeit der Befestigung
  - o Materialeigenschaften: Brennbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität
  - o Abstände der Abschottungen zueinander
  - o Dicke der Abschottung
  - o Position der Abschottung innerhalb des Bauteils
- Bezüglich der Tragkonstruktion:
  - o Materialeigenschaften: Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität, Brennbarkeit
  - o Abbrandverhalten: Abbrandrate (abhg. von Baustoff, Holzart, Rohdichte, Orientierung der Fasern, Dicke des Bauteils, Dicke der Brettlagen, Klebfugenintegrität im Brandfall)
  - o Flächige Bekleidung (wird nicht genauer behandelt)
  - o Position der Abschottung im Bezug zu Elementfugen
  - o Dicke der Tragkonstruktion
- Bezüglich der Fuge bzw. des Ringspalts zwischen Abschottung und Tragkonstruktion:
  - o Qualität der Bearbeitung der Öffnungsausschnitte (Eckausbildung, Toleranzen, Oberflächenbeschaffenheit)
  - o Dauerhafte Dichtigkeit der Fugen (Materialeigenschaften)
  - o Position der Abdichtung in Bezug zur Abbrandtiefe
  - o Breite des Ringspalts
  - o Fähigkeit des Abschottungssystems oder der Dichtstoffe während des Brandes entstehende Fugen durch Aufquellen wieder zu verschließen
- Sonstige Einflussfaktoren (werden durch Prüfnorm geregelt):
  - o Brandraumtemperatur, gleichmäßige Verteilung der Brandraumtemperaturen
  - o Oberflächentemperaturen auf den Prüfkonstruktionen
  - o Druckbedingungen im Brandraum
  - o Gaskonzentration im Brandraum

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren, insbesondere der Fuge zwischen Abschottung und Tragkonstruktion (Laibungsbereich) sowie der Tragkonstruktion wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt, die in den folgenden Abschnitten beschrieben und interpretiert werden. Ziel ist es

verschiedene Massivholz-Tragkonstruktionen miteinander zu vergleichen, um Unterschiede zu identifizieren und Grundlagen für eine Übertragung von Versuchsergebnissen auf vergleichbare Konstruktionen zu erarbeiten.

### 3.3 Beschreibung Versuchsaufbau

#### 3.3.1 Allgemeines

Für die Brandversuche zur Entwicklung einer Massivholz-Normtragkonstruktion für Abschottungssysteme wurden sechs Probekörper mit einer Größe von  $L \times B = 900 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  bestehend aus Tragkonstruktionen und verschiedenen Abschottungssystemen hergestellt (Abbildung 3-1, Abbildung 3-2, Abbildung 3-3). Die Massivholztragkonstruktion bestand aus BSH-Brettstapelelementen nach DIN EN 14080 [77] oder CLT-Deckenelementen nach Europäische technischer Bewertung (ETA) gemäß EAD 130005-00-0304. In die Tragkonstruktionen wurden Kombiabschottungen aus Formteilen (Brandschutzsteine), Brandschutzschaum und beschichteten Mineralwolleplatten sowie Kabelhülsen und Brandschutzmanschetten in Anlehnung an die nationalen Anwendbarkeitsnachweise eingebaut.

Je Prüfung wurden zwei Prüfkörper gemeinsam untersucht, um Vergleichswerte unter vergleichbaren Bedingungen für die verschiedenen Tragkonstruktionen zu erhalten. Die beiden Prüfkörper wurden mit einem umlaufenden Rahmen aus Konstruktionsvollholz C24 gemäß DIN EN 15497 [78] kraft- und formschlüssig verschraubt. Der Vollholzrahmen wurde zum Schutz vor erhöhter



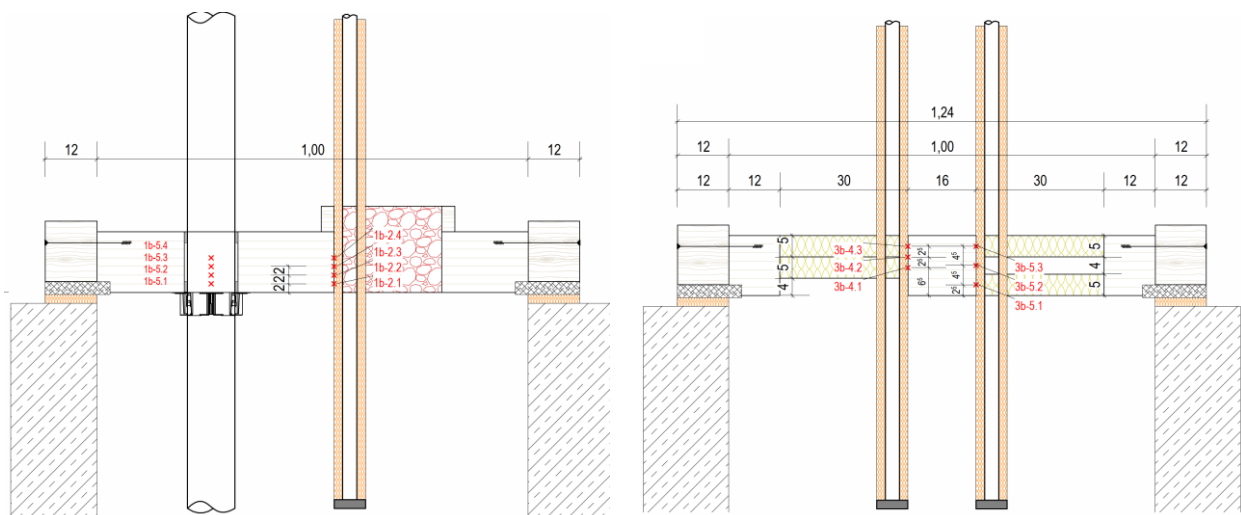
Abbildung 3-1 Prüfung 1 im Ofenraum (analog zu Prüfung 2) vor dem Versuch





Abbildung 3-2 Prüfung 3 im Ofenraum

Brandbeanspruchung unterseitig mit einer 30 mm dicken, nichtbrennbaren Calcium-Silikat-Brandschutzbauplatte *Promatect-H* gemäß ETA 06/0206 [79] bekleidet.



(a) Querschnitt durch Prüfkörper 1 / 2

(b) Querschnitt durch Prüfkörper 3

Abbildung 3-3 Schnitte durch die Prüfkörperkonfigurationen

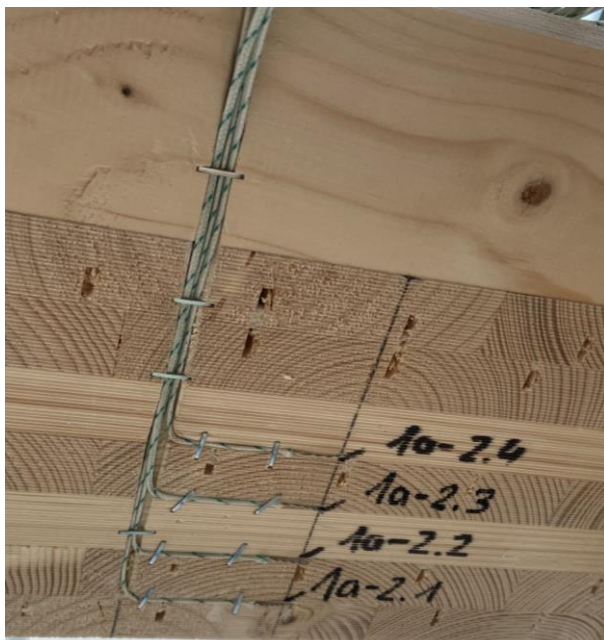
Alle Massivholzprüfkörper hatten eine Dicke von je 140 mm. Die BSH-Brettstapelelemente wurden mit hochkant angeordneten parallel zur Spannrichtung ausgerichteten Lagen mit einer Dicke von je 40 mm geprüft. Das CLT bestand aus sieben kreuzweise miteinander verklebten Brettlagen mit einer

Dicke von je 20 mm. Drei CLT-Prüfkörper hatten unter- und oberseitig zwei parallel verlaufende Decklagen. Die Lamellenverklebung aller Massivholztragkonstruktionen erfolgte mit 1K-PUR-Klebstoffen nach DIN EN 15425, deren Klebfugenintegrität im Brandfall nicht bestätigt ist und damit davon ausgegangen werden muss, dass die verkohlten Brettlagen abfallen.

Zur Dokumentation der Temperaturverläufe im Bauteil wurden in die Tragkonstruktion in vier Tiefen Thermoelemente vom Typ K eingebaut. Die Löcher für die Thermoelemente wurden seitlich, parallel zum Isothermenverlauf eingebohrt. An den Abschottungssystemen wurden gemäß DIN EN 1366-3 ebenfalls Thermoelemente vom Typ K angebracht. Als Vergleich zu den Temperaturverläufen innerhalb der Tragkonstruktion wurden an jeder Öffnung im Laibungsbereich in den gleichen Tiefen Thermoelemente vom Typ K angebracht.

Die Brandversuche wurden in einem Kleinbrandofen durchgeführt. Zur Steuerung des Prüfofens wurde ein Mantelthermoelement verwendet. Zwei weitere Mantelthermoelemente Typ K wurden ca. 100 mm unterhalb der Unterkante der Prüfkörper zur Dokumentation der Temperaturen im Brandraum angebracht. Die Brandbeanspruchung erfolgte anhand der ETK über jeweils 95 Minuten.

Die Prüfkörper wurden zur Untersuchung nach der Prüfzeit abgehoben, von unten abgelöscht und nach dem Ausbau der Penetranten die Holzkohleschicht mechanisch bis zum unversehrten Holz entfernt. Anschließend erfolgte eine Bilddokumentation sowie eine Analyse der Oberfläche mit einem 3D-Laserscanner zur Bestimmung der eindimensionalen Abbrandtiefe sowie der Abbrandtiefe im Laibungsbereich der Abschottungssysteme.



(a) Beispiel der Anordnung der Thermoelemente in der Laibung



(b) Ansicht eines Prüfkörpers vor dem Einbau der Messtechnik sowie der Abschottungen

Abbildung 3-4 Anordnung Thermoelemente und Ansicht eines rohen Prüfkörpers

### 3.3.2 Verwendeter Prüfofen

Die Bauart des Prüfofens ist an die in DIN 4102-8 beschriebene Prüf-Apparatur angelehnt. Die Deckenöffnung des Kleinprüfofens ist ca. 2,00 m x 1,00 m groß. Der Brandraum wird mit Heizöl befeuert und automatisch anhand der Brandraumtemperaturen in Kombination mit der ETK-Sollkurve gesteuert. Die Steuerung des Drucks erfolgt ebenfalls automatisch. Die Verläufe der Brandraumtemperatur sowie des Drucks wurden aufgezeichnet. Eine Aufzeichnung der Gaskonzentrationen erfolgte nicht.

### 3.3.3 Verwendete Tragkonstruktionen

Als Tragkonstruktion wurden repräsentative Massivholzelemente ausgewählt. In Tabelle 3-1 werden die für die Abbrandrate relevanten Eigenschaften der verwendeten Tragkonstruktionen dargestellt. Alle Massivholzelemente haben eine Dicke von 140 mm. Die Brettsperrholzelemente bestehen aus insgesamt sieben Brettlagen mit einer Dicke von je 20 mm, was gemäß Abbildung 2-11 dem rechnerisch kritischsten Lagenaufbau entspricht.

Tabelle 3-1 Übersicht über die geprüften Massivholztragkonstruktionen und den darin enthaltenen Abschottungssystemen

Bezeichnung	Beschreibung	Verklebung	Abbrandrate $\beta_0$ nach ETA / aBG / EC5
CLT 1	Brettsperrholz Bretter mit 3 Entlastungsnuten je Brett mit $b_{\text{Nut}} = 2,5$ mm Zwei parallele Decklagen	Fläche: DIN EN 15425, PUR Typ 1	0,7 mm/min bzw. 1,3 mm/min nach Abfallen von verkohlten Brettlagen
CLT 2	Brettsperrholz	DIN EN 15425, PUR Typ 1	0,7 mm/min
CLT 3	Brettsperrholz zwei parallele Decklagen	DIN EN 15425, PUR Typ 1 Schmalseiten- verklebung	0,65 mm/min bzw. 1,3 mm/min nach Abfallen von verkohlten Brettlagen
BSH	Brettschichtholz nach DIN EN 14080 $t_{\text{Lamellen}} = 40$ mm	DIN EN 15425, PUR Typ 1	0,65 mm/min

$b_{\text{Nut}}$  = Breite der Entlastungsnut

$t_{\text{Lamelle}}$  = Dicke der Brettlamellen

Die Decklagen verlaufen in Plattenlängsrichtung und damit in Spannrichtung. Bei der Tragkonstruktion „CLT 3“ sind zusätzlich zu den Decklagen die jeweils zweiten Lagen ebenfalls parallel zur Spannrichtung und darüber hinaus die Schmalseiten der Bretter verklebt. Die Tragkonstruktion CLT 1 besteht aus Brettern mit jeweils drei Entlastungsnuten in Brettlängsrichtung

mit einer Breite von ca. 2,5 mm und einer Tiefe von ca. 9 mm. Das Brettstichholzelement wird als Brettstapel-Deckenelement geprüft und besteht aus keilgezinkten Vollholzlamellen mit einer Dicke von jeweils 40 mm.

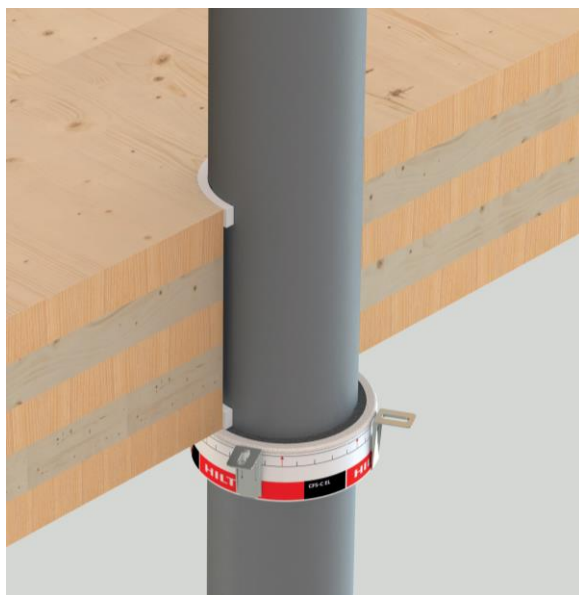
### 3.3.4 Verwendete Abschottungssysteme

Als Abschottungssysteme wurden Kombiabschottungen und Einzeldurchführungen untersucht, die in der Praxis häufig angewendet werden und bereits in Massivholzkonstruktionen geprüft wurden. Des Weiteren wurde eine Kombiabschottung aus beschichteten Mineralwolleplatten geprüft, welche gemäß Untersuchungen von [76] kritisch für den Einsatz in Verbindung mit unbedeckten Holzuntergründen gesehen wird. Ziel ist es dabei die Grenzen der Anwendbarkeit zu untersuchen, um das notwendige Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

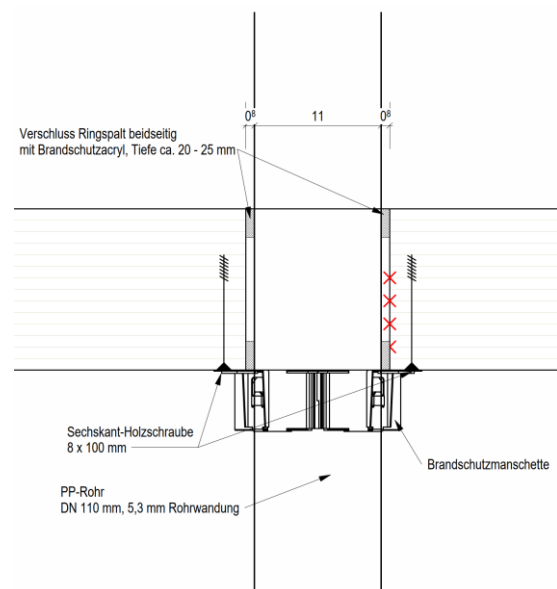
Im Folgenden werden die verwendeten Abschottungssysteme kurz vorgestellt. Tabelle 3-2 zeigt darüber hinaus, die geprüften Kombinationen aus Tragkonstruktion und Abschottungssystem.

#### Brandschutzmanschette mit brennbarem Rohr

Geprüft wurde eine intumeszierend reagierende Brandschutzmanschette gemäß ETA 14/0085 bzw. aBG Z-19.53-2192 mit einem brennbaren Abwasserrohr aus Polypropylen (siehe Abbildung 3-5).



(a) Prinzipdarstellung Rohrmanschette mit brennbarem Abflussrohr [80]



(b) Darstellung Prüfsituation Rohrmanschette mit brennbarem Rohr (eigene Darstellung)

Abbildung 3-5 Ausführung der Brandschutzmanschette mit brennbarem Abflussrohr

Das Rundrohr hatte einen Außendurchmesser von 110 mm mit einer Rohrwanddicke von 5,3 mm. Die Aussparung im Holz hatte einen Durchmesser von 125 mm. Der 7,5 mm breite Ringspalt wurde, gemäß Herstellerangaben, jeweils von beiden Seiten mit einer Brandschutzdichtmasse

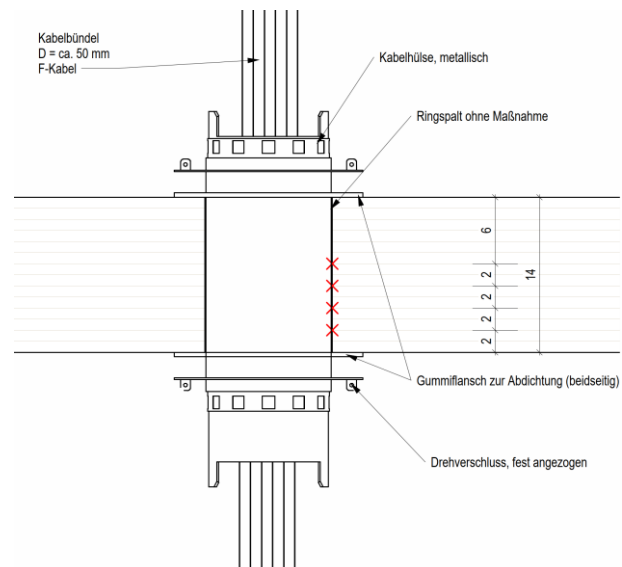
ca. 20-25 mm tief verfüllt. Die Brandschutzmanschette wurde mit drei Stück Sechskant-Holzschrauben  $\varnothing$  8 mm x 100 mm im Holz befestigt. Das Rohr war auf beiden Seiten geöffnet (U/U gemäß DIN EN 13501-2). Im Laibungsbereich wurden jeweils in einer Tiefe von 20 mm, 40 mm, 60 mm und 80 mm ein Thermoelement angebracht (siehe Abbildung 3-5 (b)). Weitere Oberflächenthermoelemente wurden gemäß DIN EN 1366-3 auf der brandabgewandten Seite zur Prüfung der Temperaturerhöhungen angebracht.

### Kabelhülse mit Kabelbündel

Geprüft wurde eine Kabelhülse gemäß ETA 17/0081 bzw. aBG Z-19.53-2318 mit einem Kabelbündel  $\varnothing$  50 mm (F-Kabel nach DIN EN 1366-3) bestehend aus insgesamt 8 Kabeln.



(a) Prinzipdarstellung Kabelhülse mit Kabelbündel  
[80]



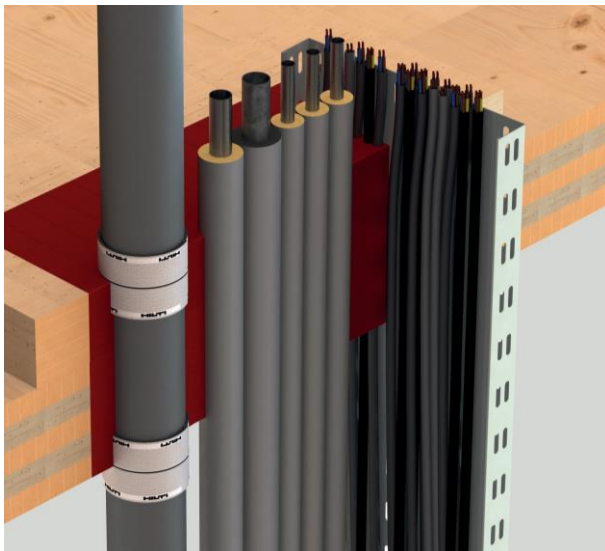
(b) Darstellung Prüfsituation Kabelhülse mit Kabelbündel  
(eigene Darstellung)

Abbildung 3-6 Ausführung der Brandschutzkabelhülse mit Kabelbündel

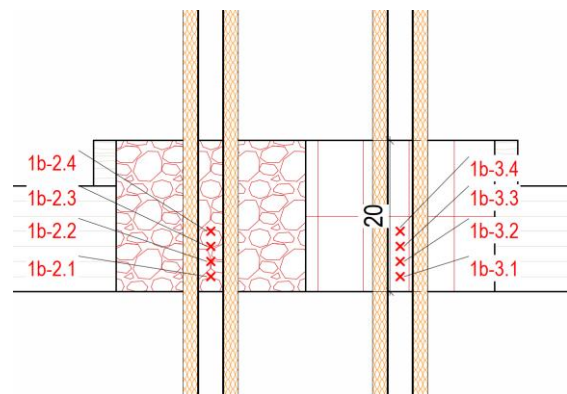
Die Abschottung bestand aus einer Stahlblechhülse mit einer Einlage aus einem intumeszierenden Baustoff. Die Hülse kann durch eine Drehung verschlossen bzw. geöffnet werden, wodurch eine Nachbelegung von Kabeln möglich ist. Der Ringspalt zwischen Hülse ( $\varnothing$  110 mm) und der Aussparung im Holz ( $\varnothing$  115 mm) hat eine Breite von 2,5 mm und wurde nicht zusätzlich verfüllt.

## Kombiabschottung mit Brandschutzsteinen und Brandschutzschaum

Geprüft wurde eine Kombiabschottung mit Formteilen aus Brandschutzsteinen gemäß ETA 18/1024 bzw. aBG Z-19.53-2423 in Verbindung mit einer Kombiabschottung aus Brandschutzschaum gemäß ETA innerhalb einer Öffnung mit einer Größe von  $B \times L \times H = 250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ . Die beiden Abschottungssysteme sind gemäß der aBG innerhalb einer Öffnung zulässig. Belegt wurden die beiden Kombiabschottungen jeweils mit einem nichtbrennbaren Stahlrohr  $\varnothing 33 \text{ mm}$  mit einer Rohrwanddicke von 2,5 mm und einer 20 mm Mineralwollestreckenisolierung (engl.: continued sustained, CS entsprechend DIN EN 1366-3). Die Stahlrohre waren auf der Brandraumseite verschlossen und auf der brandabgewandten Seite geöffnet (C/U entsprechend DIN EN 13501-2). Der Ringspalt wurde mit einer intumeszierenden Fugenverfüllung ca. 20 mm tief ausgefüllt. Die Aufleistungen aus Vollholzlatten  $B \times H = 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , die zum Erreichen einer Mindestdicke der Abschottung von 200 mm notwendig sind, wurden umlaufend auf die Tragkonstruktion verschraubt.



(a) Prinzipdarstellung Kombiabschottung mit Belegung [80]



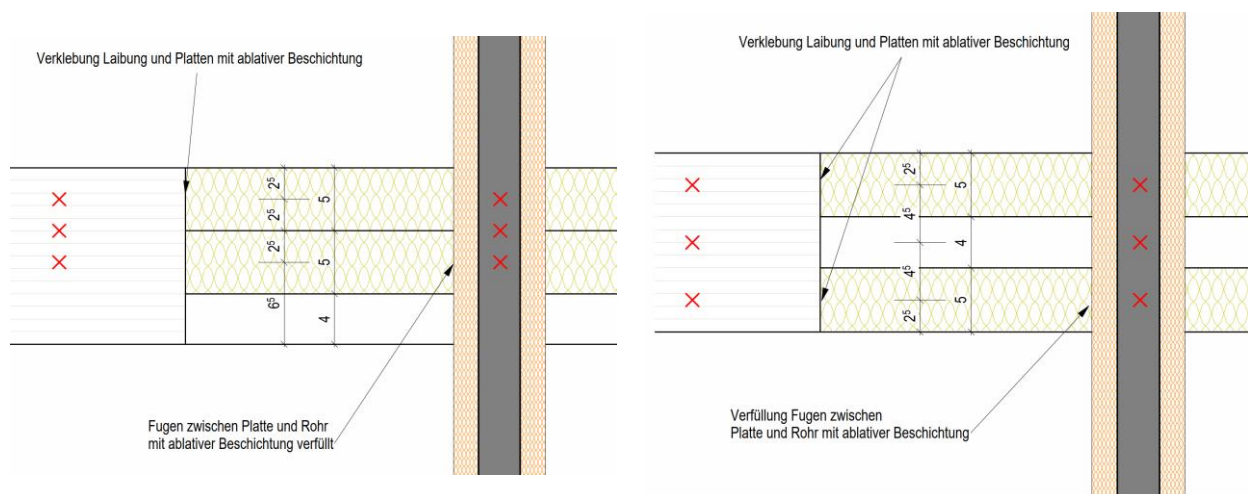
(b) Darstellung Prüfsituation Kombiabschottung (eigene Darstellung)

Abbildung 3-7 Ausführung der Kombiabschottung mit Brandschutzsteinen und Brandschutzschaum mit Stahlrohr

## Kombiabschottung mit ablativ beschichteten Mineralwolleplatten

Geprüft wurde ein Kombiabschottung bestehend aus Mineralwolleplatten mit einer Ablationsbeschichtung in einer Bauteilöffnung  $B \times L \times H = 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  in Verbindung mit einem nichtbrennbaren Stahlrohr  $\varnothing 33 \text{ mm}$  mit einer Rohrwanddicke von 2,5 mm und einer 20 mm Mineralwollestreckenisolierung. Die Stahlrohre waren auf der Brandraumseite verschlossen und auf der brandabgewandten Seite geöffnet (C/U entsprechend DIN EN 13501-2). Verwendet wurden je Abschottung zwei vorbeschichtete Mineralwolleplatten mit einer Dicke von je 50 mm. Die verbleibenden Hohlräume und Fugen wurden mit Mineralwolle verstopft und/oder mit der Ablationsbeschichtung verfüllt und beschichtet. Geprüft wurden zwei Ausführungsvarianten („Einbausituationen“) die in Abbildung 3-8 dargestellt sind. Die Laibung wurde ohne nichtbrennbare Bekleidung und ohne eine Beschichtung ausgeführt, um zu prüfen, ob es durch das Abfallen von Lagen des Brettsperrholzelements zu einem erhöhten Einbrand oder Durchbrand in den Laibungsbereichen kommt. Insbesondere durch das passive Verhalten unter Brandeinwirkung und die Forschungsergebnisse von [76] bestanden hier im Vorfeld Bedenken bezüglich der Leistungsfähigkeit des Systems.

Bei Einbausituation 1 (Abbildung 3-8 a) sind beide Mineralwolleplatten ohne Zwischenraum deckenoberseitig bündig angeordnet. Bei Einbausituation 2 (Abbildung 3-8 b) sind die Mineralwolleplatten jeweils bündig zu den Bauteiloberflächen (zweischalig) angeordnet.



(a) Darstellung Prüfsituation Kombiabschottung  
 Mineralwolle – Einbausituation 1

(b) Darstellung Prüfsituation Kombiabschottung  
 Mineralwolle – Einbausituation 2

Abbildung 3-8 Ausführung der Kombiabschottung mit ablativ beschichteten Mineralwolleplatten

Die Prüfung der genannten Abschottungssysteme erfolgte in den in Tabelle 3-1 aufgeführten Massivholz-Tragkonstruktionen. Um die Anzahl der Prüfungen auf ein Minimum zu beschränken, wurden nicht alle Systeme in jeder Tragkonstruktion geprüft. Daher wurden die beschichteten

Mineralwolleabschottungen nur in CLT 1 sowie dem BSH-Element geprüft, da davon ausgegangen wurde, dass durch Prüfung 1 und 2 genügend Erkenntnisse zur Vergleichbarkeit der Massivholzelemente gegeben sind. Die Übersicht der geprüften Kombinationen ist in Tabelle 3-2 zu finden.

Tabelle 3-2 Übersicht der Kombinationen aus Tragkonstruktion und verwendeten Abschottungssysteme

Abschottungssystem	Tragkonstruktion			
	CLT 1	CLT 2	CLT 3	BSH
<b>Kombiabschottung mit Brandschutzsteine</b>	Prüfung 1	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 2
<b>Kombiabschottung mit Brandschutzschaum</b>	Prüfung 1	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 2
<b>Kabelhülse mit Kabelbündel</b>	Prüfung 1	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 2
<b>Rohrmanschette mit brennbarem Rohr</b>	Prüfung 1	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 2
<b>Beschichtete Mineralwolleabschottung EBS 1</b>	Prüfung 3	-	-	Prüfung 3
<b>Beschichtete Mineralwolleabschottung EBS 2</b>	Prüfung 3	-	-	Prüfung 3

Alle Leitungen wurden auf der brandabgewandten Seite von Leitungsabstützvorrichtungen aus Metallschienen sowie entsprechenden Rohr- oder Kabelschellen, die an Gewindestangen befestigt wurden, gehalten. Ofenseitig wurden keine Unterstützungen der Leitungen montiert. Die Länge der Leitungen betrug beidseitig der Tragkonstruktionen 500 mm.



## 4 Ergebnisse und Interpretation

### 4.1 Auswertung der Versuche

#### 4.1.1 Allgemeines

Alle Versuche konnten über die geplante Dauer von 95 Minuten durchgeführt werden, da keine normativen Abbruchkriterien eintraten. Hintergrund der gewählten Versuchsdauer waren einerseits ein möglicher Ausgleich von Temperatur- oder Druckschwankungen durch eine längere Prüfzeit und andererseits eine nahe an 90 Minuten liegende Brandbeanspruchung hinsichtlich der Bestimmung der Abbrandtiefen. Die Temperaturverläufe wurden digital im Abstand von 10 Sekunden erfasst und dokumentiert, die visuellen Beobachtungen während des Versuchs fanden in einem Abstand von ca. 10 Minuten statt. Eine Beobachtung der Ereignisse innerhalb der Prüfofen durch Sichtfenster war nur bei Versuch 3 möglich, da bei den beiden ersten Versuchen die Sichtfenster schon nach kurzer Zeit verrußten. Dadurch konnte bei Versuch 3 das Abfallen der Brettlagen bei CLT 1 beobachtet und dokumentiert werden. Darüber hinaus wurde eine Thermografiekamera „FLIR“ zur qualitativen Dokumentation der Wärmeentwicklung auf der abgewandten Seite der Abschottungssysteme verwendet.

Nach dem Ausbau wurden die Prüfkonstruktionen sofort abgelöscht und die Holzkohle bis zu dem Restquerschnitt (RQ) entfernt. Exemplarisch wird in Tabelle 4-1 der Ablauf nach „Ofen aus“ für Prüfung 1 dargestellt.

Tabelle 4-1 Ablauf nach Beendigung des Versuchs bei Versuch 1

Zeit [min]	Ablaufbeschreibung
95:00	„Ofen aus“
+ 0:00	Trennen der Kabel und Vorbereitungen zum Abheben
+ 9:00	Abheben der Prüfkonstruktion vom Ofen, Beginn Ablöschen mit Wasser
+ 15:00	Absetzen der Prüfkonstruktion und Entfernen der Leitungen und Abschottungssysteme, Abkühlen der Laibungsbereiche von oben mit Wasser
+ 28:00	Beginn der Entfernung der groben Holzkohle mit Nageleisen
+ 40:00	Lose Holzkohle mit Nageleisen vollständig entfernt
---	Entfernen der feinen, abgekühlten Holzkohle bis zum Restquerschnitt mit auf Akkuschauber montierter Drahtbürste

## Versuchsbeobachtungen

Die Leistungskriterien Raumabschluss E und Wärmedämmung I gemäß DIN EN 13501-2 [10] wurden bei allen drei Prüfungen eingehalten. An keiner der Messstellen gemäß DIN EN 1366-3 wurde eine unzulässige Temperaturerhöhung  $\Delta T \geq 180$  K festgestellt. Nach dem Abkühlen der Prüfkörper wurden diese abtransportiert und die Restquerschnittsmessungen ein paar Tage später durchgeführt. Es ist davon auszugehen, dass zwischen „Ofen aus“ bis zur Entfernung der Holzkohle weiter Holz abgebrannt ist und die RQ-Messung damit auf der sicheren Seite liegt. Eine quantitative Bewertung der Brandbeanspruchung nach „Ofen aus“ wurde nicht vorgenommen.

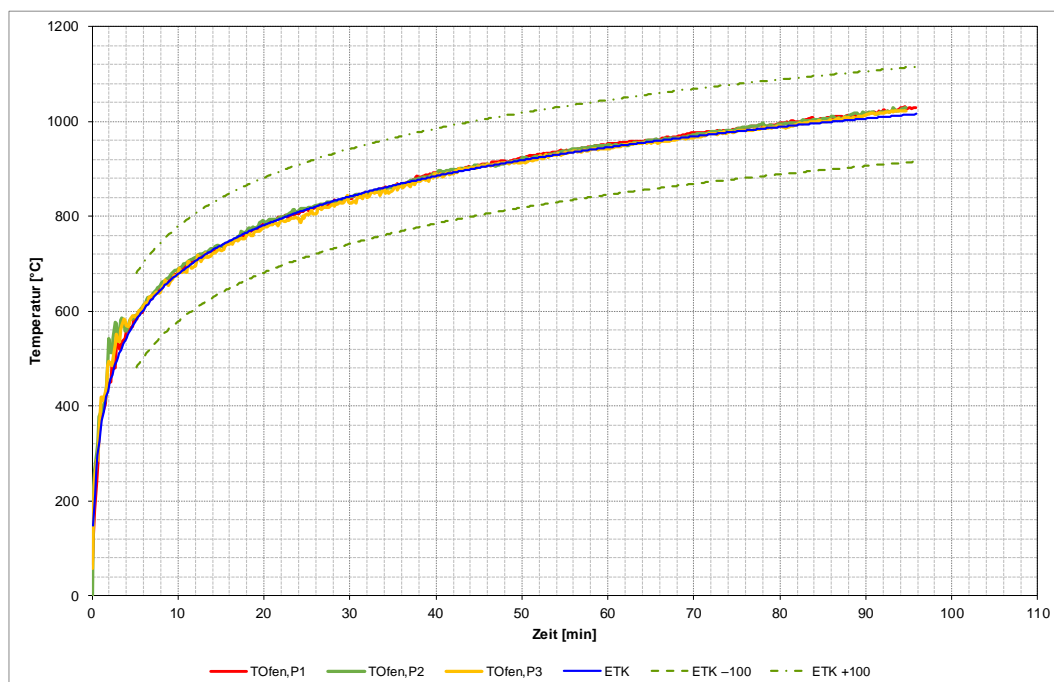


Abbildung 4-1 Verlauf der Brandraumtemperaturen nach ETK bei Prüfung 1, 2, 3

Die Brandraumtemperaturen (Abbildung 4-1) und der Ofendruck (Abbildung 4-2) wurden aufgrund der automatischen Ofensteuerung sehr gleichmäßig eingehalten. Zur Kontrolle der Temperaturverteilung in Brandraum wurden zusätzliche Mantelthermoelemente Typ K mittig der beiden Prüfkörper angebracht. Diese zeigten ebenfalls sehr geringe Abweichungen verglichen zum Mantelthermoelement, welches zur Ofensteuerung verwendet wurde. Details zu den Prüfungen sind dem Anhang bzw. den einzelnen Prüfberichten zu entnehmen [81–83]. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

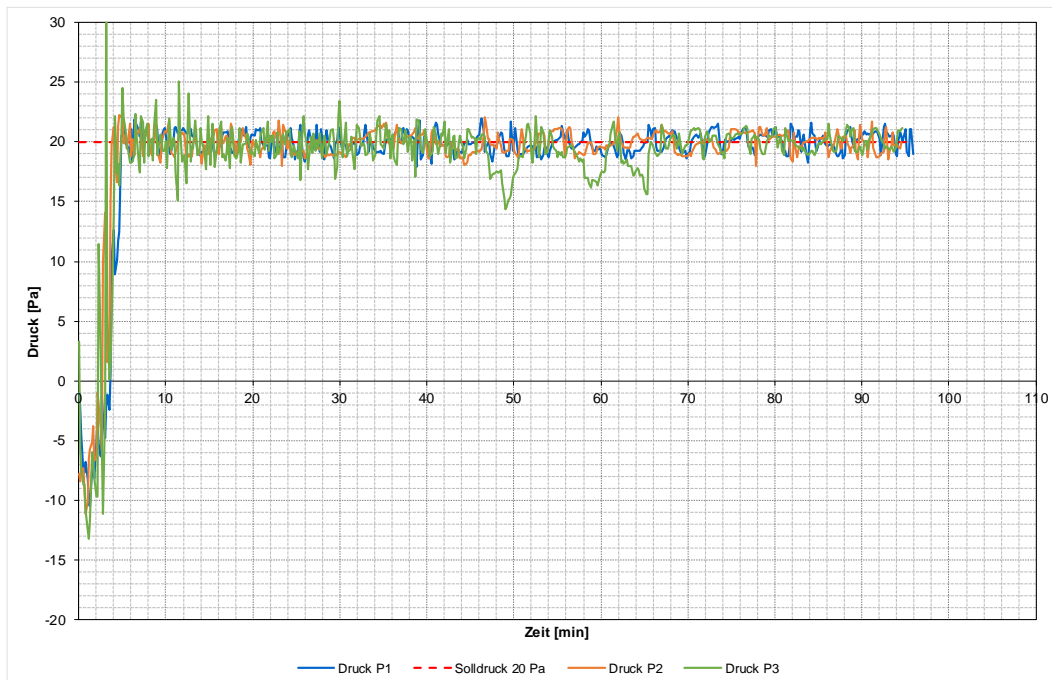


Abbildung 4-2 Verlauf des Drucks im Prüfraum bei Prüfung 1, 2, 3

Zur Auswertung der Prüfungen wurden die Temperaturmessungen der Thermoelemente an den Oberflächen sowie in den Laibungen genutzt und nach Entfernen der Holzkohleschicht eine Messung des Restquerschnitts mittels terrestrischem 3D-Laserscanning und anschließender Software-Auswertung vorgenommen.

#### 4.1.2 Auswertung der Prüfergebnisse durch Temperaturmessungen

Um den Verlauf des Abbrands in den Laibungsbereichen der Abschottungen auswerten zu können, wurde je Abschottung eine Messkombination von drei bzw. vier Messpunkten über die Tiefe verteilt in den Laibungen sowie eine Vergleichsmesskombination im ungestörten Holzquerschnitt angebracht. Die Montage erfolgte bei diesen Thermoelementen jeweils ca. 50 mm parallel zu den Isothermen, um Messungenauigkeiten zu vermeiden, die durch senkrecht eingebrachte Thermoelemente entstehen können. Ein Einlegen während der Produktion der Brettsperrholzelemente, wie von Klippel et al [84] vorgeschlagen, war nicht möglich, wird jedoch aufgrund des Versuchsziels auch nicht als notwendig erachtet. Für die Auswertung des Abbrandverlaufs über die Zeit wurde die Abbrandgrenze an der 300°C-Isotherme angenommen [50]. Der Abbrandverlauf im ungestörten Querschnitt kann aufgrund einer einzelnen Messkombination mit hohen Abständen nicht zur Bestimmung einer statistischen Abbrandrate herangezogen werden. Ein Vergleich der Konstruktionen und Messkombinationen innerhalb der Prüfreihen ist aufgrund der gleichmäßigen Prüfbedingungen mit einer hinreichenden Genauigkeit möglich.

Die Temperaturmesswerte wurden als .csv-Datei in Microsoft Excel ausgewertet. Die entsprechenden Diagramme sind im Anhang bzw. in den Prüfberichten zu finden. Um die Abbrandtiefen der Restquerschnittsermittlung mit den Daten der Thermoelemente vergleichen zu

können, wurden zuerst die Abbrandraten je Brettlage aus den Temperaturkurven der Thermoelemente ermittelt. Anschließend wurden diese Abbrandraten innerhalb einer Messkombination gemittelt und auf eine Prüfzeit von 95 Minuten extrapoliert.

#### **4.1.3 Auswertung der Prüfergebnisse durch Messung des Restquerschnitts**

Zur Auswertung der Prüfergebnisse hinsichtlich des Restquerschnitts, wurden die Prüfkörper photogrammetrisch vermessen. Dazu wurden die Prüfkörper in einer Reihe senkrecht aufgestellt und insgesamt 13 Scans mit einem Laserscanner Faro Focus S Plus 350 erstellt. Die Einzelscans wurden anschließend mit FARO Scene zu einer Punktwolke registriert. Der mittlere Punktfehler lag dabei bei 0,9 mm und der max. Punktfehler bei 1,3 mm. Dadurch kann von einer ausreichend hohen Genauigkeit ausgegangen werden.

Die Auswertung erfolgte dann je Prüfkörper mit der Software „Cloud-Compare“. Pro Prüfkörper wurden dabei in etwa 9,5 Millionen Punkte erfasst, wobei ca. 6 Millionen Punkte auf die verbrannte Oberfläche entfallen. Dies entspricht einer Punktdichte von ca. 6 Punkten/mm<sup>2</sup>. Zur Bestimmung der flächigen Abbrandtiefe wurden die Auflager und Randbereiche entfernt und eine Fläche von B x H = 880 mm x 900 mm (statt B x H = 900 x 1000 mm) mit insgesamt 1 Million Punkte im Bezug zur ursprünglichen Oberflächenebene gesetzt. Die Laibungsbereiche wurden dazu entfernt. Für eine visuelle Auswertung wurde ein farbiges Höhendigramm auf die abgebrannte Fläche gelegt (siehe Abbildung 4-7). Rote Bereiche kennzeichnen einen hohen Abbrand, blaue Bereiche einen geringen Abbrand.

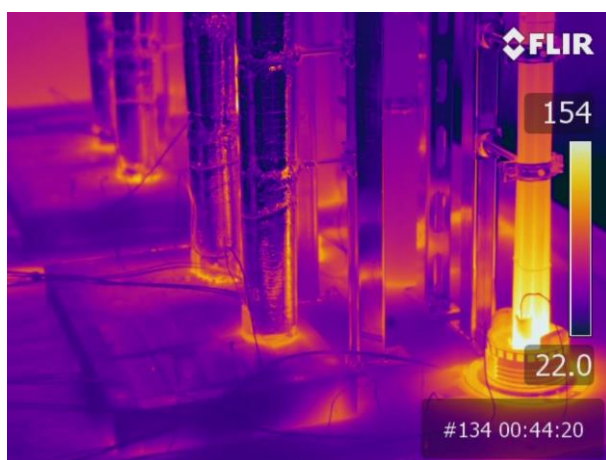
Die Messung der Abbrandtiefen in den Laibungsbereichen erfolgte über eine manuelle Bestimmung der Restquerschnitte mit einem Zollstock, da die visuelle Beurteilung an welcher Stelle der Übergang von gerader Laibung zum Abbrandtrichter stattfindet schnellere und hinreichend genaue Ergebnisse liefert als die Bestimmung in Cloud-Compare.

Die ermittelten Abbrandtiefen aus Temperaturmessung und Restquerschnittsbestimmung werden in Abschnitt 4.3.2 miteinander verglichen. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.2 ein Vergleich der flächigen Abbrandraten mit der Literatur und die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Laibungsbereiche der Abschottungssysteme.

## 4.2 Abschottungssysteme

### 4.2.1 Allgemeines

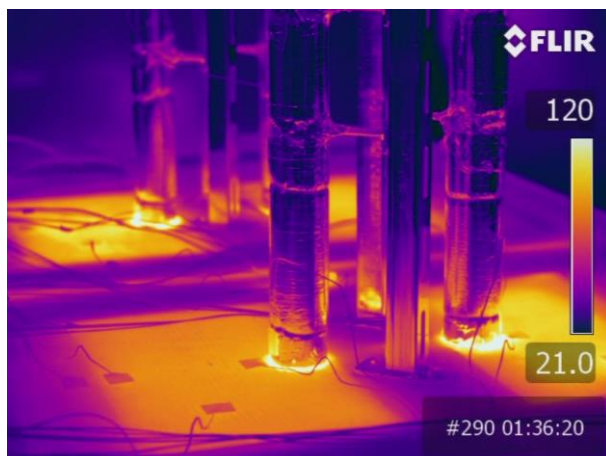
Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erläutert, haben alle Abschottungen die Leistungskriterien für Wärmedämmung und Raumabschluss eingehalten. In den folgenden Abschnitten werden die Beobachtungen und Ergebnisse der einzelnen Abschottungssysteme zusammengefasst und interpretiert. Ein Überblick der qualitativen Temperaturverteilung zum Zeitpunkt des Prüfungsendes ist in den Thermografieaufnahmen in Abbildung 4-3 dargestellt.



(a) Prüfung 1



(b) Prüfung 2



(c) Prüfung 3

Abbildung 4-3 Thermografieaufnahmen während Prüfminute 95 zur qualitativen Beurteilung der Wärmeverteilung

#### 4.2.2 Kombiabschottung Brandschutzsteine und Brandschutzschaum

Bei den Kombiabschottungen aus Brandschutzsteinen und Brandschutzschaum war kein Versagen der Kriterien Raumabschluss und Wärmedämmung festzustellen. Beide Abschottungssysteme zeigten in allen Tragkonstruktionen vergleichbare und konstante Temperaturerhöhungen (siehe Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3) in einem insgesamt sehr niedrigen Bereich. Die höchsten Temperaturerhöhungen waren auf der Streckenisolierung der Rohrleitungen festzustellen, sind jedoch als unkritisch zu betrachten. Diese waren mit Nullabstand zur Laibung montiert, um zu prüfen, ob durch den erhöhten Wärmestrom von metallischen Rohrleitungen ein Einfluss auf den Einbrand im Laibungsbereich haben. Bezogen auf den Raumabschluss und die Wärmedämmung konnte nachgewiesen werden, dass die Rohrleitungen keinen Einfluss haben.

Tabelle 4-2 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottung mit Brandschutzschaum

Abschottungs-system	Kombiabschottung mit intumeszierendem Brandschutzschaum				
Leitungsbelegung	Stahlrohr mit Streckenisolierung aus Mineralwolle				
Dargestellte Werte	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]				
Art der Tragkonstruktion	Auf Trag-konstruktion	Auf Aufleistung	Auf Rohrleitung (Isolierung)	Auf Öffnungs-verschluss	Auf Fläche
CLT 1	16,9	17,8	70,2	37,5	17,3
CLT 2	21,5	17,8	63,4	36,0	18,5
CLT 3	17,8	19,9	55,8	24,1	10,0
BSH	17,8	---	52,5	24,6	11,1
<b>Mittelwert</b>	<b>18,5</b>	<b>18,5</b>	<b>60,5</b>	<b>30,6</b>	<b>14,2</b>

Tabelle 4-3 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottung mit Brandschutzsteinen

Abschottungs-system	Kombiabschottung mit intumeszierenden Brandschutzsteinen				
Leitungsbelegung	Stahlrohr mit Streckenisolierung aus Mineralwolle				
Dargestellte Werte	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]				
Art der Tragkonstruktion	Auf Trag-konstruktion	Auf Aufleistung	Auf Rohrleitung (Isolierung)	Auf Öffnungs-verschluss	Auf Fläche
CLT 1	28,6	25,6	46,8	32,5	13,7
CLT 2	20,2	23,7	48,2	21,1	7,3
CLT 3	23,8	23,5	51,4	25,2	12,8
BSH	25,1	25,6	53,3	29,9	8,6
<b>Mittelwert</b>	<b>24,4</b>	<b>24,6</b>	<b>49,9</b>	<b>27,2</b>	<b>10,6</b>

Über die gesamte Versuchszeit waren keine besonderen Vorkommnisse an den beiden Abschottungssystemen wahrnehmbar. Beim Abheben der Prüfkonstruktionen zeigte sich, dass beide Abschottungen stark expandiert waren. Die Expansion hat in etwa bis zur Tiefe des

umliegenden Restquerschnitts der Holzelemente stattgefunden. Darüber waren die Brandschutzsteine bzw. -schaum noch nicht expandiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass Kombiabschottungen aus intumeszierenden Baustoffen die Leistungskriterien auch in unbedeckten Massivholzelementen erfüllen können. Ein Einfluss der Art der Massivholz-Tragkonstruktion konnte nicht nachgewiesen werden.

### 4.2.3 Rohrmanschette

Das Abschottungssystem mit einer Brandschutzrohrmanschette kann ebenfalls bei den durchgeführten Prüfungen positiv bewertet werden, da kein Versagen beim Raumabschluss und bei der Wärmedämmung eingetreten ist. Bis zum Rohrverschluss durch die Expansion der intumeszierenden Einlage war bei beiden Prüfungen eine kurzzeitige Temperaturerhöhung und starker Rauch aus dem Rohr erkennbar, was aber für Prüfungen mit offenen Systemen unvermeidbar ist. Danach war keine Rauchentwicklung mehr über die komplette Prüfzeit wahrnehmbar. Die Temperaturerhöhungen auf dem Rohr lagen bei Prüfminute 9 bei ca. 100 K und nahmen nach dem Öffnungsverschluss wieder ab. Bei allen Prüfungen waren konstante Oberflächentemperaturen feststellbar, die am Ende der Prüfung auf dem Rohr und auf der Tragkonstruktion nahezu identisch im Bereich von ca. 55 °C ( $\Delta T = 35$  K) lagen (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Rohrmanschette

Abschottungssystem	Rohrmanschette	
Leitungsbelegung	Brennbares PP-Rohr	
Dargestellte Werte	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]	
Art der Tragkonstruktion	Auf Rohrleitung	Auf Tragkonstruktion
CLT 1	103,1	36,0
CLT 2	93,7	34,4
CLT 3	102,6	36,6
BSH	105,8	33,3
Mittelwert	<b>101,3</b>	<b>35,1</b>

An der Oberseite der Tragkonstruktion war bei einem Prüfkörper eine leichte gelb-braune Verfärbung in der Nähe der Laibung zu sehen. Diese ist auf Wasserdampf und leichten Rauch zurückzuführen, welcher aus einem kleinen, bestehenden Riss im Holz ausgetreten ist. Ein Einfluss auf die Leistungskriterien konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Manschette hat über die gesamte Brandbeanspruchungsdauer den Rohrquerschnitt zuverlässig verschlossen und vor einem Einbrand aus dem umliegenden Holz geschützt (siehe Abbildung 4-4). Beim Ausbau der Abschottung waren die Schrauben nicht mehr in einem tragfähigen Untergrund, da der Befestigungsgrund aufgrund des Wärmestroms durch die Schraube komplett verkohlt war. Die Lagesicherung des Abschottungssystems war jedoch weiterhin bei allen Prüfungen gegeben.

Ein Einfluss der Dicke der Schrauben konnte in diesen Prüfreihen nicht explizit nachgewiesen werden, wurde jedoch in anderen Forschungsvorhaben untersucht. Daraus kann abgeleitet werden, dass Schrauben mit möglichst kleinen Durchmessern, wie beispielsweise Teilgewindeschrauben, im Brandfall länger tragfähig sind als dicke Holzbauschrauben, da das Verhältnis von Schraubenquerschnittsfläche zu Schraubenumfang günstiger ist [85]. Das Rohr war in etwa bis zum Restquerschnitt des Holzes im Laibungsbereich abgeschmolzen und darüber noch vollständig intakt.

Auch bei diesem Abschottungssystem konnte eine Anwendbarkeit in Tragkonstruktionen aus Massivholz ohne Laibungsbekleidung nachgewiesen werden. Ein Einfluss der verschiedenen Massivholz-Tragkonstruktionen konnte ebenfalls nicht nachgewiesen werden.



Abbildung 4-4 Verkohelter Rohrverschluss von Rohrmanschette nach Ablöschen der Tragkonstruktion

#### 4.2.4 Brandschutzkabelhülse

Die Brandschutzkabelhülse zeigte ebenfalls kein Versagen der Leistungskriterien Raumabschluss und Wärmedämmung. Die Temperaturerhöhungen an den Oberflächen lagen jedoch in einem höheren Bereich als bei den anderen Abschottungssystemen (siehe Tabelle 4-5). Insbesondere bei Prüfung 2 lagen die Temperaturen auf der Oberfläche der Leitungen sowie auf der Hülse selbst knapp unter der zulässigen Grenze. Dies ist jedoch auf einen Einbaufehler zurückzuführen, der durch die Fotodokumentation identifiziert werden konnte. Bei der Prüfung 2 wurde vergessen die Hülse durch das Drehen der inneren Komponente zu verschließen. Dies war auch der Grund für eine sehr starke Rauchentwicklung der Kabelhülsen bei Versuch 2.

Die Rauchentwicklung war bei der Kabelhülse stärker als bei den anderen Abschottungssystemen und fast über die komplette Prüfdauer wahrnehmbar. An einer Kabelhülse bildeten sich bei Prüfung 1 kurzzeitig für ca. 2 Sekunden kleine Flammen, die jedoch in der Folge nicht mehr festgestellt werden konnten. Bei Prüfung 2 war der Kunststoff an der Oberseite der Hülse nach ca. 12 Minuten angeschmolzen und eine leichte dunkle Färbung durch den Rauch erkennbar, was auf die erhöhten



Temperaturen, durch die nicht sauber verschlossene Hülse, zurückzuführen ist. Weiter waren braune Verfärbungen auf der Tragkonstruktion rund um die Kabelhülse zu sehen. Diese entstehen durch heißen Wasserdampf, der durch den Ringspalt zwischen Gummiflansch und Tragkonstruktion austritt.

Tabelle 4-5 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Brandschutzkabelhülse

<b>Abschottungs- system</b>	<b>Brandschutzkabelhülse</b>		
<b>Leitungsbelegung</b>	Kabelbündel 50 mm		
<b>Dargestellte Werte</b>	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]		
<b>Art der Tragkonstruktion</b>	<b>Auf Leitung (Kabel)</b>	<b>Auf Oberfläche Hülse</b>	<b>Auf Trag- konstruktion</b>
<b>CLT 1</b>	128,3	103,4	43,8
<b>CLT 2</b>	119,2	96,2	33,8
<b>CLT 3</b>	166,3	130,8	48,7
<b>BSH</b>	167,1	110,7	42,7
<b>Mittelwert</b>	<b>145,2</b>	<b>110,3</b>	<b>42,3</b>

Die Oberflächentemperaturen decken sich mit den Aufnahmen der Thermografiekamera (siehe Abbildung 4-3 (a) + (b)) und zeigen erhöhte Temperaturen auf der Hülse und dem Kabelbündel. Die Ursache ist die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und der metallischen Hülse.

Die Leistungsfähigkeit des Abschottungssystems in Massivholz-Tragkonstruktionen bestätigte sich. Positiv zu bewerten ist, dass die Kriterien trotz des falschen Einbaus der Hülse eingehalten wurden. Die maximalen Temperaturerhöhungen können jedoch nicht als Richtwert verwendet werden.

#### 4.2.5 Kombischott Mineralwolle

Im Vorfeld der Prüfungen stellte sich die Frage, wie sich die passiven Kombiabschottungen aus beschichteten Mineralwolleplatten im Vergleich zu den aktiven Systemen verhalten und ob eine Leistungsfähigkeit im Massivholz gegeben ist. Bei diesem System war nach 95 Minuten Brandbeanspruchung kein Versagen der Kriterien Raumabschluss und Wärmedämmung festzustellen, auch wenn die Temperaturerhöhungen bei der Einbausituation 2 von CLT 1 knapp unter der zulässigen Grenze lagen (siehe Tabelle 4-7). Die Temperaturerhöhungen bei Einbausituation 1 waren geringer als bei Einbausituation 2 (siehe Tabelle 4-6).

Auf der brandabgewandten Seite waren während des Versuchs, außer kleinen Rauch- bzw. Wasserdampffahnen aus der Rohrisolierung, keine besonderen Beobachtungen wahrnehmbar. Auf der Brandraumseite war nach ca. 80 Minuten die unterste Platte der zweischaligen Einbausituation 2 (oben und unten bündig) abgefallen. Danach waren starke Temperaturanstiege an der Oberfläche wahrnehmbar, die jedoch knapp unter der Grenze von 180 K lagen. Das Abfallen trat aufgrund des Abbrands in der Laibung ein, da dadurch die Haltewirkung versagte.

Tabelle 4-6 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottungen mit Mineralwolleplatten bei Einbausituation 1

Abschottungs-system	Kombiabschottung mit beschichteten Mineralwolleplatten Einbausituation 1 (einschalig, oben bündig)				
Leistungsbelegung	Stahlrohr mit Streckenisolierung aus Mineralwolle				
Dargestellte Werte	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]				
Art der Tragkonstruktion	Auf Trag-konstruktion	Auf Fläche randnah	Auf Fläche mittig	Auf Öffnungs-verschluss	Auf Rohrleitung (Isolierung)
CLT 1	27,8	51,8	82,1	103,0	110,0
BSH	23,5	47,6	88,7	102,1	128,2
<b>Mittelwert</b>	<b>25,7</b>	<b>49,7</b>	<b>85,4</b>	<b>102,6</b>	<b>119,1</b>

Bei beiden Versuchen waren bei der einschaligen, oben bündigen Einbausituation 1 im Mittel höhere Temperaturanstiege als bei Einbausituation 2 erkennbar. Mögliche Gründe dafür sind der zweiseitige Abbrand an der Fläche und in der Laibung, der höhere Abbrandtiefen und damit höhere Temperaturen an der Oberfläche zur Folge hat.

Tabelle 4-7 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottungen mit Mineralwolleplatten bei Einbausituation 2

Abschottungs-system	Kombiabschottung mit beschichteten Mineralwolleplatten Einbausituation 2 (einschalig, oben bündig)				
Leistungsbelegung	Stahlrohr mit Streckenisolierung aus Mineralwolle				
Dargestellte Werte	Maximale Temperaturerhöhung an der Oberfläche $\Delta T$ [K]				
Art der Tragkonstruktion	Auf Trag-konstruktion	Auf Fläche randnah	Auf Fläche mittig	Auf Öffnungs-verschluss	Auf Rohrleitung (Isolierung)
CLT 1	28,1	68,9	110,0	169,0	150,6
BSH	25,0	50,1	53,2	62,8	96,9
<b>Mittelwert</b>	<b>26,6</b>	<b>59,5</b>	<b>81,6</b>	<b>115,9</b>	<b>123,8</b>

Nach dem lokalen Abfallen von Holzkohle an den Rändern der Mineralwolleplatten von Einbausituation 2 sind höhere Temperaturanstiege an den entsprechenden Thermoelementen in den Laibungsbereichen aufgezeichnet worden. Diese Temperaturerhöhungen konnten in dieser Form nur bei den passiven Systemen wahrgenommen werden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass bei der Anwendung intumeszierender Abschottungssysteme beim Abfallen laibungsnaher Holzkohle die entstehenden Fugen im Laibungsbereich durch den Expansionsvorgang verschlossen werden. Dies liegt bei passiven Systemen nicht vor.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Leistungsfähigkeit der Mineralwolle-Kombiabschottungen stärker vom Abbrand im Laibungsbereich abhängig ist, da sich die entstehenden Fugen nicht mehr schließen können. Dadurch und aufgrund der fehlenden Verbindung der beiden Platten untereinander ist insbesondere bei der unten bündigen Einbausituation 2, ein Abfallen der untersten Plattenlage möglich. Die Lage der Platten im Vergleich zur Abbrandtiefe ist

bei Einbausituation 1 als günstiger zu bewerten. Zudem könnten bei dieser Variante die Platten mit der Beschichtungsmasse miteinander verklebt werden, was sich zusätzlich positiv auf die Dauer bis zu einem Abfallen auswirkt.

Hinsichtlich der Temperaturerhöhungen auf der brandabgewandten Seite der Abschottung ist anzumerken, dass sich diese bei CLT 1 – Einbausituation 2 nur ca. 10 K unterhalb des Grenzwertes von 180 K befanden. Da die Temperaturen nach dem Abfallen stark ansteigen, hat der Zeitpunkt des Abfallens einen hohen Einfluss auf die Einhaltung der Grenzwerte. Daher ist dieses System im Vergleich zu den intumeszierenden Systemen als kritischer zu sehen.

#### 4.2.6 Oberflächentemperatur der Tragkonstruktionen

Die Oberflächentemperaturerhöhungen an den Referenzpunkten auf der Tragkonstruktion lagen im Mittel bei 22 K und damit alle in einem unkritischen Bereich (siehe Tabelle 4-8). Es war festzustellen, dass jeweils beim Prüfkörper b aller drei Prüfungen höhere Temperaturen gemessen wurden als bei Prüfkörper a. Diese Thermoelemente lagen im Einflussbereich des Schutzrohrs des Mantelthermoelements zur Ofensteuerung, welches aus einem Metallrohr besteht und ohne Maßnahmen durch die Tragkonstruktion geführt wurden und dadurch höhere Temperaturen auf die brandabgewandte Seite leitete.

Tabelle 4-8 Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen an den Referenzpunkten des ungestörten Bereichs

Temperaturerhöhungen an den Oberflächen der Referenzpunkte							
Tragkonstruktion	CLT 1	CLT 2	CLT 3	BSH	CLT 1	BSH	Mittelwert
Temperaturerhöhung	16,2	32,1	13,5	32,5	13,6	24,2	22,0

### 4.3 Tragkonstruktionen und Laibungsbereiche

#### 4.3.1 Allgemeines

Neben der Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Abschottungssysteme in den geprüften Tragkonstruktionen lag ein Fokus der Prüfungen auf den Wechselwirkungen der Abschottungssysteme mit den Tragkonstruktionen. Dazu wurden die Temperaturen in den Laibungen mit Thermoelementen gemessen und ausgewertet sowie die Restquerschnitte ermittelt und ausgewertet.

In den folgenden Abschnitten wird das Abbrandverhalten in der Fläche mit dem Abbrandverhalten in den Laibungen verglichen.

#### 4.3.2 Tragkonstruktionen

Als Referenz für das Abbrandverhalten in den Laibungen wurde das Abbrandverhalten in der ungestörten Fläche ausgewertet. Nach dem Ablöschen der Prüfkonstruktion konnten bereits Unterschiede in der Abbrandtiefen der verschiedenen Elemente festgestellt werden. Während bei

den vier Brettsperrholz-Tragkonstruktionen aufgrund des Abfallens der verkohlten Brettlagen ein erhöhter Abbrand feststellbar war, war dieses Verhalten bei den BSH-Elementen nicht zu erkennen. Dort zeigten sich wesentlich größere Holzkohlestücke, deren Klebefugen sich ebenfalls lösten, die jedoch aufgrund der stehenden Ausrichtung der Lamellen nicht abgefallen sind. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen früherer Forschungsberichte, die dieses Verhalten untersuchten [61; 62; 86].

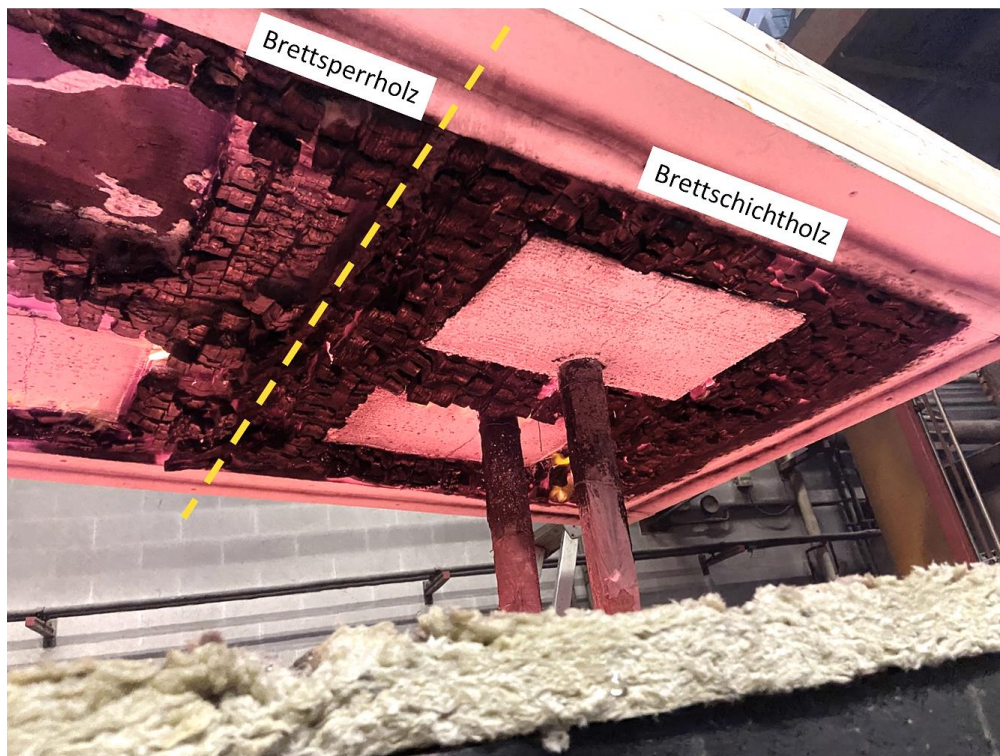
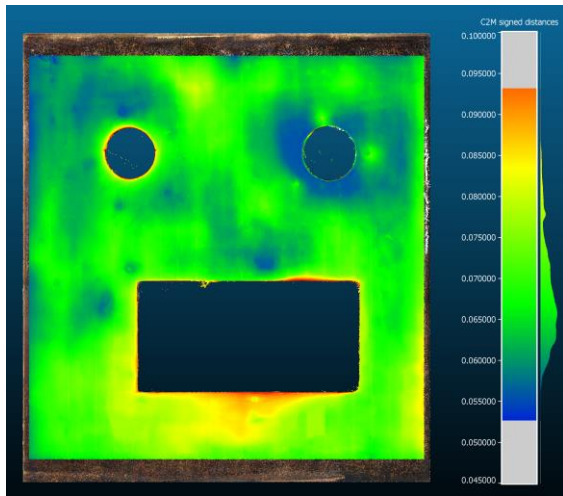
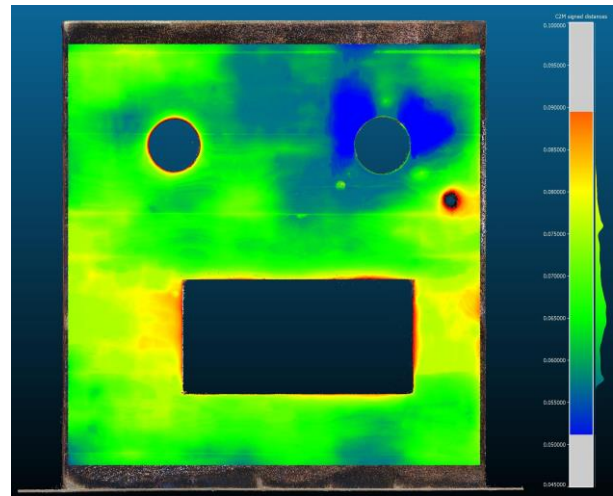


Abbildung 4-5 Unterschied der Verkohlung von Brettsperrholz (links) und Brettschichtholz (rechts)

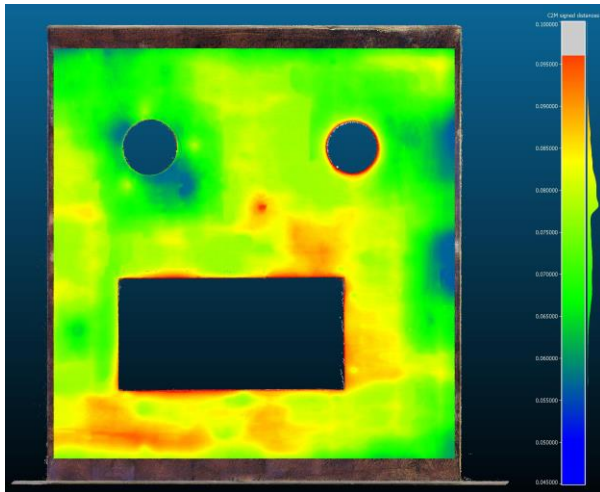
Nach dem Entfernen der Holzkohle bis zum Restquerschnitt wurden die Prüfkörper, wie in 4.1.3 beschrieben, photogrammetrisch vermessen. Die ausgewerteten Restquerschnitte werden in Abbildung 4-6 als Skalarfeld dargestellt. Rote Bereiche entsprechen einer Abbrandtiefe von 90 mm bis 100 mm, grüne Bereiche einem Abbrand von ca. 65 mm bis 75 mm und blaue Bereiche einem Abbrand von ca. 45 mm bis 55 mm. Neben den Prüfkörpern sind zusätzlich Histogramme für eine Verteilung der Messpunkte je Abbrandtiefe dargestellt. Für die Berechnung des flächigen Abbrands wurden zusätzlich zu den teilweise geschützten Auflagerbereichen die Bereiche im Einflussbereich von Abschottungssystemen oder sonstige nicht repräsentative Bereiche, wie beispielsweise die Durchdringung für das Mantelthermoelement, ausgeschnitten. Die ausgewertete Fläche zur Ermittlung der eindimensionalen Abbrandtiefe kann den Prüfberichten [81–83] entnommen werden.



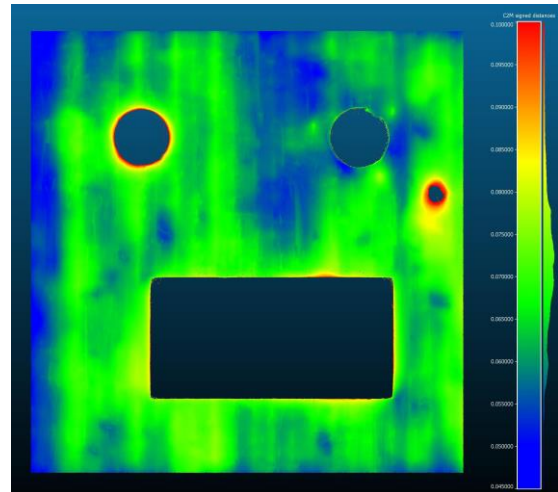
(a) CLT 1 - Prüfkörper 1a



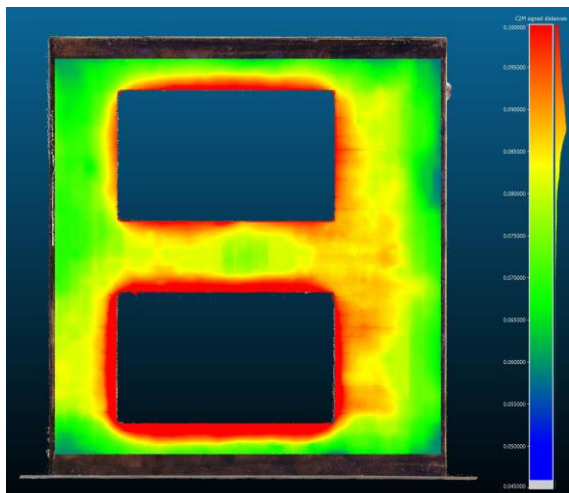
(b) CLT 2 - Prüfkörper 1b



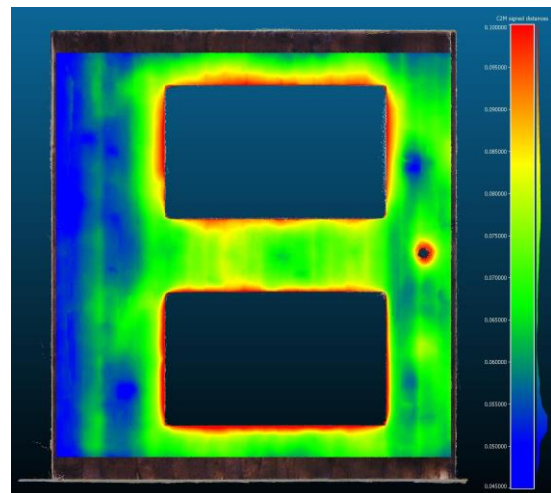
(c) CLT 3 - Prüfkörper 2a



(d) BSH - Prüfkörper 2a



(e) CLT 1 - Prüfkörper 3a



(f) BSH - Prüfkörper 3b

Abbildung 4-6 Abbrandtiefen der einzelnen Prüfkörper als Skalarfeld mit einheitlicher Farbcodierung

Insgesamt zeigen sich bei den jeweiligen Prüfkörpern unterschiedliche mittlere Abbrandtiefen in der Fläche, liegen jedoch in einem vergleichbaren Bereich von ca. 64 mm bis 76 mm. Die mittleren Abbrandtiefen in der Fläche sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Analog zu den Berechnungen konnte bei beiden BSH-Elementen die geringste Abbrandtiefe gemessen werden, welche knapp über den berechneten Abbrandtiefen lag. Dies könnte auf die Zeitdifferenz der Brandbeanspruchung nach „Ofen aus“ bei den Versuchen zur rechnerisch angesetzten Brandbeanspruchung zurückzuführen sein. Die Differenz der Abbrandtiefen liegt damit in einem nachvollziehbaren Bereich. Es zeigte sich außerdem, dass die Entlastungsnuten von CLT 1 keinen negativen Einfluss auf die Abbrandtiefen haben.

Die rechnerische Abbrandtiefe gemäß des Treppenmodells nach prEN 1995-1-2 [53] liegt für den vorliegenden Schichtenaufbau der Brettsperrholzelemente bei einer Brandbeanspruchung von 95 Minuten bei 103,5 mm. Tatsächlich erreicht wurden im Maximum ca. 76 mm bei CLT 3 (Versuchs 2) sowie CLT 1 (Versuch 3). Dagegen liegen die gemessenen Werte bei beiden BSH-Elementen in einem ähnlichen Bereich, wie die Berechnung prognostizierte (ca. 62 mm) und damit können externe Einflüsse aus den Versuchsrandbedingungen weitestgehend ausgeschlossen werden. Während Versuch 3 konnte ein Abfallen von Holzkohlestücken durch die Sichtfenster beobachtet werden. Außerdem befanden sich Holzkohlerest nach Prüfende im Prüfofen, was beides zeigt, dass ein Abfallen von verkohlten Brettlagen prinzipiell stattgefunden hat.

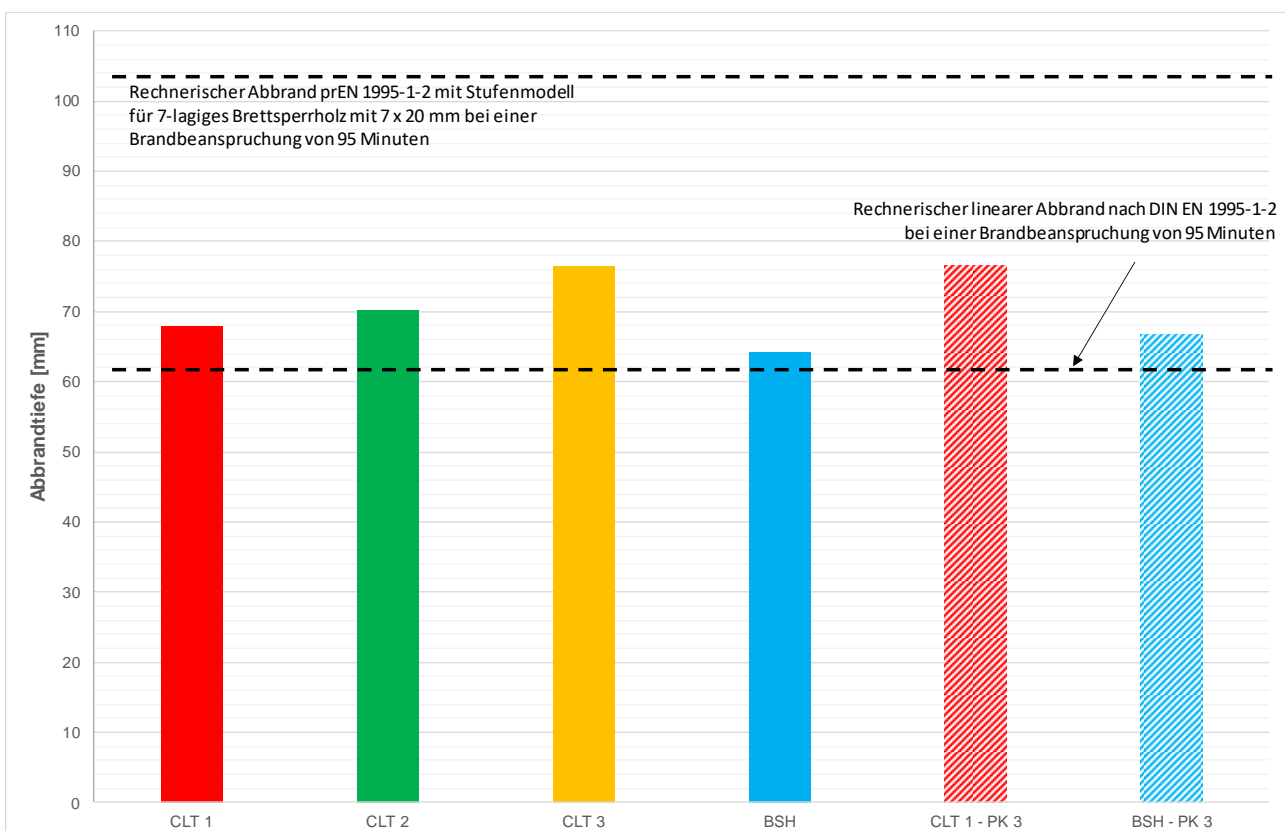


Abbildung 4-7 Gemittelte Abbrandtiefen der ungestörten Fläche auf Basis der Restquerschnitte

Mögliche Gründe für die Abweichung der Abbrandtiefen bei Brettsperrholz sind:

- Das Treppenmodell gemäß prEN 1995-1-2 liegt bei dünnen Brettlagen auf der sicheren Seite.
- Eine durch Abschottungen stark gegliederte Oberfläche kann das Abfallen von Holzkohlestücken behindern, da Halteeffekte in den Einflussbereichen der Abschottungen auftreten. Dieser Einfluss kann trotz der Nichtberücksichtigung von Bereichen, die in der Nähe der Bauteilöffnungen lagen, für die Berechnung der mittleren Abbrandtiefen nicht ausgeschlossen werden.

Ebenfalls zeigt sich ein unterschiedlicher Abbrand zwischen den beiden Prüfkörpern aus CLT 1. Diese wurden innerhalb einer Produktion gefertigt und sollten daher vergleichbare Abbrandraten aufweisen. Mögliche Gründe sind hier jedoch die unterschiedlichen Abschottungssysteme und deren Einfluss auf den Abbrand in der ungestörten Fläche. In Abbildung 4-6 (e) ist erkennbar, dass die Abschottungen bei Prüfung 3 einen höheren Einfluss auf den Abbrand in umliegenden Bereichen haben als die Systeme von Prüfung 1 und 2. Durch die Ermittlung der eindimensionalen Abbrandrate könnte es daher zu Überlagerungen und insgesamt höheren Abbrandraten kommen. Gegen diese Theorie spricht, dass bei Prüfkörper 3b (Abbildung 4-6 (f)) der gleiche laubungsnahe Bereich bei der Ermittlung nicht berücksichtigt wurde und die Differenz zwischen PK 3b und PK 2b nur bei ca. 2 mm liegt.

In Tabelle 4-9 sind die gemittelten Abbrandtiefen der ungestörten Fläche sowie die daraus abgeleiteten gemittelten Abbrandraten für eine Brandbeanspruchungsdauer von 95 und 105 Minuten aufgeführt. Die gemittelte Abbrandrate für 105 Minuten wurde aufgrund der Zeitdifferenz zwischen „Ofen aus“ und Ablöschen der Konstruktion zusätzlich aufgenommen.

Tabelle 4-9 Mittlere Abbrandraten der ungestörten Fläche<sup>3</sup>

Kürzel		CLT 1	CLT 2	CLT 3	BSH	CLT 1 (PK 3)	BSH (PK 3)	Mittelwert
$d_{char,Fläche}$	[mm]	67,95	70,29	76,40	64,19	76,56	66,64	70,34
$\beta_{0,Fläche,105min}$	[mm/min]	0,647	0,669	0,728	0,611	0,729	0,635	0,670
$\beta_{0,Fläche,95min}$	[mm/min]	0,715	0,740	0,804	0,676	0,806	0,701	0,740

Um Rückschlüsse auf die Ursachen der unterschiedlichen Abbrandtiefen nehmen zu können, wurden die Daten der Thermoelemente im ungestörten Bereich ausgewertet. Die Auswertung der zeitlichen Verläufe des Abbrands konnten jedoch ebenfalls keine kausalen Zusammenhänge

<sup>3</sup> Gemittelte aus Stufenmodell abgeleitete Abbrandraten

nachweisen. Abbildung 4-8 zeigt die Temperaturverläufe innerhalb der Tragkonstruktion, die für die Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Abbrands herangezogen wurden.

Die Ursachen für den geringeren Abbrand der Brettsperrholzelemente im Vergleich zur Prognose sowie die unterschiedlichen Abbrandtiefen von CLT 1 können damit nicht abschließend geklärt werden. Die Differenz und die Unterschiede der Abbrandtiefen in der Fläche zur Laibungsabbrandtiefe sind jedoch maßgebender für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Abschottungssysteme.

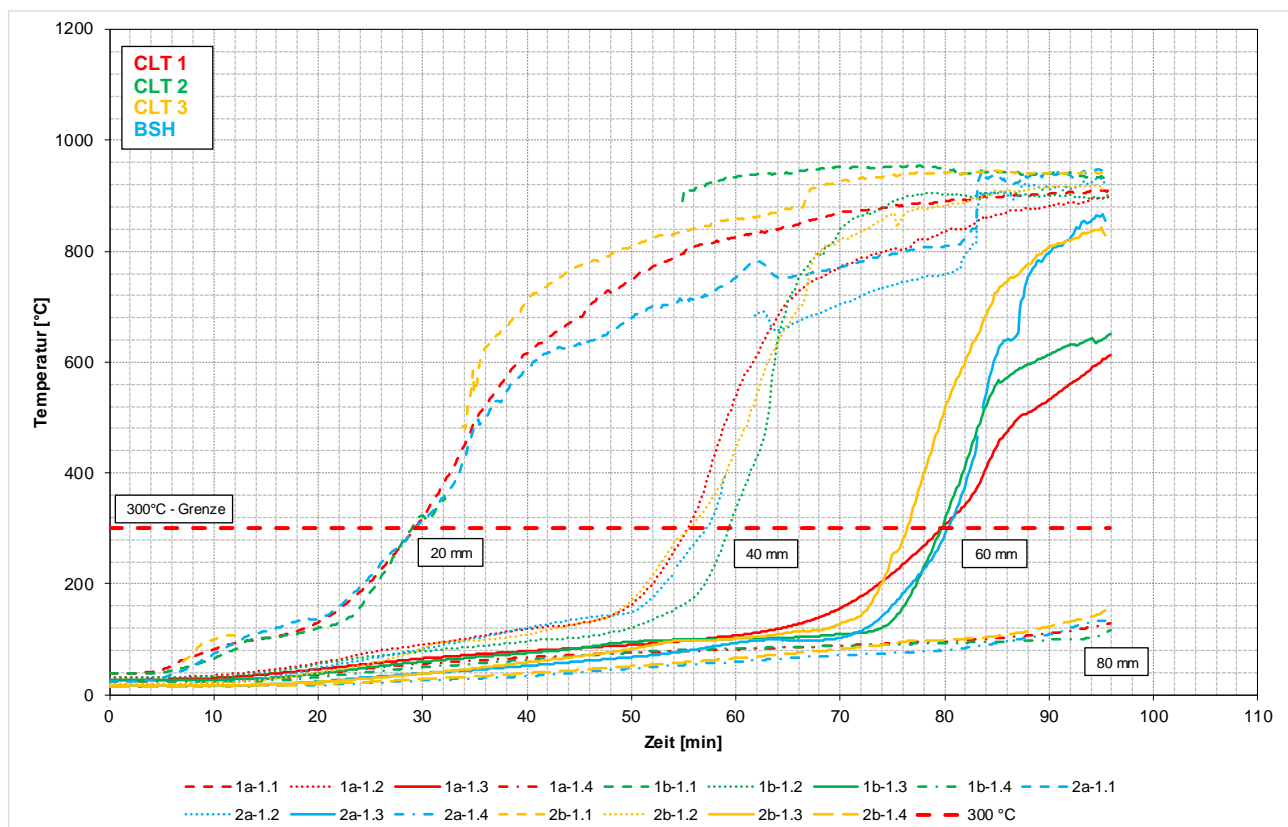


Abbildung 4-8 Temperaturverläufe innerhalb der Tragkonstruktion im ungestörten Bereich

### 4.3.3 Laibungsbereiche

Nach der Entfernung der Holzkohleschicht war festzustellen, dass es in den Laibungsbereichen der Abschottungen tiefer eingebraunt war als in der Fläche. Je nach Abschottungssystem sind unterschiedliche Ausprägungen und Verläufe des trichterförmigen Abbrands festzustellen. Beispielhaft ist in Abbildung 4-9 (a) der Abbrandtrichter der Kabelhülle dargestellt, welcher bei allen Prüfungen konstant ausgebildet war und in Abbildung 4-9 (b) der Laibungsbereich der Rohrmanschette, welcher keine erkennbaren Eckausrundungen aufwies. Auch die Entlastungsnuten bei CLT 1 hatten keinen negativen Einfluss auf die raumabschließende Funktion im Kontaktbereich zwischen Holz und Abschottungssystem.



Die maximale Abbrandtiefe im Laibungsbereich (Laibungsabbrandtiefe  $d_{\text{char,Laibung}}$ ) wurde nach dem Entfernen der Holzkohleschicht manuell gemessen und zu den flächig ermittelten Abbrandtiefen ins Verhältnis gesetzt (siehe Abbildung 4-10). Wichtig hierbei ist, dass die maximal gemessenen Tiefen dargestellt sind, da diese für einen möglichen Durchbrand im Laibungsbereich maßgebend sind. Die mittleren Laibungsabbrandtiefen waren ca. 7 bis 15 mm geringer. In der Laibung war zudem eine dunkle Färbung der Holzoberfläche feststellbar. Diese wurde jedoch nicht als Abbrandgrenze verwendet, da die Verfärbung nur oberflächlich war und das Holz nicht geschädigt wurde.



(a) Abbrandtrichter der Kabelhülse (BSH, PK 2b)

(b) Laibungsbereich der Rohrmanschette (CLT 1, PK 1a)

Abbildung 4-9 Beispielhafte Ausbildung der Laibungsbereiche der Abschottungen

Bei der Auswertung der Restquerschnitte zeigte sich, dass bei den intumeszierenden Kombiabschottungen mit Brandschutzsteinen und -schaum sowie bei der Kabelhülse sehr ähnliche Laibungsabbrandtiefen festzustellen sind. Dagegen sind diese bei den Rohrmanschetten teilweise sogar geringer als die flächigen Abbrandtiefen. Bei den Kombiabschottungen aus Mineralwolle unterscheiden sich die Laibungsabbrandtiefen je nach Einbausituation. Dort sind bei der flächenbündigen Einbausituation 2 tiefere Ausrundungen zu beobachten als bei der oben bündigen Einbausituation 1. Zwischen den verschiedenen Herstellern waren innerhalb der einzelnen Abschottungssystemen keine wesentlichen Unterschiede zu identifizieren. Die Unterschiede beschränkten sich hauptsächlich auf die Abschottungssysteme zueinander, was für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse spricht.

Die mit dem Zollstock gemessenen Restquerschnitte bzw. Abbrandtiefen in den Laibungen decken sich mit den extrapolierten Abbrandtiefen aus den Temperaturmessungen. Die mittlere Abweichung liegt hier bei Prüfung 1 und 2 unter 3 mm.

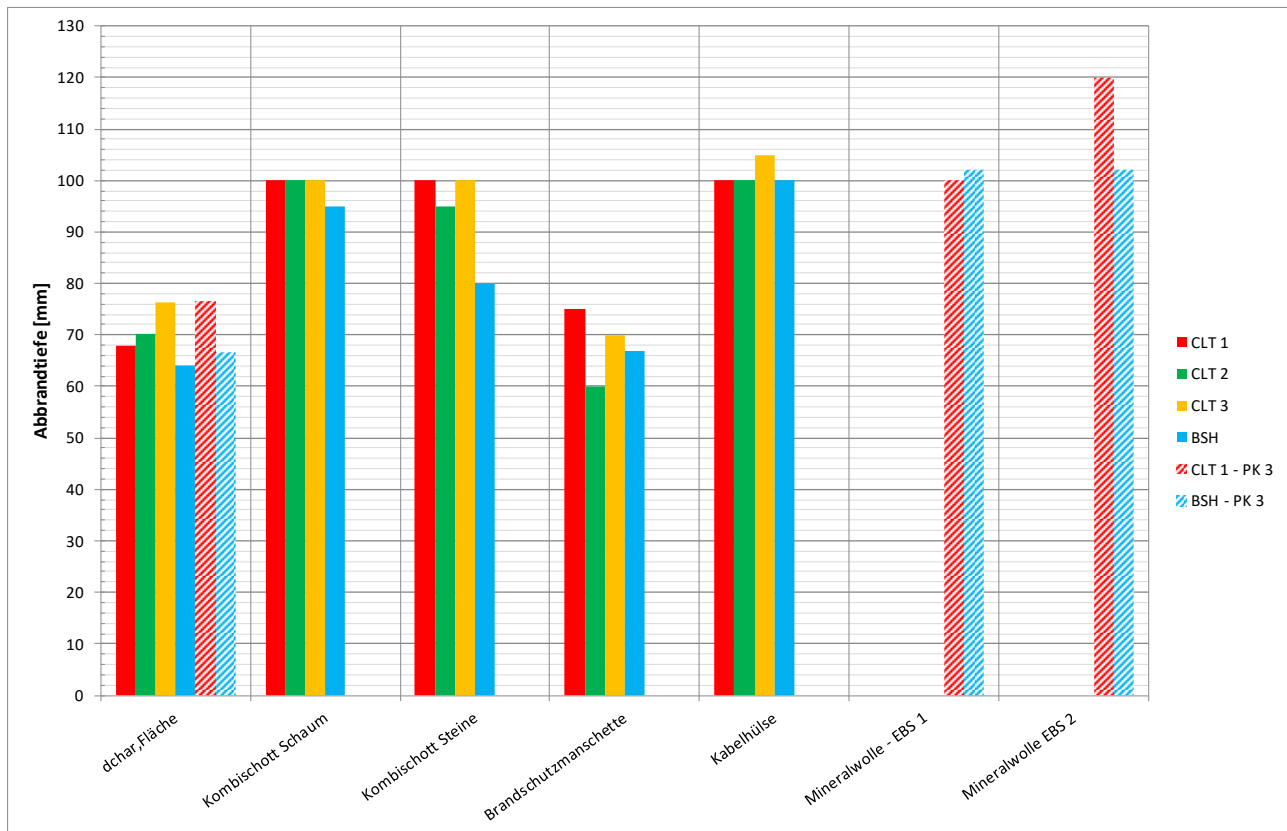


Abbildung 4-10 Vergleich der maximalen Abbrandtiefen in den Laibungen mit der mittleren Abbrandtiefe in der Fläche je Tragkonstruktion

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse und Beobachtungen der jeweiligen Abschottungssysteme hinsichtlich deren jeweiliger Laibungsbereiche beschrieben. Dabei werden insbesondere mögliche Einflussfaktoren, die sich aus dem Aufbau der Abschottung ergeben, betrachtet.

#### 4.3.4 Kombiabschottungen Brandschutzsteine und Brandschutzschaum

Zwischen den Kombiabschottungen aus Brandschutzsteinen und Brandschutzschaum waren im Laibungsbereich keine wesentlichen Unterschiede festzustellen. Die Steine ließen sich nach der Prüfung vollständig ohne große Krafteinwirkung entfernen, wogegen der Schaum stärker am Holz haftete. Ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Abschottungen ist dadurch jedoch nicht ableitbar.

Insgesamt waren keine ausgeprägten Eckausrundungen, wie beispielsweise bei der Kabelhülse, erkennbar (siehe Abbildung 4-11a). Insbesondere an den Längsseiten der Abschottungen waren die Abbrandtrichter, außer in den Bereichen der Rohrleitungen, sehr flach ausgebildet. An den Schmalseiten sowie im Einflussbereich der Rohre waren die Ecken etwas stärker ausgerundet. In Abbildung 4-11b ist der Verlauf der Abbrandgrenze, die Ober- und Unterkante des Elements sowie die Nut zur Führung der Thermoelemente auf die brandabgewandte Seite dargestellt.

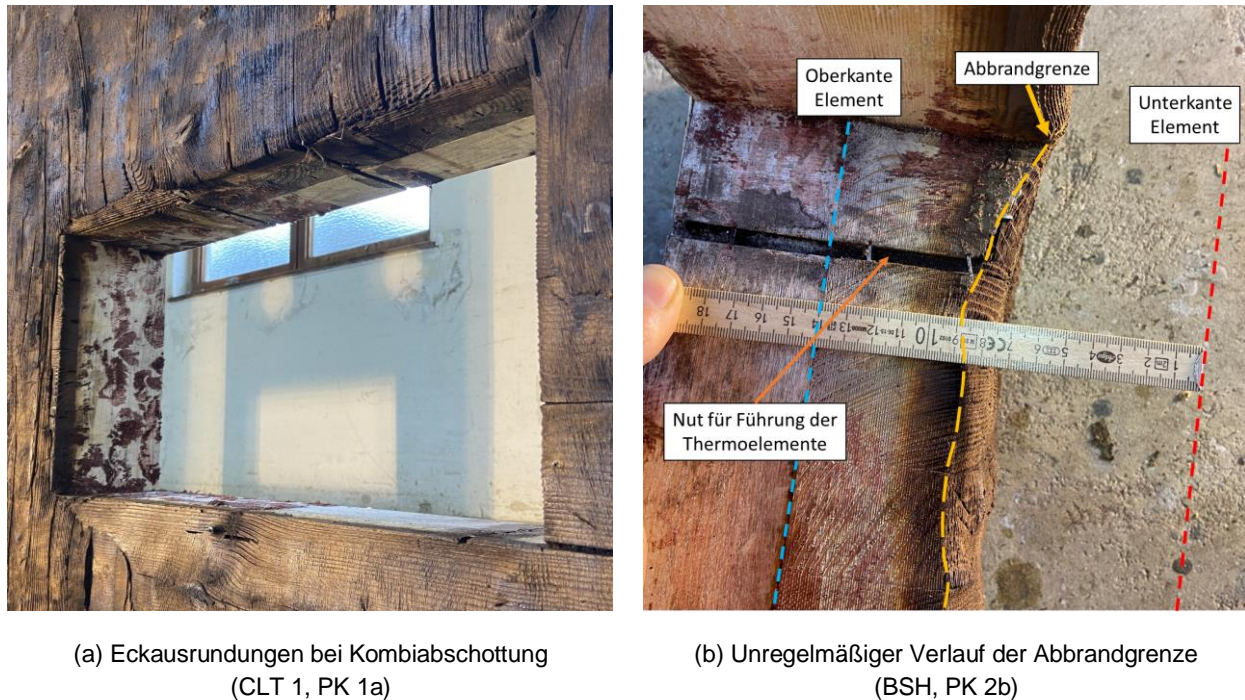


Abbildung 4-11 Eckausrundung bei Kombiabschottungen und Verlauf der Abbrandgrenze

Der Einfluss der Rohrleitungen, die mit Nullabstand zur Laibung montiert wurden, ist bei allen Prüfkörpern leicht erkennbar (siehe Abbildung 4-6). Ein möglicher dafür ist die erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Rohre. Die Stärke der Ausrundungen war jedoch auch an Stellen ohne Einfluss von Rohren erkennbar. Daher kann kein wesentlicher Einfluss der Rohre auf den Einbrand im Laibungsbereich nachgewiesen werden.

Die Aufleistung aus Vollholz war an jeder Stelle voll intakt und hatte an jeder Stelle mindestens 40 mm Abstand von der Abbrandgrenze. Die Spitzen der Schrauben zur Befestigung der Aufleistung von oben waren teilweise erkennbar, ein Einfluss auf einen erhöhten Einbrand durch deren Wärmeleitfähigkeit ist jedoch nicht nachweisbar.

Die Thermoelemente in den Laibungsbereichen zeigten bei allen Kombiabschottungen mit intumeszierenden Baustoffen einen gleichmäßigen Abbrand in den Laibungen. Es waren keine plötzlichen Sprünge erkennbar. Die 300°C-Grenze wurde an den Ecken und an den Rohren ungefähr zur gleichen Zeit erreicht.

Ein Vergleich der mittleren Abbrandtiefe in der Fläche und der **maximalen** Laibungsabbrandtiefe zeigt bei den Kombiabschottungen eine Differenz von ca. 25 mm bis 30 mm. Die Differenz zwischen mittlerer Abbrandtiefe in der ungestörten Fläche zur **mittleren** Laibungsabbrandtiefe liegt bei ca. 15 mm – 20 mm [81–83]. Da die Maximalwerte für ein Versagen maßgeblich sind, sollten diese als Berechnungsgrundlagen verwendet werden.

Insgesamt bestehen keine Bedenken hinsichtlich der Ausführung von intumeszierenden Kombiabschottungen ohne Laibungsbekleidungen. Der Einbrand im Laibungsbereich ist zwar

wahrzunehmen, schwankt jedoch in einem konstanten Bereich. Ein Einfluss der unterschiedlichen Tragkonstruktionen auf die Differenz der Laibungsabbrandtiefe konnte nicht festgestellt werden. Je nach rechnerischer Abbrandtiefe der Fläche könnten geringere Abschottungsdicken für eine Feuerwiderstandsfähigkeit von 90 Minuten ausreichen und dadurch auf eine Aufleistung verzichtet werden. Die Aufleistung ist in der Praxis selten notwendig, da bei üblichen Spannweiten eine Deckendicke von 140 mm für die Tragfähigkeit bei einer Brandbeanspruchung von 90 Minuten nicht ausreicht.

#### 4.3.5 Rohrmanschette

Die Rohrmanschette schützt den Laibungsbereich sehr gut vor einem Einbrand. Die Höhendiagramme in Abbildung 4-6 (a) bis (d) zeigen alle, dass im Einflussbereich der Rohrmanschette mehr Restquerschnitt stehen bleibt, als in der Fläche. Bei zwei Prüfkörpern (CLT 2 und CLT 3) konnte an der Stelle der maximalen Laibungsabbrandtiefe sogar ein geringerer Abbrand als in der Fläche festgestellt werden (vgl. Abbildung 4-10). An den Ecken der Durchführung waren scharfkantige Übergänge von Fläche zu Laibung erkennbar. Der Grund für die geringen Abbrandtiefen im Bereich der Rohrmanschette ist eine Haltewirkung der Abschottung durch das Gehäuse und die Schrauben, die so ein Abfallen der Holzkohlestücke verhinderte (siehe Abbildung 4-12).

Wie in Abschnitt 4.2.3 aufgeführt waren die Schrauben nach Versuchsende jedoch nicht mehr innerhalb eines tragfähigen Holzquerschnitts, da das Holz rund um die Schrauben bis zur Spitze verkohlte und dadurch keine Festigkeit mehr besitzt. Im Bereich der Schrauben war zudem ein tieferer Einbrand feststellbar, häufig war an dieser Stelle die maximale Laibungsabbrandtiefe verortet. Insgesamt ist jedoch ein positiver Einfluss der Befestigung im Holz auf die gesamte Abbrandtiefe im Laibungsbereich feststellbar.

Im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens LeitHolz [76] wird eine Verfüllung des Ringspalts mindestens bis zur rechnerischen Abbrandtiefe empfohlen, um ein Hinterbrennen zu verhindern. Dies bestätigte sich hier jedoch nicht und eine beidseitige Verfüllung von je 20 mm bis 25 mm war ausreichend.

Die Thermoelemente im Laibungsbereich zeigten bei der Rohrmanschette einen sehr gleichmäßigen, fast konstanten Anstieg der Temperaturen mit  $\Delta T (t) \approx 5$  bis  $7$  K/min. Bei keiner Laibung der Rohrabschottung wurden in einer Tiefe von 80 mm mehr als  $200$  °C erreicht. Nur an zwei Thermoelemente, die in einer Tiefe von 60 mm eingebaut waren, wurde die Abbrandgrenze von  $300$  °C erreicht. Dies deckt sich mit den Beobachtungen der Restquerschnitts-Auswertung.

Ein Vergleich der mittleren Abbrandtiefe in der Fläche und der maximalen Laibungsabbrandtiefe zeigt bei den Rohrabschottungen eine Differenz von ca.  $+ 7$  mm bis  $- 10$  mm. Bezogen auf die mittlere Laibungsabbrandtiefe ergibt sich eine Differenz von ca.  $- 5$  bis  $- 15$  mm.

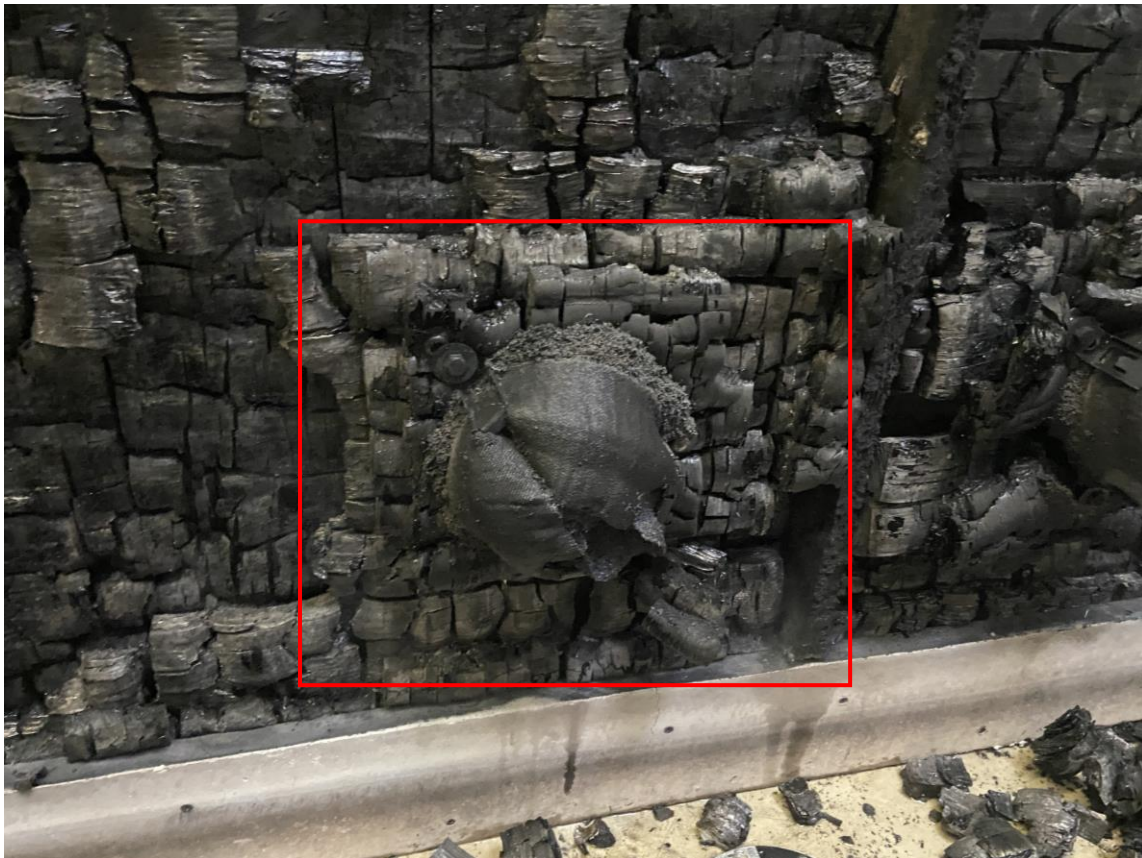


Abbildung 4-12 Geringerer Abfall von Holzkohlestücken im Bereich der Rohrmanschette durch Halteeffekt der Manschette

Es bestehen auch hier keine Bedenken für eine Ausführung ohne Laibungsbekleidung. Wichtig ist, dass die Schrauben entsprechend lang gewählt werden, damit das System ausreichend lange stabil bleibt. Es ist zu empfehlen, die Schraubenlänge anhand der zu erwartenden Abbrandtiefe plus eines Sicherheitszuschlags zu dimensionieren und den Durchmesser auf ein Minimum zu begrenzen, um den Wärmeeintrag zu beschränken. Beispielsweise könnten Teilgewindeschrauben anstelle von Sechskantschrauben oder Schraubankern verwendet werden [85].

Die Breite des Ringspalts ist entsprechend zu wählen, um eine saubere Füllung des Ringspalts in der entsprechenden Tiefe zu gewährleisten. Die Breite von 7,5 mm führte bei den vorliegenden Versuchen zu positiven Ergebnissen und konnten damit die Empfehlungen aus LeitHolz mit mindestens 5 mm bestätigen [76]. Die Begrenzung der maximalen Ringspaltgröße wurde bei diesen Versuchen nicht untersucht.

### 4.3.6 Brandschutzkabelhülse

Bei allen vier Prüfkörpern von Versuch 1 und 2, die mit reaktiven Systemen ausgeführt wurden, war der Abbrandtrichter der Brandschutzkabelhülse am deutlichsten ausgebildet. Die Ursache für diese starke Abrundung ist die Wärmeleitfähigkeit der metallischen Hülse in Kombination mit dem schmalen Ringspalt von 2,5 mm. Ein positiver Effekt auf den Einbrand in den Laibungsbereich durch den Einspanneffekt des Flansches konnte nicht festgestellt werden, auch wenn vor dem Entfernen der Holzkohleschichten rund um die Hülse mehr Holzkohle als in der Fläche erkennbar war. Durch den Wärmestrom des Metalls wird im Vergleich zur Holzkohle mehr Wärme in die Konstruktion transportiert.

Die Temperaturverläufe in der Laibung zeigten beim untersten Thermoelement (Tiefe 20 mm) einen starken Anstieg nach ca. 10 Minuten an (siehe Abbildung 4-13), der jedoch nach 2 Minuten bei einer Temperatur von ca. 200 °C wieder abflacht. Bei allen Exemplaren konnten in der Laibung in einer Tiefe von 80 mm Temperaturen über 300 °C nach ca. 85 Minuten gemessen werden. Der tiefere Einbrand, im Vergleich zu den restlichen Systemen, bestätigt sich auch dadurch, dass die Laibungen fast vollständig braun gefärbt waren (siehe Abbildung 4-9 a). Der Beginn des Laibungstrichters war daher nicht so deutlich erkennbar wie bei den anderen Abschottungssystemen, konnte jedoch durch den Einsatz von Schreinerwinkeln bestimmt werden.

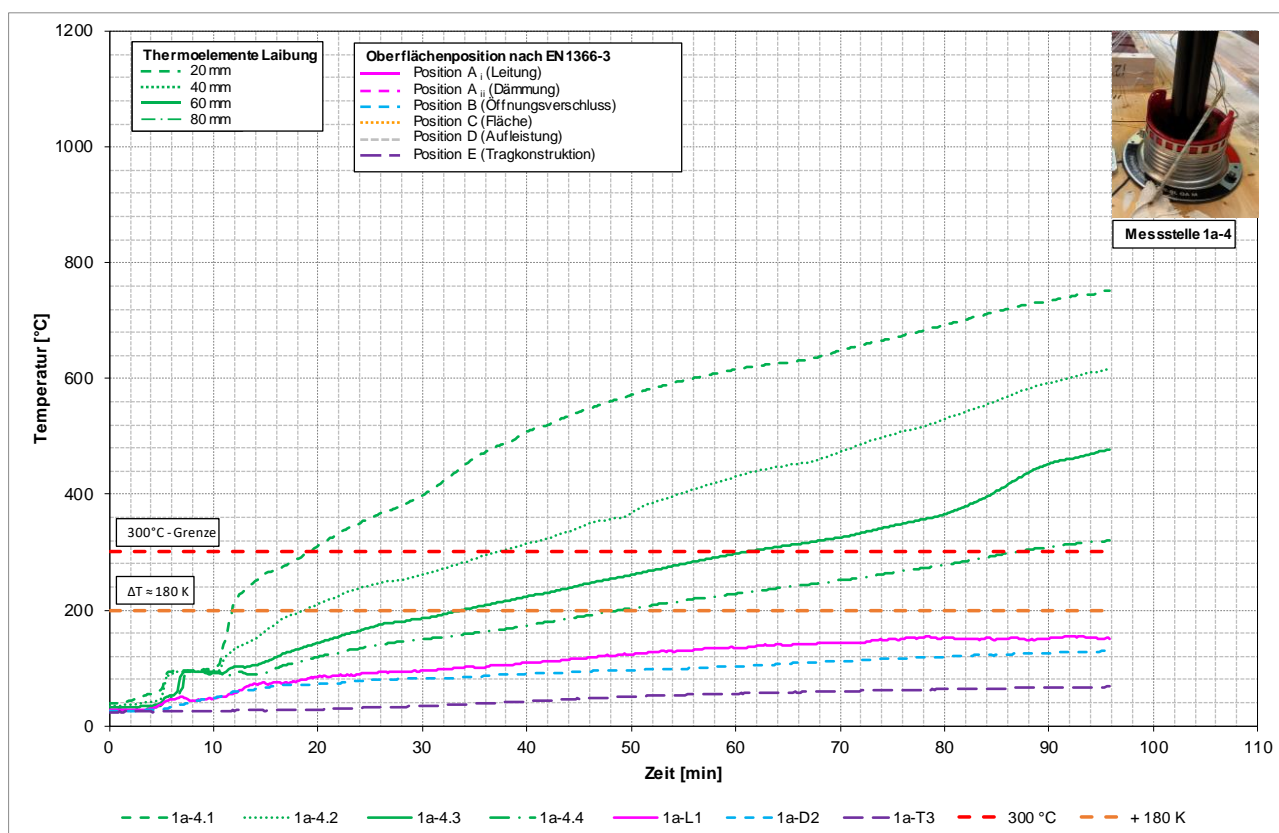


Abbildung 4-13 Beispielhafter Temperaturverlauf im Laibungsbereich der Kabelhülse bei Prüfkörper 1a (CLT 1), Messstelle 1a-4 (siehe Messstellenplan in Anhang 2, 3 – jeweils Anlage 1)

Die maximale Laibungsabbrandtiefe befand sich sehr konstant in einer Tiefe von 100 bis 105 mm, was eine Differenz zur mittleren Abbrandtiefe in der Fläche von 30 mm bis 35 mm bedeutet. Die mittlere Laibungsabbrandtiefe entspricht gleichzeitig der maximalen Laibungsabbrandtiefe.

Bei den zwei Prüfkörpern von Prüfung 2 war ein schnellerer Einbrand in die Laibung festzustellen. Beim BSH-Element wurde die Abbrandgrenze nach 82 Minuten in einer Tiefe von 80 mm erreicht, bei CLT 3 bereits nach 72 Minuten. Bei CLT 1 und CLT 2 wurde dieser Wert erst nach 87 bzw. 92 Minuten erreicht. Ein Einfluss der fehlerhaft montierten Kabelhülsen ist an dieser Stelle wahrscheinlich.

Insgesamt kann dieses System trotz der deutlichen Laibungstrichter empfohlen werden. Die Eckausrundungen sind jedoch in der Bemessung der Abschottung zu beachten. Gegebenenfalls könnte der Wärmestrom in die Laibung durch einen breiteren Ringspalt minimiert werden, wenn sich dadurch kein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Abschottung selbst oder konvektive Strömungen im Ringspalt ergeben, die umgekehrt einen Einbrand bzw. Durchbrand beschleunigen würden. Dies ist weiterführend prüftechnisch zu untersuchen.

#### **4.3.7 Kombiabschottung Mineralwolle**

Bei den Kombiabschottungen mit beschichteten Mineralwolleplatten wurde insgesamt der stärkste Einbrand im Laibungsbereich festgestellt. Hier zeigten sich die Nachteile von passiven Systemen, die ohne Laibungsbekleidung in brennbare Bauteile eingebaut werden, da der notwendige Halteeffekt durch einen stärkeren Einbrand verloren geht und dadurch die Platten abfallen können. Die Laibungstrichter waren je nach Einbausituation unterschiedlich. Bei Einbausituation 1 (einschalig, oben bündig) ist eine flachere Ausrundung an der Kante feststellbar als bei Einbausituation 2. Bei dieser war der Laibungstrichter steiler und auch insgesamt tiefer ausgebildet. Die Temperaturanstiege in den Laibungsbereichen fanden bei EBS 1 früher statt als bei EBS 2, dafür waren die absoluten Temperaturerhöhungen im Laibungsbereich bei EBS 2 höher.

Bei Einbausituation 2 waren signifikante Unterschiede zwischen den beiden Tragkonstruktionen feststellbar, da das Herausfallen der untersten Lage der Mineralwolleplatten bei CLT 1 für einen starken Einbrand in der Laibung in den letzten 15 Prüfminuten sorgte und am Ende an vielen Stellen nur noch 20 mm Restquerschnitt, also eine Lage, im Bereich der Laibung stehen blieben. Ein Durchbrand war nicht feststellbar. Die Temperaturerhöhungen befanden sich jedoch, wie erwähnt, in einem kritischen Bereich. An den entsprechenden Thermoelementen war nach dem Abfallen der untersten Plattenlage ein starker, exponentieller Temperaturanstieg in den ungeschützten Bereichen der Laibungen erkennbar.

Die maximale Laibungsabbrandtiefe bei Einbausituation 1 lag bei ca. 100 mm, bei Einbausituation 2 bei 120 mm (CLT 1) sowie 102 mm (BSH). Die mittlere Laibungsabbrandtiefe lag bei Einbausituation 1 bei ca. 95 mm, bei Einbausituation 2 bei ca. 110 mm. Dies ergibt eine maximale Differenz von 35 mm (EBS 1) bzw. 45 mm (EBS 2).

Insgesamt wird der Einsatz von Mineralwolle-Kombiabschottungen in unbekleideten Massivholzbauteilen aufgrund des starken Einbrands in der Laibung, insbesondere bei der zweischaligen Ausführung, als kritisch gesehen. Wenn das Abschottungssystem eingesetzt wird, empfiehlt sich der Einbau als einschalige, oben bündige Variante (Einbausituation 1). Mögliche Optimierungsmöglichkeiten wären dabei der Einsatz von dickeren Platten, damit der Halteeffekt länger aufrecht erhalten bleibt und der Laibungsbereich der obere Platte länger geschützt wird. Dadurch können die anfänglich höheren Temperaturanstiege bei dieser Einbausituation, die durch den zweiseitigen Abbrand entstehen, teilweise ausgeglichen werden.

#### 4.3.8 Erkenntnisse und Empfehlungen

Die vorliegenden Prüfungen zeigen, dass die aktiven Abschottungssysteme aus intumeszierenden Baustoffen in allen Tragkonstruktionen vergleichbare Ergebnisse liefern. Es bilden sich je nach Abschottungssystem unterschiedliche Abbrandtrichter bzw. Eckausrundungen am Übergang der Laibung zur Fläche aus, was sich mit den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben „LeitHolz“ [76] deckt. Bei der Ausbildung der Abbrandtrichter sind jedoch zwischen den jeweiligen Massivholz-Tragkonstruktionen keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Die Messergebnisse zeigen, dass in Tragkonstruktionen mit einem höheren Abbrand in der Fläche kein wesentlich höherer Abbrand in der Laibung festzustellen ist.

Ein Vergleich der prozentualen Verhältnisse der gemittelten Abbrandraten in den Laibungsbereichen, auf Basis der jeweiligen maximalen Laibungsabbrandtiefen, zu den gemittelten Abbrandraten in der ungestörten Fläche zeigt, dass eine Prognose der Laibungsabbrandtiefen auf Basis von pauschalen Faktoren im vorliegenden Fall nicht getroffen werden kann. Die absolute Differenz zwischen Abbrandtiefe in der Fläche und Laibungsabbrandtiefe ist, bezogen auf das jeweilige Abschottungssystem, in etwa gleich (siehe Anhang 2 / 3 / 4 – jeweils Anlage 3, Tabelle 7).

Dies zeigt, dass eine Übertragbarkeit von Prüfergebnissen in Massivholz-Tragkonstruktionen auf andere Tragkonstruktionen grundsätzlich möglich ist. Da die Abschottungssysteme jedoch unterschiedliche Laibungsabbrandtiefen und Abbrandtrichter zeigen, wird empfohlen diese Übertragbarkeit auf das jeweilige System und dessen Einbausituation (Belegung, Abständen, Ringspaltbreiten, etc.) zu beziehen und entsprechende Eckausrundungswerte je System festzulegen. Eine Prognose der Laibungsabbrandtiefe anhand der berechneten mittleren Abbrandrate eines Massivholzproduktes in Kombination mit einem spezifischen Abschottungssystem zu treffen, wird nicht als zielführend erachtet, da die prozentuale Erhöhung der Abbrandrate wesentlich stärker schwankt als die absolute Differenz der Laibungsabbrandtiefe zur mittleren Abbrandtiefe in der ungestörten Fläche.

Für die Übertragung wird folgende prinzipielle Vorgehensweise empfohlen:

- Prüfung von Abschottungssystemen in Massivholzelementen, die die definierten Eigenschaften der Norm-Tragkonstruktion erfüllen (siehe Abschnitt 4.4)
- Dokumentation der Restquerschnitte in den Laibungsbereichen bzw. Ringspalten
- Dokumentation der produktspezifischen Eckausrundungswerte der Abbrandtrichter



Diese Ergebnisse können dann, wie bei den anderen Normanordnungen, auf die gleichen Abschottungssysteme in Massivholzelementen, welche die definierten Eigenschaften der Norm-Tragkonstruktion erfüllen, übertragen werden. Dazu soll die Abbrandtiefe  $d_{char,0}$  entsprechend der Zulassungen und/oder gültigen technischen Regel (z.B. DIN EN 1995-1-2) ermittelt werden und mit dem produktspezifischen Eckausrundungswert addiert werden (Formel (4-1)). Die Klebfugenintegrität muss entsprechend des Verhaltens unter Brandeinwirkung mit beachtet werden.

$$d_{char,t,Laibung} = d_{char,0} + d_{0,Laibung} \quad [mm] \quad (4-1)$$

$d_{char,t,Laibung}$	[mm]	Bemessungs-Laibungsabbrandtiefe
$d_{char,0}$	[mm]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandtiefe
$d_{0,Laibung}$	[mm]	Produktspezifischer Eckausrundungswert

Mit diesem ermittelten Wert (z.B. „spezifische Laibungsabbrandtiefe“) und dem in den ursprünglichen Prüfungen ermittelten Restquerschnitt im Laibungsbereich kann anschließend die Mindestdicke der Massivholz-Tragkonstruktion (Formel (4-2)) ermittelt werden.

$$h_{min} = h_{ef,Laibung} + d_{char,t,Laibung} \quad [mm] \quad (4-2)$$

$h_{min}$	[mm]	Mindestdicke des Querschnitts vor Brandbeanspruchung
$h_{ef,Laibung}$	[mm]	Produktspezifische Mindestdicke des Restquerschnitts in der Laibung (Vorhaltemaß)
$d_{char,t,Laibung}$	[mm]	Bemessungs-Laibungsabbrandtiefe

In Abbildung 4-14 werden die Formelzeichen grafisch beschrieben.

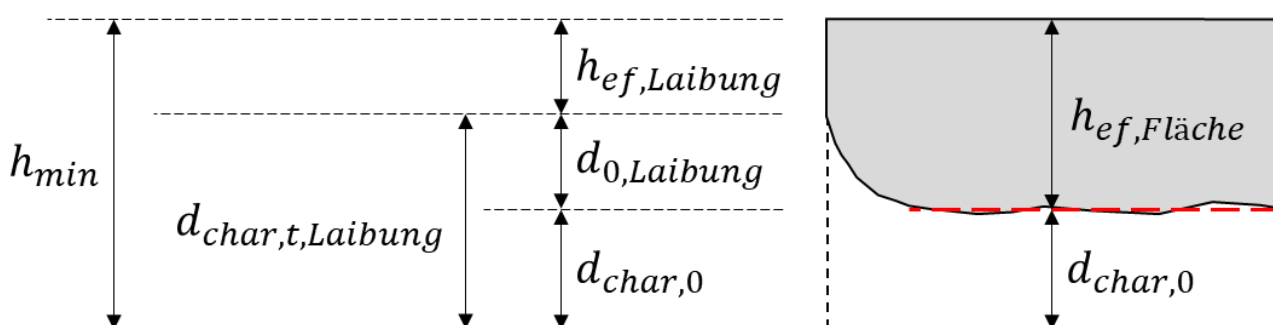


Abbildung 4-14 Skizze für Berechnung der Mindestdicke der Massivholz-Tragkonstruktion

Bei der Planung und Ausführung von Abschottungssystemen im Holzbau sollte darauf geachtet werden, dass die für die Sicherstellung der EI-Kriterien relevanten Komponenten einer Abschottung entsprechend dimensioniert und verortet werden, um ein Hinterbrennen zu verhindern. Die gewählten Maßnahmen müssen auch für den maximal zu erwartenden Abbrand und die entsprechenden Temperaturrandbedingungen leistungsfähig sein. Ebenso sind die Befestigungsmittel auf den zu erwartenden Abbrand zu dimensionieren und es werden dünnere Schrauben (beispielsweise Teilgewindeschrauben) mit schmalen Schäften ( $d \leq 6 \text{ mm}$ ) empfohlen, da dickere Schrauben oder Sechskant-Holzschrauben meist einen dickeren Schaft mit  $d \geq 10 \text{ mm}$  aufweisen und damit mehr Wärme in das Bauteil transportieren. Aus Sicht des Autors sollte die Verankerungslänge im rechnerischen Restquerschnitt  $\geq 20 \text{ mm}$  statt  $\geq 10 \text{ mm}$  sein, da bei einer Feuerwiderstandsdauer von mehr als 60 Minuten bei einer Verankerungslänge von 10 mm die Restverankerungslänge durch die Verkohlung lokal ohne Tragfähigkeit sein könnte. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Werther et al [85], bei denen ein zusätzlicher Einbrand von ca. 10 mm im Bereich der Schrauben festgestellt werden konnte. Um eine Lagesicherung der Schrauben zu gewährleisten, werden daher weitere 10 mm als sinnvoll erachtet.

Die Versuche zeigten darüber hinaus, dass die zwingende Notwendigkeit einer Laibungsbekleidung bei aktiven Systemen nicht gegeben ist und daher auf die abstimmungsintensiven, gewerkeübergreifenden Lösungen verzichtet werden kann. Dadurch kann die Planung durch die Objekt- und Haustechnik-Fachplaner erfolgen, der Holzbaubetrieb stellt in der Fertigung die Aussparung her, die dann durch das Haustechnikgewerk belegt und abgeschottet wird.

#### **4.4 Vorschlag von Regeln für die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen**

In Abschnitt 2.5.7 wurden die aktuellen Regeln für die direkte Anwendbarkeit von Prüfergebnissen in Massivholzelementen analysiert und bewertet. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse der vorliegenden Versuchsreihe sowie der theoretischen Betrachtung der Versagensmechanismen und deren Einflussfaktoren wird in Tabelle 4-10 ein Vorschlag für die Regeln zur Übertragbarkeit von Prüfergebnissen in Massivholzkonstruktionen gegeben.

Tabelle 4-10 Vorschlag von Regeln für die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen in Massivholzelementen

Nr.	Regel (in Anlehnung an DIN EN 1366-3 [22])	Erläuterung
1	Mit Massivholzelementen erzielte Ergebnisse gelten ebenfalls für die gleichwertigen Massivholzelemente mit größerer oder gleicher Dicke	Ersatz von „dieselbe“ zu „die gleiche“ (richtige Übersetzung)  Ersatz „Massivholz“ statt „Brettsperrholz“
<b>2</b>	<b>Ein Massivholzelement kann als gleichwertig zum geprüften Massivholzelement angesehen werden, wenn alle der folgenden Eigenschaften erfüllt werden:</b>	
2.1	Die Gesamtdicke des Elements ist gleich oder dicker	Ausschluss von dünneren Elementen unabhängig vom Aufbau
2.2	Die Mindestdicke des Querschnitts vor Brandbeanspruchung entspricht mindestens der Summe aus produktspezifisch ermittelter Mindestdicke des Restquerschnitts in der Laibung und der Bemessungs-Laibungsabbrandtiefe	Siehe Abschnitt 4.3.8, Formel (4-1) und (4-2)  Dadurch berücksichtigt sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mindestdicke der Brettlagen</li> <li>- Abbrandraten nach ETA/Zulassung und deren Einflussfaktoren</li> <li>- Klebfugenintegrität</li> </ul>
2.3	Das Bauteil hat die gleiche oder eine höhere Feuerwiderstandsklasse und Brandverhaltensklasse und ist nach DIN EN 13501-2 klassifiziert	Wird meist über Punkt 2.2 abgedeckt, aber höhere Sicherheitsstufe
2.4	Die Fugenbreite zwischen den Brettlagen entspricht maximal der geprüften Fugenbreite	Wird meist über Punkt 2.2, Abbrandrate abgedeckt, aber höhere Sicherheitsstufe
2.5	Die Abschottung deckt die komplette Laibung ab, oder die jeweiligen Bezüge zu den Kanten des Massivholzelements entsprechen den geprüften. Alternativ kann die Position zwischen zwei geprüften Positionen interpoliert werden.	Entweder es wird die komplette Laibung geschützt oder es liegen Erkenntnisse zu verschiedenen Positionen der Abschottung vor, die genutzt werden können.
<b>3</b>	<b>Darüber hinaus müssen bei Elementen, die mit Bekleidungen geprüft wurden, folgende Parameter eingehalten werden.</b>	
3.1	Die Anzahl der Bekleidungslagen auf der Fläche entspricht mindestens der geprüften.	Keine Bekleidung geprüft --> Bekleidung möglich, aber nicht umgekehrt.
3.1	Die Schutzdauer $t_{ch}$ der Bekleidungen auf der Fläche entspricht mindestens der geprüften	Unabhängigkeit von Produkttypen schaffen
3.2	Prüfungen ohne Laibungsbekleidungen gelten für Anwendungen mit Laibungsbekleidung, aber nicht umgekehrt.	Bei der Prüfung verwendete Laibungsbekleidungen oder Hohlraumverfüllungen werden als Teil der Abschottung angesehen und müssen in der Praxis angewendet werden.

Darüber hinaus sollte die Position der Abschottung innerhalb des Massivholzelements ohne separate Untersuchungen eingeschränkt werden, um den Einfluss von Elementfugen und Anschlüssen auszuschließen. Dies wurde bisher nicht untersucht, wird jedoch als wesentlicher Einflussfaktor gesehen.

Für die Durchführung und Dokumentation der Brandversuche mit Abschottungssystemen in Massivholz-Tragkonstruktionen (insbesondere ohne Laibungsbekleidung) werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Nach dem Abheben der Prüfkonstruktion die Abschottungen ausbauen und Laibungsbereiche ablöschen
- Holzkohle in der Fläche und in der Laibung bis zum Restquerschnitt entfernen
- Eckausrundungswerte dokumentieren
- Restquerschnitte in den Laibungen dokumentieren
- Ein zusätzliches Thermoelement in der Laibung bei prognostizierter Restquerschnittstiefe einbauen. Dieses Thermoelement sollte nicht als Versagenskriterium der maximalen oder mittleren Temperaturerhöhung verwendet werden, kann aber zur Kontrolle für den visuell bestimmten Restquerschnitt behilflich sein. (Achtung: Thermoelement muss am Ende mind. 50 mm parallel zu Isothermen verlaufen!)

Es wird darüber hinaus nicht als zielführend erachtet, wenn der komplette Verlauf des Abbrands über die Tiefe in der Laibung dokumentiert wird, da der Aufwand im Vergleich zum Erkenntnisgewinn gering ist.

Eine kritische Tragkonstruktion, die einerseits 90 Minuten Feuerwiderstand bietet und andererseits auf die meisten anderen Tragkonstruktionen übertragbar ist, bietet sich der geprüfte Aufbau aus sieben Brettlagen mit jeweils 20 mm Brettdicke an, da dieser den am höchsten zu erwartenden Abbrand aufweist, wenn die Klebfugenintegrität nicht gegeben ist. Dieser Aufbau entspricht jedoch nicht den üblichen Aufbaukatalogen der Hersteller und muss gesondert bestellt und gefertigt werden, was längere Vorlaufzeiten und ggf. höhere Preise zur Folge haben kann. Im Hinblick auf eine daraus folgende praktische Anwendung ist dieser Aufwand aus Sicht des Autors hinnehmbar.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass bestehende Abschottungssysteme, insbesondere aktive Systeme mit intumeszierenden Baustoffen, für die Anwendung im Holzbau ohne Laibungsbekleidung geeignet sind. Dies wurde bereits in den letzten Jahren durch mehrere Versuche an unabhängigen Prüfinstituten nachgewiesen. Ob Ergebnisse aus Brandprüfungen auch auf andere, gleichwertige Massivholzkonstruktionen übertragbar sind, wurde bisher aufgrund des teilweise unterschiedlichen Abbrandverhaltens der verschiedenen Baustoffe und Konstruktionsaufbauten hinterfragt.

In der Literaturrecherche konnte gezeigt werden, dass die Versagensmechanismen der bisherigen Untersuchungen weitgehend ähnliche Ergebnisse zeigten und insbesondere die Fuge zwischen Abschottungssystem und Tragkonstruktion als Schwachpunkt identifiziert werden konnte. Daher wurde im Rahmen von drei orientierenden Brandversuchen dieser Bereich genauer untersucht, um die Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Abschottungssystem und verschiedenen Tragkonstruktionen zu erhalten.

Die Ergebnisse der Brandversuche zeigen, dass die maximale Laibungsabbrandtiefe  $d_{char,t,Laibung}$  vom spezifischen Abschottungssystem stärker beeinflusst wird als vom spezifischen Massivholzprodukt. Bei den Massivholzprodukten konnten in etwa gleiche Restquerschnitte in den Laibungen gemessen werden, wobei die Restquerschnitte in den BSH-Elemente im Vergleich zu den CLT-Elementen leicht höher waren. Ein Zusammenhang der gemittelten Abbrandraten  $\beta_0$  in der ungestörten Fläche zu den mittleren Abbrandraten in den Laibungen  $\beta_{0,Laibung}$ , beispielsweise über Faktoren zur Erhöhung der Abbrandraten in der Laibung, konnte nicht nachgewiesen werden.

Da die absoluten Laibungsabbrandtiefen vergleichbar sind, ist es innerhalb von Abschottungsprodukten unter Beachtung des jeweiligen Abbrandverhaltens der Tragkonstruktion möglich, Ergebnisse aus Brandprüfungen auf andere Tragkonstruktionen zu übertragen.

Für die Verankerung von Abschottungen im Holzquerschnitt wird die Erhöhung der Verankerungstiefe von  $d_{char} + 10$  mm auf  $d_{char} + 20$  mm empfohlen, um die lokale Holzverkohlungen im Umfeld der Schraube aufgrund des höheren Wärmetransports auszugleichen.

Hinsichtlich der bauaufsichtlichen Regelung ist es notwendig, die bestehenden technischen Regeln, Prüfnormen und Richtlinien auf den aktuellen Stand der Technik des Holzbaus anzupassen, um eine Anwendbarkeit auch ohne nicht wesentliche Abweichungen oder vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen prinzipiell zu ermöglichen.

## 5.2 Ausblick

Auf Basis der Versuchserkenntnisse zeigten sich neue Fragestellungen, die im Rahmen von weiteren Forschungsvorhaben untersucht werden sollten:

- Verhalten von Abschottungssystemen in Massivholzwänden (bekleidet, unbekleidet)
- Bewertung des Einflusses der flächigen Bekleidung auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen
- Bewertung des Einflusses der Ringspaltbreite auf verschiedene Produkte und Ableitung von Interpolationsregeln
- Bewertung des Einflusses von Elementfugen und Anschlüssen auf die Leistungsfähigkeit von Abschottungen
- Validierung der Brandversuche in Großbrandversuchen
- Bewertung des Einflusses des Abstands zwischen Abschottungen auf die Ausbildung des Abbrandtrichters

Darüber hinaus könnte der Vorschlag zur Entwicklung einer Massivholz-Normtragkonstruktion in die Überarbeitungen der DIN EN 1995-1-2 mit einfließen, um eine breitere Anwendung in Massivholzkonstruktionen zu ermöglichen.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Kombinationen aus Haustechnischen Anlagen und Medien (entnommen aus [15]) .....	6
Abbildung 2-2	Brandschutztechnische Erschließungssystematik für haustechnische Installationen [17].....	7
Abbildung 2-3	Prinzipskizze zur Ausführung der Laibungsbekleidung einer Öffnung gemäß MHolzBauRL [6].....	9
Abbildung 2-4	Beispiel einer Kombiabschottung mit intumeszierenden Brandschutzsteinen und Zusatzprodukten [25].....	12
Abbildung 2-5	Übersicht über Holzbauweisen für den mehrgeschossigen Holzbau [45] .....	17
Abbildung 2-6	Prinzipskizzen der üblichen Kombinationen von Holzmassivbauweisen.....	18
Abbildung 2-7	Prinzipskizze Brandschutzbekleidung K <sub>2</sub> 60 bzw. K <sub>2</sub> 30 nach MHolzBauRL (entnommen aus [49]) .....	21
Abbildung 2-8	Übersicht der Massivholzprodukte für den konstruktiven Holzbau (entnommen aus [54]) .....	24
Abbildung 2-9	Das Zonenmodell der thermischen Holzersetzung entnommen aus [58], Ursprung aus [59] .....	26
Abbildung 2-10	Abbrandverlauf von a) Massivholzprodukten, deren Klebfugenintegrität keinen Einfluss auf die Abbrandrate hat und b) Massivholzprodukten deren Klebfugenintegrität im Brandfall versagt und ein Abfallen der Lagen stattfindet (entnommen aus [55], Ursprung aus [53]) .....	28
Abbildung 2-11	Vergleich der rechnerischen Abbrandtiefen verschiedener Massivholzprodukte (eigene Darstellung).....	29
Abbildung 2-12	Verschiedene Ausführungen von Durchführungen gemäß MHolzBauRL und MLAR sowie mögliche Ausführungen mit klassifizierten Brandschutzprodukten .....	32
Abbildung 2-13	Mangelhafte Ausführung eine Laibungsbekleidung in den Ecken (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 2-14	Schnitt durch die Laibungsbekleidung der Abschottung bei der Wandprüfung [68] .....	42
Abbildung 2-15	Schnitt durch die Laibungsbekleidung der Abschottung bei der Deckenprüfung .....	43
Abbildung 2-16	Ansicht und H-Schnitt des EI 90-Brandversuchs zu FireIn Timber [69].....	44
Abbildung 2-17	Ausführungsempfehlung für Massivholzdecke der Planungsbroschüre "Brandabschottungen im Holzbau" [14].....	45
Abbildung 2-18	Detail Kabelabschottung bei Deckenprüfung FireIn Timber 2012 [71] .....	47
Abbildung 2-19	Empfehlung der Ausführung der Laibungsbereich bei Abschottungen in Holzbauteilen [72].....	47
Abbildung 2-20	Empfehlung der Ausführung von Abschottungen in sichtbaren Massivholzdecken [19].....	48
Abbildung 2-21	Vorschlag der Ausführung von Rohrabschottungen gemäß Bericht des Canadian Wood Councils [75] .....	49
Abbildung 2-22	Mögliche Versagenswege bei Durchführungen in Holzbauteilen [18] .....	50
Abbildung 2-23	Empfehlungen für die Ausführung von Laibungsbekleidungen nach Dederich et al. [18].....	51
Abbildung 3-1	Prüfung 1 im Ofenraum (analog zu Prüfung 2) vor dem Versuch .....	55
Abbildung 3-2	Prüfung 3 im Ofenraum .....	56
Abbildung 3-3	Schnitte durch die Prüfkörperkonfigurationen .....	56
Abbildung 3-4	Anordnung Thermoelemente und Ansicht eines rohen Prüfkörpers .....	57
Abbildung 3-5	Ausführung der Brandschutzmanschette mit brennbarem Abflussrohr .....	59
Abbildung 3-6	Ausführung der Brandschutzkabelhülse mit Kabelbündel .....	60
Abbildung 3-7	Ausführung der Kombiabschottung mit Brandschutzsteinen und Brandschutzschaum mit Stahlrohr .....	61
Abbildung 3-8	Ausführung der Kombiabschottung mit ablativ beschichteten Mineralwolleplatten .....	62
Abbildung 4-1	Verlauf der Brandraumtemperaturen nach ETK bei Prüfung 1, 2, 3 .....	65

Abbildung 4-2	Verlauf des Drucks im Prüfraum bei Prüfung 1, 2, 3.....	66
Abbildung 4-3	Thermografieaufnahmen während Prüfminute 95 zur qualitativen Beurteilung der Wärmeverteilung .....	68
Abbildung 4-4	Verkohelter Rohrverschluss von Rohrmanschette nach Ablöschen der Tragkonstruktion .....	71
Abbildung 4-5	Unterschied der Verkohlung von Brettspertholz (links) und Brettschichtholz (rechts).....	75
Abbildung 4-6	Abbrandtiefen der einzelnen Prüfkörper als Skalarfeld mit einheitlicher Farbcodierung .....	76
Abbildung 4-7	Gemittelte Abbrandtiefen der ungestörten Fläche auf Basis der Restquerschnitte.....	77
Abbildung 4-8	Temperaturverläufe innerhalb der Tragkonstruktion im ungestörten Bereich .....	79
Abbildung 4-9	Beispielhafte Ausbildung der Laibungsbereiche der Abschottungen .....	80
Abbildung 4-10	Vergleich der maximalen Abbrandtiefen in den Laibungen mit der mittleren Abbrandtiefe in der Fläche je Tragkonstruktion.....	81
Abbildung 4-11	Eckausrundung bei Kombiabschottungen und Verlauf der Abbrandgrenze .....	82
Abbildung 4-12	Geringerer Abfall von Holzkohlestücken im Bereich der Rohrmanschette durch Halteeffekt der Manschette .....	84
Abbildung 4-13	Beispielhafter Temperaturverlauf im Laibungsbereich der Kabelhülle bei Prüfkörper 1a (CLT 1), Messstelle 1a-4 (siehe Messstellenplan in Anhang 2, 3 – jeweils Anlage 1) .....	85
Abbildung 4-14	Skizze für Berechnung der Mindestdicke der Massivholz-Tragkonstruktion.....	88



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Zuordnung der Feuerwiderstandsdauern zu den bauaufsichtlichen Anforderungen gemäß MVV TB.....	4
Tabelle 2-2	Übersicht über die Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2 .....	5
Tabelle 2-3	Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen an Kabel- und Rohrabschottungen zu den Feuerwiderstandsklassen auf nationaler Ebene sowie auf europäischer Ebene (in Anlehnung an [16, Tabelle A-II-14 und Tabelle A-II-15]) .....	10
Tabelle 2-4	Auswahl verschiedener am Markt erhältlicher Abschottungssysteme.....	12
Tabelle 3-1	Übersicht über die geprüften Massivholztragkonstruktionen und den darin enthaltenen Abschottungssystemen.....	58
Tabelle 3-2	Übersicht der Kombinationen aus Tragkonstruktion und verwendeten Abschottungssysteme.....	63
Tabelle 4-1	Ablauf nach Beendigung des Versuchs bei Versuch 1 .....	64
Tabelle 4-2	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottung mit Brandschutzschaum.....	69
Tabelle 4-3	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottung mit Brandschutzsteinen.....	69
Tabelle 4-4	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Rohrmanschette.....	70
Tabelle 4-5	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Brandschutzkabelhülse.....	72
Tabelle 4-6	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottungen mit Mineralwolleplatten bei Einbausituation 1 .....	73
Tabelle 4-7	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen der Kombiabschottungen mit Mineralwolleplatten bei Einbausituation 2 .....	73
Tabelle 4-8	Vergleich der maximalen Temperaturerhöhungen an den Referenzpunkten des ungestörten Bereichs.....	74
Tabelle 4-9	Mittlere Abbrandraten der ungestörten Fläche .....	78
Tabelle 4-10	Vorschlag von Regeln für die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen in Massivholzelementen .....	90

## Literaturverzeichnis

- [1] Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2021) *Atlas mehrgeschossiger Holzbau – Grundlagen Konstruktionen Beispiele*. 3. Aufl. München: Detail Business Information.
- [2] Hoffmann, T. A. (2018) *Brandschutz*. München: Detail Business Information.
- [3] MBO (2020) *Musterbauordnung*. Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 25.09.2020.
- [4] MLAR (2020) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie)*. Fassung 10.02.2015 zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom 03. September 2020.
- [5] MVV TB (2021) *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen*. Ausgabe 2021/1 mit Druckfehlerberichtigung vom 4. März 2022.
- [6] MHolzBauRL (2020) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise*. Fassung Oktober 2020.
- [7] DIN 4102-1:1998-05 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [8] DIN EN 13501-1:2019-05 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [9] DIN 4102-2:197-09 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*.
- [10] DIN EN 13501-2:2016-12 *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [11] Östman, B. (2010) *Fire safety in timber buildings – Technical guideline for Europe*. Stockholm: SP Trätekn.
- [12] VDI 4700:2015-10 *Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik*. Berlin: Beuth Verlag.
- [13] MLüAR. 2005 (29.09.2005) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen*. Vom 29. September 2005 zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom 11. Dezember 2015.
- [14] Teibinger, M.; Matzinger, I. (2016) *Brandabschottung im Holzbau – Planungsbroschüre*. Wien: Holzforschung Austria.

- [15] Egenhofer, M. (01.12.2017) *Brandabschottungen im Holzbau* [Masterthesis]. Technische Universität München.
- [16] Lippe, M. et al. (2018) *Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Muster-Systembödenrichtlinie MSysBöR, Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen EItBauVO – Praxis für Architekten, Baubehörden, Fachplaner für technische Gebäudeausrüstung (TGA), Elektro- und SHK-Handwerk, Prüfsachverständige (PrüfSV), Brandschutzsachverständige/Ersteller von Brandschutzkonzepten, Fachbauleiter Brandschutz*. 5. Aufl. Köln, Winnenden: FeuerTrutz Network; Heizungs-Journal Verlags-GmbH.
- [17] Suttner, E. et al. (2019) *Ganzheitlicher Feuerwiderstand für Konstruktionen in Holzbauweise* in: Bautechnik 96, H. 11, S. 815–823. <https://doi.org/10.1002/bate.201900058>
- [18] Dederich, L. et al. (2020) *Entwicklung einer Richtlinie für Holzbaukonstruktionen Gebäudeklassen 4 und 5 gemäß LBO RW - HolzbauRLBW*.
- [19] Gräfe, M. et al. (2015) *Regeldetaillkatalog für den mehrgeschossigen Holzbau in Gebäudeklasse 4*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [20] DIN 4102-9:1990-05 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Kabelabschottungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [21] DIN 4102-11:1985-12 *Brandverhalten vom Baustoffen und Bauteilen - Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [22] DIN EN 1366-3:2022-05 *Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [23] Deutsches Institut für Bautechnik (27.12.2022) *Dämmschichtbildende Baustoffe* [online]. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/daemmschichtbildende-baustoffe> [Zugriff am: 27. Dez. 2022].
- [24] Deutsches Institut für Bautechnik (27.12.2022) *Ablationsbeschichtungen* [online]. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). <https://www.dibt.de/de/bauprodukte/informationsportal-bauprodukte-und-bauarten/produktgruppen/bauprodukte-detail/bauprodukt/ablationsbeschichtungen> [Zugriff am: 27. Dez. 2022].
- [25] Zapp Zimmermann GmbH (27.12.2022) *ZZ® M21-S90 | ZAPP-ZIMMERMANN GmbH* [online] [Zugriff am: 27. Dez. 2022].

- [26] EAD 350454-00-1104 *Fire Stopping and Fire Sealing Products - Penetration Seals*. Brüssel: European Organisation for Technical Assessment (EOTA).
- [27] DIN EN 15882-3:2009-07 *Erweiterter Anwendungsbereich der Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [28] Hilti AG (23.12.2022) *CFS-BL P - Brandschutzsteine, -stopfen und -kissen - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_BLOCKS\\_PLUGS\\_CUSHIONS\\_7131/r26196](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_BLOCKS_PLUGS_CUSHIONS_7131/r26196) [Zugriff am: 23. Dez. 2022].
- [29] Wichmann Brandschutzsysteme GmbH & Co. KG (22.10.2022) *WD90 Eckig – Wichmann Kabelbox®* [online]. <https://www.wichmann.biz/kabelboxen/wd90-kabelbox/> [Zugriff am: 23. Dez. 2022].
- [30] Hilti AG (23.12.2022) *Brandschutzplatte CP 673 - Brandschutzbeschichtungen und -mörtel - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_COATING\\_SYSTEM\\_MORTAR\\_7131/r58691](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_COATING_SYSTEM_MORTAR_7131/r58691) [Zugriff am: 23. Dez. 2022].
- [31] James Hardie Europe GmbH (27.12.2022) *Kombiabschottung* [online].  
<https://www.aestuver.de/de/elektro> [Zugriff am: 27. Dez. 2022].
- [32] Hilti AG (25.12.2022) *Kabelmodul CFS-T - Module - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_CABLE\\_TRANSMIT\\_SYSTEMS\\_7131/CLS\\_MODULE\\_7131/r5469](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_CABLE_TRANSMIT_SYSTEMS_7131/CLS_MODULE_7131/r5469) [Zugriff am: 25. Dez. 2022].
- [33] Hilti AG (25.12.2022) *CP 636 Brandschutzmörtel - Brandschutzbeschichtungen und -mörtel - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_COATING\\_SYSTEM\\_MORTAR\\_7131/r998](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_COATING_SYSTEM_MORTAR_7131/r998) [Zugriff am: 25. Dez. 2022].
- [34] Deutsche Rockwool (25.12.2022) *Conlit Brandschutzmanschette | für Kunststoffrohre | ROCKWOOL* [online]. <https://www.rockwool.com/de/produkte/produktuebersicht/conlit-brandschutzmanschette/> [Zugriff am: 25. Dez. 2022].
- [35] Obo CMS (25.12.2022) *Installationsprinzip Kabelabschottung Conlit® Bandage* [online] [Zugriff am: 25. Dez. 2022].
- [36] Hilti AG (25.12.2022) *CP 619 - Brandschutzkitt - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_PUTTIES\\_7131/r2851](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_PUTTIES_7131/r2851) [Zugriff am: 25. Dez. 2022].

- [37] Hilti AG (25.12.2022) *Acryl-Brandschutzdichtmasse CFS-S ACR - Brandschutzdichtmassen und -Sprays - Hilti Deutschland* [online].  
[https://www.hilti.de/c/CLS\\_FIRESTOP\\_PROTECTION\\_7131/CLS\\_FIRESTOP\\_SEALANTS\\_SPRAYS\\_7131/r4883](https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_SEALANTS_SPRAYS_7131/r4883) [Zugriff am: 25. Dez. 2022].
- [38] Deutsches Institut für Bautechnik (09.12.2019) *Allgemeine Bauartgenehmigung Z-19.53-2423 – Feuerwiderstandsfähige Abschottung für elektrische Leitungen und/oder Rohrleitungen aus Kunststoff oder Metall "Hilti Brandschutz-System CFS-BL P Kombi S 90" gültig bis 11.12.2024*. Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.].
- [39] BauPVO (2011) *Verordnung (EU) Nr. 305/2001 des europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. mit Änderungen vom 16.07.2021.
- [40] Deutsches Institut für Bautechnik (27.12.2022) *Rohrabschottungen, Kabelabschottungen, Kombiabschottungen* [online]. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) [Zugriff am: 27. Dez. 2022].
- [41] DIN EN 1363-1:2020-05 *Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [42] Krause-Czeranka, T. (2012) *Richtiger Umgang mit Verwendbarkeitsnachweisen und Abweichungen* [online]. <https://www.feuertrutz.de/richtiger-umgang-mit-verwendbarkeitsnachweisen-und-abweichungen-22012014> [Zugriff am: 2. Mrz. 2023].
- [43] Jauk, G. (2022) *Ungebrochen hohes Wachstum bei BSP – Neuer Produktionsrekord: +17 % auf 1,3 Mio. m<sup>3</sup> Brettsperrholz* [online].  
<https://www.holzkurier.com/holzprodukte/2022/11/ungebrochen-hohes-wachstum-bei-bsp.html> [Zugriff am: 20. Feb. 2023].
- [44] Holzkurier.com (25.05.2021) *Die größten BSH-Produzenten* [online].  
<https://www.holzkurier.com/blog/groessten-bsh-produzenten.html> [Zugriff am: 6. Mrz. 2023].
- [45] Artmann, H.-H.; Waldner, A. (2020) *Brandschutz in der Gebäudetechnik für den produktiven Holzbau* in: Bautechnik 97, S1, S. 64–69. <https://doi.org/10.1002/bate.202000034>
- [46] Buchanan, A.; Östman, B. (2022) *Fire Safe Use of Wood in Buildings*. Boca Raton: CRC Press.
- [47] MHFHolzR (2004) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise*. Juli 2004.
- [48] Engel, T. (2022) *Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau - Hintergründe und die neue Holzbaurichtlinie* in: Schönherr, S. [Hrsg.]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

- [49] Hofmann, H.; Schöneberg, K. (2011) *Sicherheitsniveau „hochfeuerhemmend“ – Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau* in: DBZ, 05/2011.
- [50] DIN EN 1955-1-2:2010-12 *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Beuth Verlag.
- [51] DIN 4102-4:2016-05 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. Berlin: Beuth Verlag.
- [52] E DIN 4102-4/A1:2018-11 Februar 2022 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1*. Berlin: Beuth Verlag.
- [53] prEN 1995-1-2:2025 (E) *Eurocode 5 - EN 1995-1-2 - Design of timber structures*.
- [54] Hilti Inc. (2022-08) *Firestop in Wood Construction – Solutions for direct installation*. Hilti Inc. [Hrsg.].
- [55] Werther, N. et al. (2022) *Hintergründe und Nachweisgrundlagen zur Brandschutzbemessung von Brettsperrholzkonstruktionen – Teil 1* in: Bautechnik 99, H. 8, S. 587–593.  
<https://doi.org/10.1002/bate.202200041>
- [56] Winter, S. (2021) *Ingenieurholzbau I - VO 01 Einführung, Baustoffe des Ingenieurholzbaus – Vorlesungsfolien*.
- [57] Fahrni, R.; Klippel, M. (2021) *Hintergründe der Tragwiderstandsbemessung von Brettsperrholz im Brandfall* in: S-WIN Swiss Wood Innovation Network [Hrsg.] *Von der Forschung zur Praxis: Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau – Erdbebensicherheit und Brettsperrholz*. Biel. Biel.
- [58] Werther, N. (2016) *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren* [Dissertation]. Technische Universität München.
- [59] Friquin, K. L. (2011) *Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber* in: Fire and Materials 35, H. 5, S. 303–327.  
<https://doi.org/10.1002/fam.1055>
- [60] Frangi, A.; Fontana, M.; Bochicchio, G. (2007) *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverhalten von Brettsperrholzplatten* in: Bauphysik 29, H. 6, S. 387–397. <https://doi.org/10.1002/bapi.200710050>
- [61] Klippel, M.; Frangi, A. (2016) *Brandverhalten von Brettsperrholz* in: Bautechnik 93, H. 8, S. 567–573. <https://doi.org/10.1002/bate.201500070>

- [62] Brandon, D.; Klippel, M.; Frangi, A. (2021) *Glueline Integrity in Fire*. RISE Research Institutes of Sweden AB.
- [63] EAD 130005-00-0304 *Solid Wood Slab Element to be used as a Structural Element in Buildings*. Brüssel: European Organisation for Technical Assessment (EOTA).
- [64] Blume, G.; Wierspecker, F. (26.01.2018) *Gutachterliche Stellungnahme zum Brandverhalten von Abschottungssystemen vom System "Hilti ..." – für Kabeldurchführungen (elektrische Leitungen) sowie Metall- und Kunststoffrohrdurchführungen bei Einbau in Wand- und Deckenkonstruktionen aus Brettsperrohlzelementen (Massivholzbauweise) bzw. Holzrahmenbauelementen zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung*. (2400/584/17-2) - Wsp. Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig [Hrsg.].
- [65] Deutsche Rockwool (12/2022) *Conlit Brandschutz Holzbauteile*. Deutsche Rockwool [Hrsg.].
- [66] Trefz, M. (22.02.2021) *Auflistung Brandschutz-Abschottung im Holzbau*. Deutscher Holzfertigbau-Verband e.V. [Hrsg.].
- [67] DIN EN 15725:2012-05 *Berichte zum erweiterten Anwendungsbereich bezogen auf das Brandverhalten von Bauprodukten und Bauarten*. Berlin: Beuth Verlag.
- [68] MPA Braunschweig (17.03.2006) *Prüfung einer etwa 162 mm dicken, raumabschließenden Holzständerwand mit einer beidseitigen "K260-Brandschutzbekleidung" aus 2 x 18 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) zum baupraktischen Nachweise des "Kapselkriteriums" in Verbindung mit Durchführungen von Kabeln und Rohren bei einseitiger Brandbeanspruchung*. Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig [Hrsg.].
- [69] Werther, N. (15.10.2009) *Small scale fire tests for classified penetration seals and systems in combination with timber frame construction*. Technische Universität München - Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion [Hrsg.].
- [70] Werther, N.; Merk, M.; Stein, R. (15.01.2012) *Small scale fire tests for lined cross laminated timber (CLT) wall and floor elements in combination with classified penetration sealing systems and encasing claddings – test 1 wall penetration*. Technische Universität München - Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion [Hrsg.].
- [71] Werther, N.; Merk, M.; Stein, R. (15.01.2012) *Small scale fire tests for lined cross laminated timber (CLT) wall and floor elements in combination with classified penetration sealing systems and encasing claddings – test 2 floor penetration*. Technische Universität München - Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion [Hrsg.].
- [72] Werther, N. et al. (2012) *Influence of service installations for the separation and structural performance of timber assemblies exposed to fire in: 7th International Conference on Structures in Fire*. Zürich, Schweiz.

- [73] GHIL Consultants Ltd. (2016) *Firestopping Test Witness Report: for Nordic Structures*. GHIL Consultants Ltd. [Hrsg.].
- [74] Ranger, L. et al. (2018) *Fire performance of firestops, penetrations, and fire doors in mass timber assemblies* in: *World Conference on timber Engineering*. Seoul, Korea.
- [75] Dagenais, C.; Gagnon, S.; Harmsworth, A. (12.05.2014) *Fire Stops and Sealing Joints in Cross-laminated Timber Construction*. FPIInnovations [Hrsg.].
- [76] Thiele, C. et al. (2019) *Leitungsdurchführungen im Holzbau – Abschlussbericht LeitHolz*. Stuttgart: Technische Universität Kaiserslautern; Fraunhofer IRB Verlag.
- [77] DIN EN 14080:2013-09 *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [78] DIN EN 15497:2014-07 *Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung*. Berlin: Beuth Verlag.
- [79] ETEX Building Performance (25.06.2018) *ETA 06/0206: Promatect-H Brandschutzplatte*.
- [80] Hilti AG (2019) *Broschüre - Brandschutz im Holzbau – Geprüfte Anwendungen mit Hilti*. Hilti AG [Hrsg.].
- [81] Dengl, A. (2023) *Orientierende Brandprüfung von klassifizierten Abschottungssystemen in verschiedenen Massivholz-Tragkonstruktionen in Anlehnung an DIN EN 1366-3 bei einseitiger Brandbeanspruchung nach ETK gemäß DIN EN 1363-1 – Prüfung 3*. Prüfbericht Nr. 23-01-23. Technische Universität München [Hrsg.].
- [82] Dengl, A. (2023) *Orientierende Brandprüfung von klassifizierten Abschottungssystemen in verschiedenen Massivholz-Tragkonstruktionen in Anlehnung an DIN EN 1366-3 bei einseitiger Brandbeanspruchung nach ETK gemäß DIN EN 1363-1 – Prüfung 1*. Prüfbericht Nr. 23-01-18. Technische Universität München [Hrsg.].
- [83] Dengl, A. (2023) *Orientierende Brandprüfung von klassifizierten Abschottungssystemen in verschiedenen Massivholz-Tragkonstruktionen in Anlehnung an DIN EN 1366-3 bei einseitiger Brandbeanspruchung nach ETK gemäß DIN EN 1363-1 – Prüfung 2*. Prüfbericht Nr. 23-01-19. Technische Universität München [Hrsg.].
- [84] Klippel, M. et al. (2019) *Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettsperrholz im Brandfall* in: *Bautechnik* 96, H. 11, S. 824–831. <https://doi.org/10.1002/bate.201900019>
- [85] Werther, N. et al. (2015) *Untersuchungen zum Brandverhalten von querkraftbeanspruchten Verbindungen bei Holzbaukonstruktionen – Neuentwicklung und Optimierung von Verbindungssystemen und allgemeinen Konstruktionsregeln*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.



- [86] Schmid, J. et al. (2021) *Charring of Timber - Determination of the residual virgin cross section and charring rates* in: World Conference on Timber Engineering 2021 [Ed.] *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2021)*. Santiago, Chile. Red Hook, NY: Curran Associates Inc.

# Anhang

Anhang 1 – Zeitliche Abbrandverläufe (8 Diagramme)

Folgende Anhänge werden nicht veröffentlicht und können auf Anfrage nach Prüfung und Freigabe der Projektpartner zur Verfügung gestellt werden.

Anhang 2 – Prüfbericht 1

Anhang 3 – Prüfbericht 2

Anhang 4 – Prüfbericht 3

Anhang 5 – Tabelle Vergleich Massivholz nach ETA-Zulassungen

## Anhang 1 – Zeitliche Abbrandverläufe

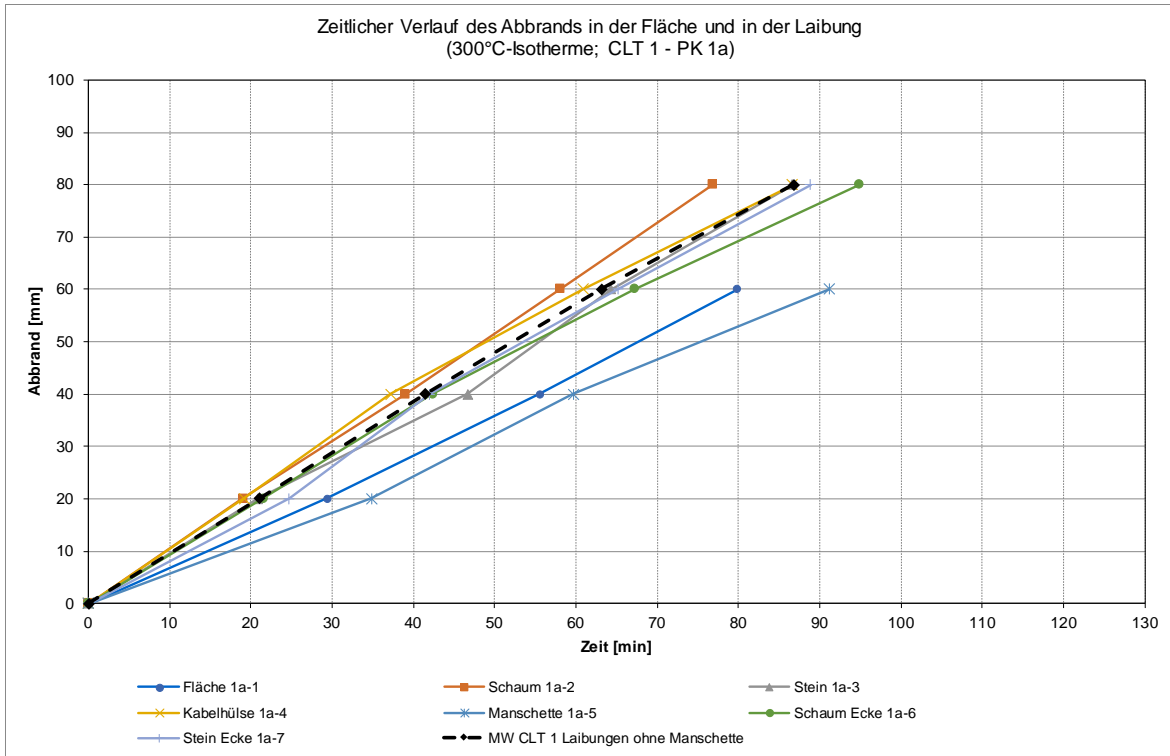


Abbildung A-1 CLT 1 (PK 1a) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in der Laibung

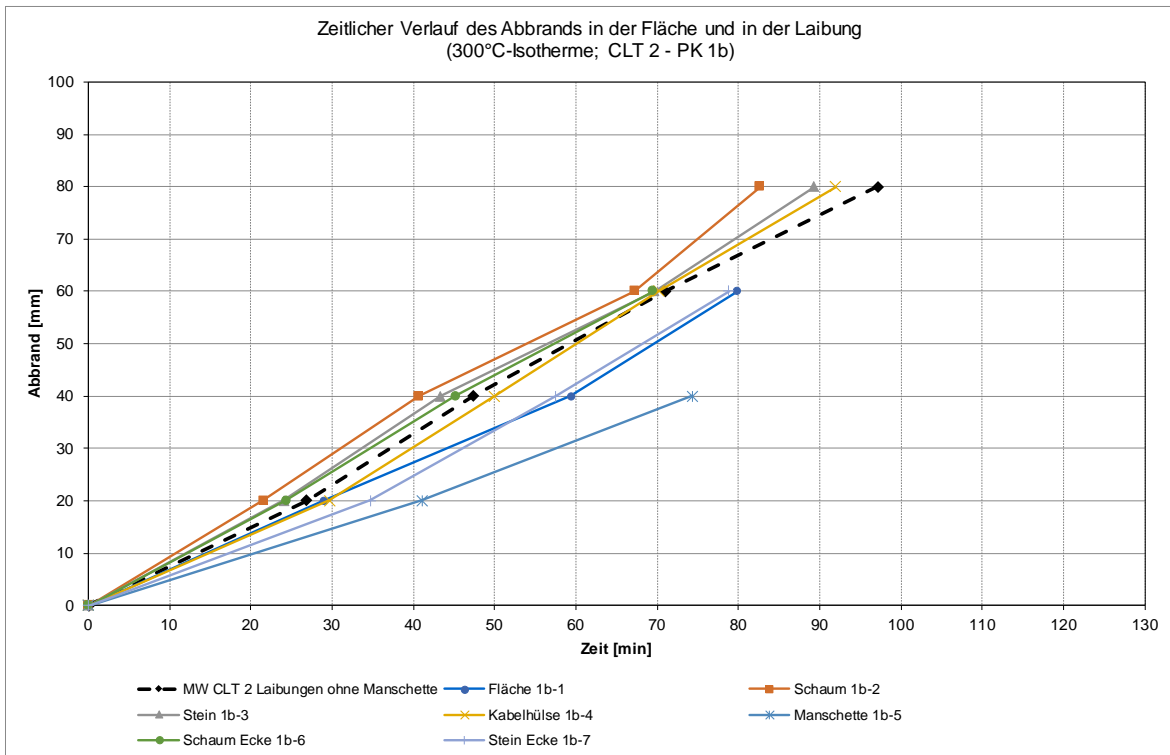


Abbildung A-2 CLT 2 (PK 1b) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in der Laibung

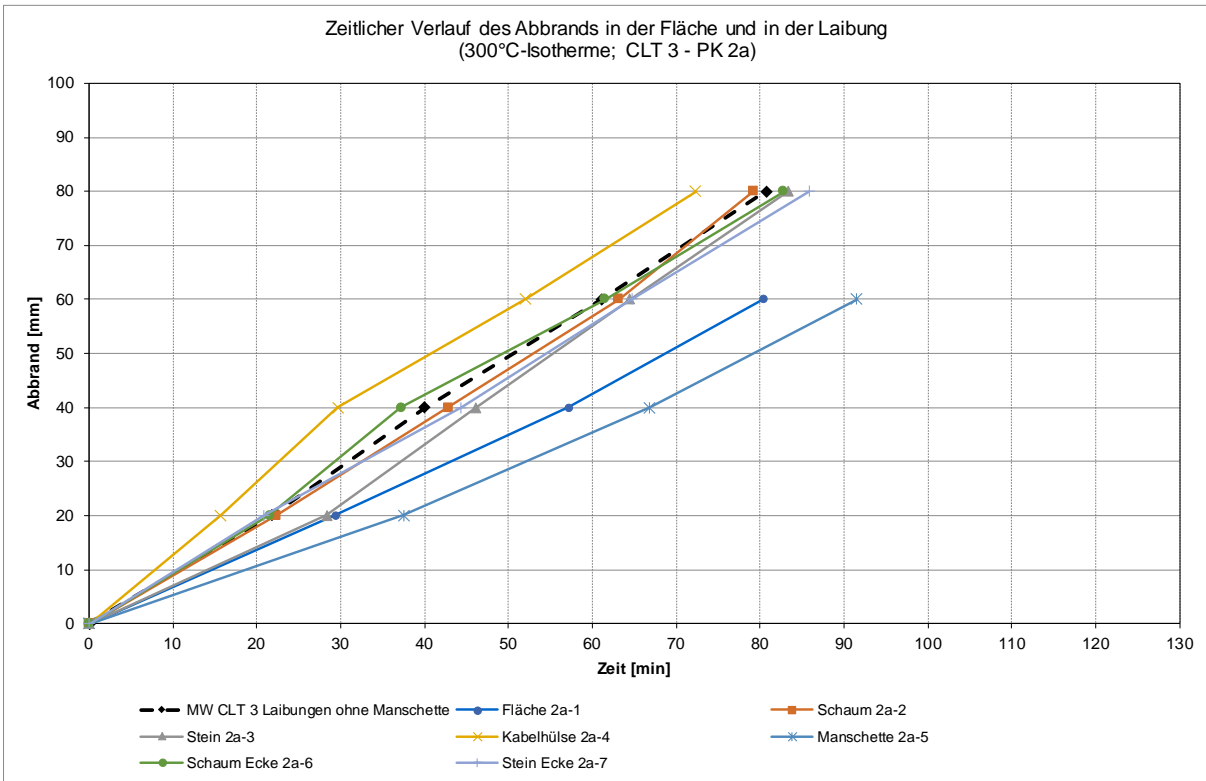


Abbildung A-3 CLT 3 (PK 2a) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in der Laibung

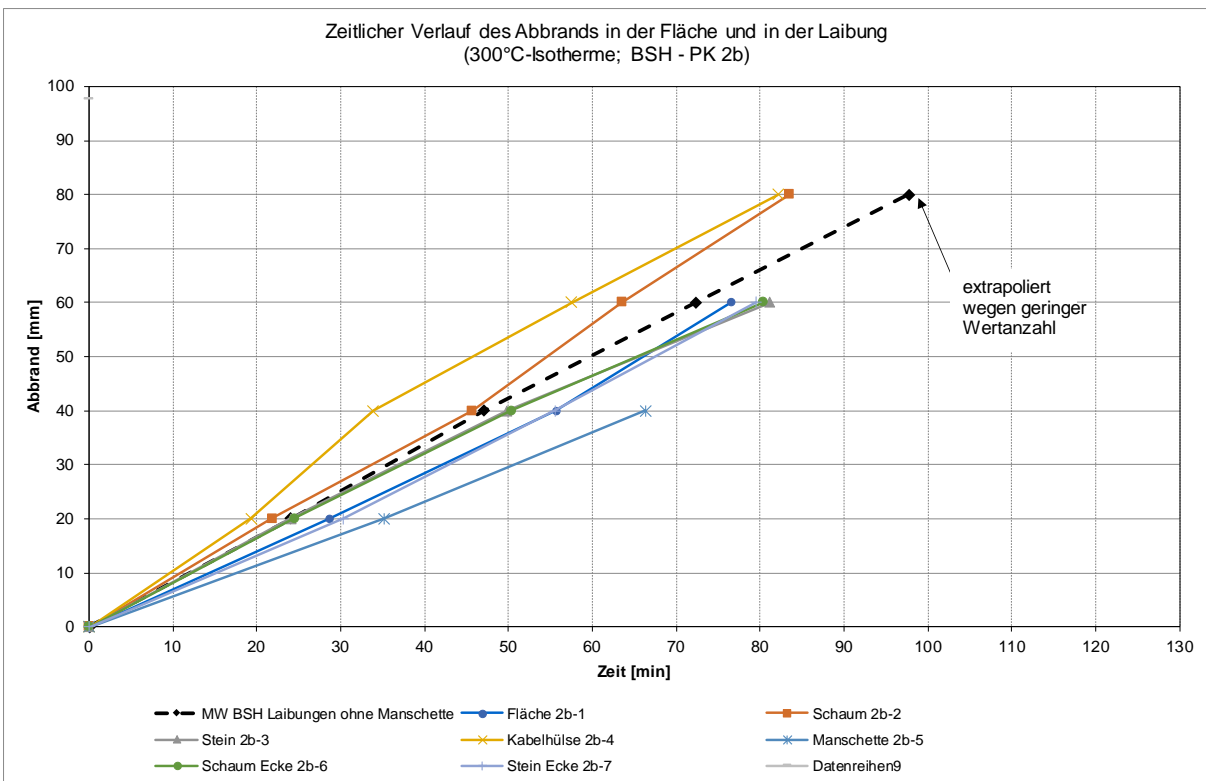


Abbildung A-4 BSH (PK 2b) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in der Laibung

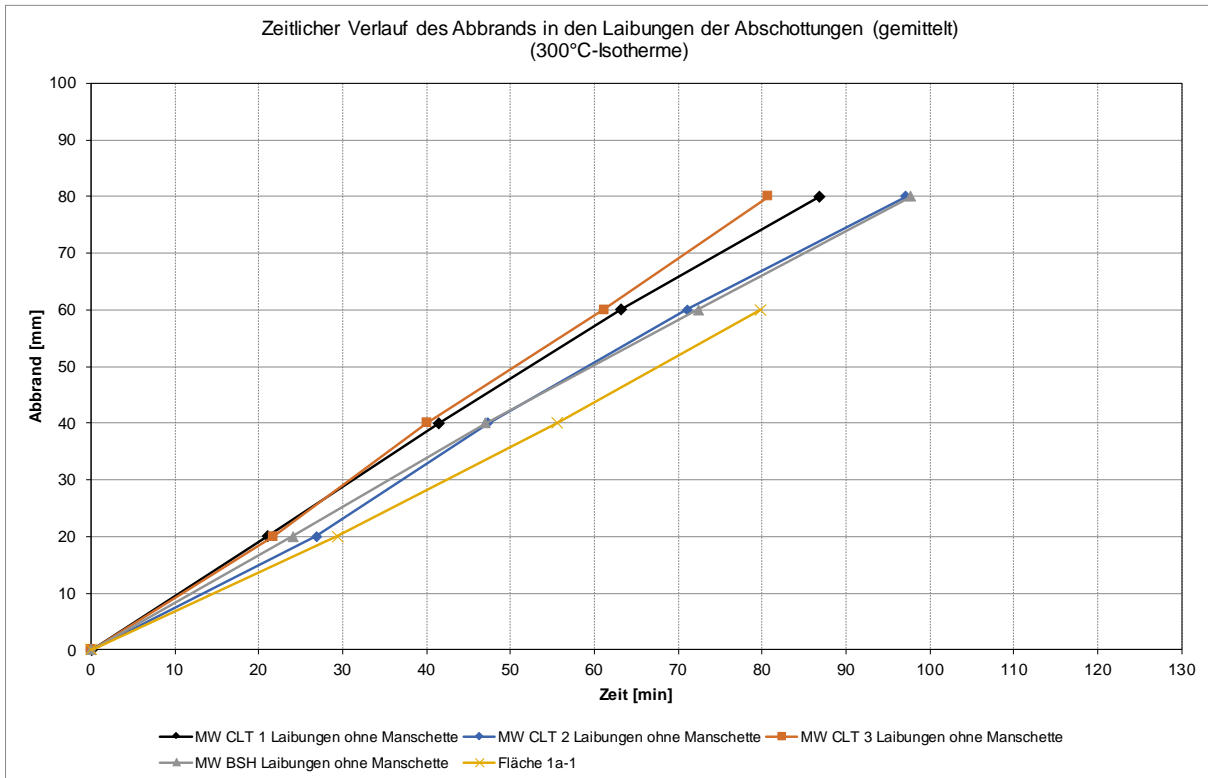


Abbildung A-5 Zeitlicher Verlauf des Abbrands in den Laibungen der Abschottungen (gemittelt)

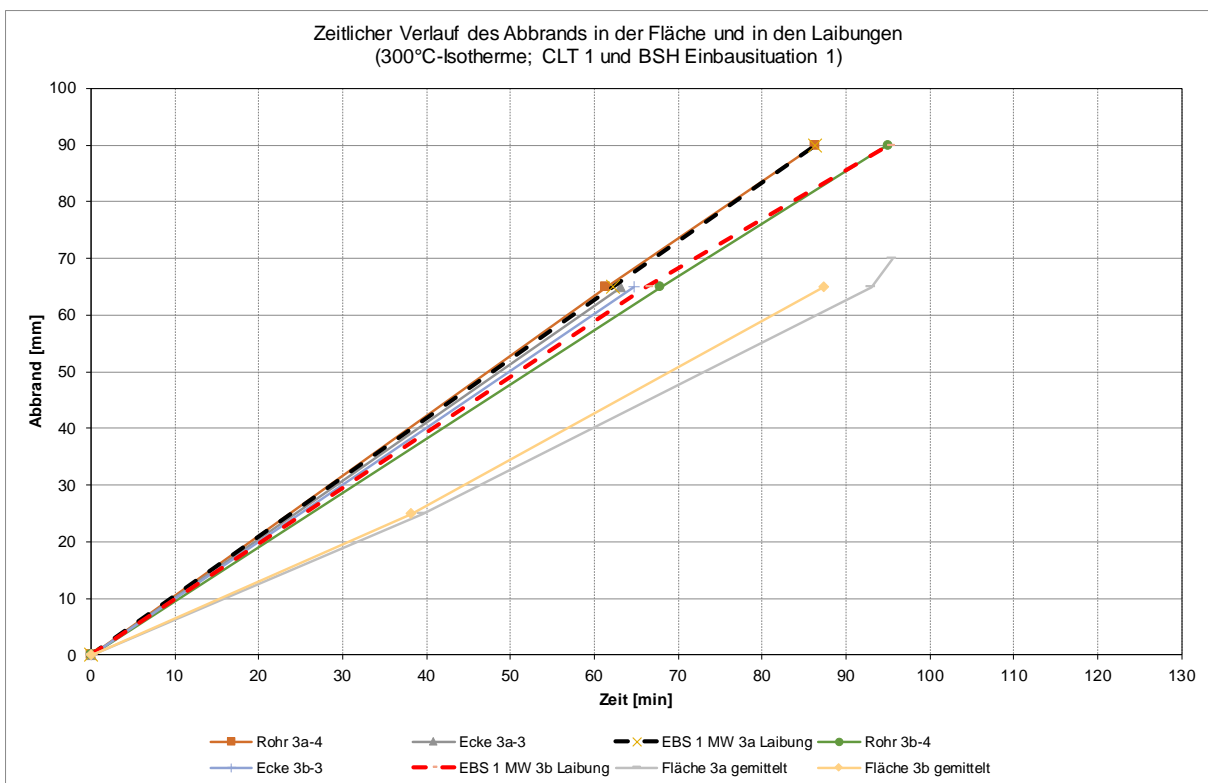


Abbildung A-6 CLT 1 und BSH (PK 3) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in den Laibungen

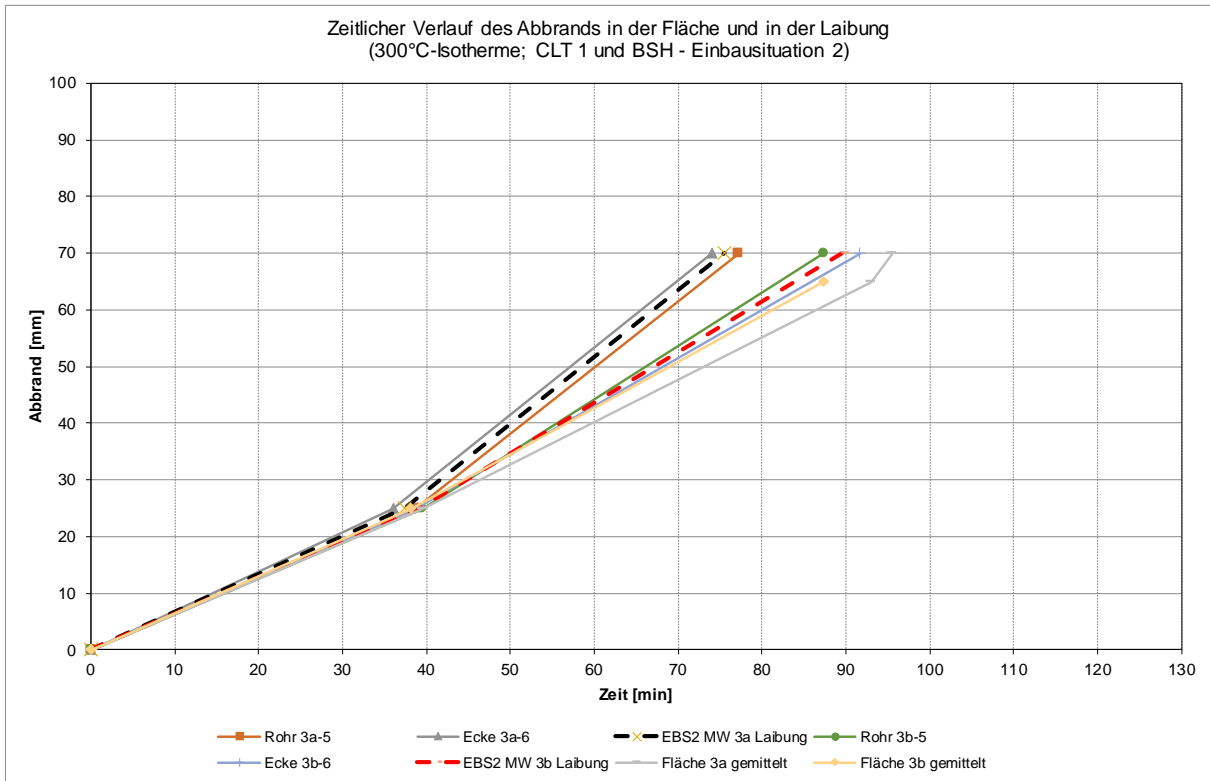


Abbildung A-7 CLT 1 und BSH (PK 3) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in der Fläche und in den Laibungen

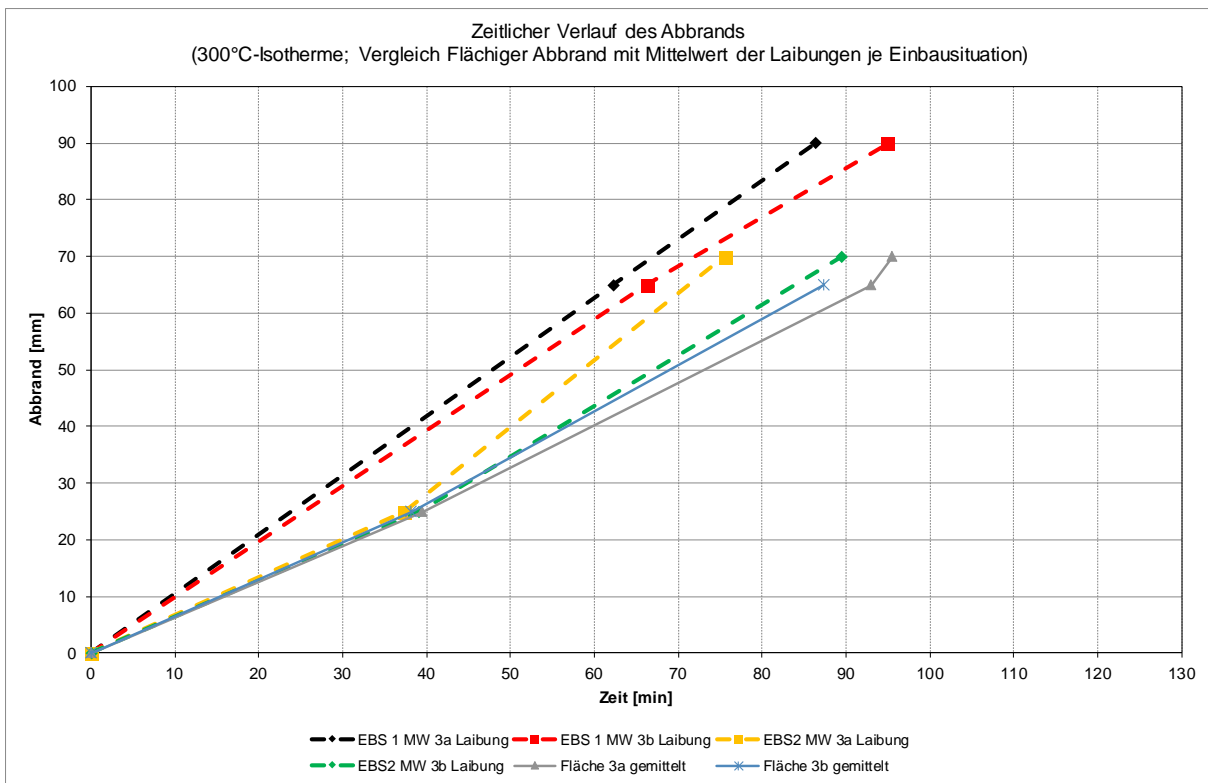


Abbildung A-8 CLT 1 und BSH (PK 3) - Zeitlicher Verlauf des Abbrands in den gemittelten Laibungen und Flächen

## **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....  
Andreas Dengl

München, 31.01.2023

## **Einverständniserklärung (freiwillig)**

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit veröffentlicht sowie wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen zur Verfügung gestellt und zitiert werden kann. Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

.....  
Andreas Dengl

München, 31.01.2023