

Schlussbericht LeitHolz

Project: 9215549_B
Leitungsdurchführungen im Holzbau

Client: Gefördert von: 
Unterstützt durch: 
Forschungspartner: Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten

Contact: Thomas Scherer, M.Sc.
www.massivbau-kl.de

Date: 07/05/2019



Dr.-Ing. Catherina Thiele



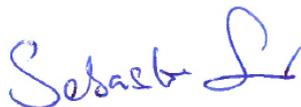
Prof. Dr.-Ing. Dirk Lorenz



Thomas Scherer M.Sc.



Prof. Dipl.-Ing. Stephan
Birk



Dr. Sebastian Simon

Dieser Bericht umfasst 118 Seiten.

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

Danksagung

Wir bedanken uns recht herzlich bei unserem Industriepartner der Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH (vertreten durch [1, 2, 3]), die uns mit Wissen sowie Materialien unterstützt hat und freuen uns auf eine weiterhin gute Zusammenarbeit. Ein weiterer Dank geht an das Architekturbüro Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten (vertreten durch [4]), welches uns bei der Grundlagenermittlung zum Thema Holzbau und bei der Auswahl praxisrelevanter Wandaufbauten tatkräftig unterstützt hat. Großer Dank geht auch an die Firma Stora Enso, die uns Probekörper für Brandversuche zur Verfügung gestellt hat. Ebenso wurden wir von den Müllerblastein Holzbauwerken bei der Fertigung eines unserer Großbrandprobekörpers unterstützt. Auch wollen wir uns bei Firmen Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG und der Armacell GmbH bedanken, die uns Materialien für unsere Versuche unentgeltlich zur Verfügung gestellt haben.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Rauforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.06)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass	15
2. Ziel des Vorhabens	16
3. Ablauf des Projekts	17
4. Grundlagen	17
4.1 Brandschutzspezifische Regelungen in Deutschland	17
4.1.1 Musterbauordnung – MBO	17
4.1.2 Schutzziele nach MBO	18
4.1.3 Gebäudeklassen	18
4.1.4 Feuerwiderstand und Brandverhalten.....	19
4.1.5 Führung von Leitungen durch Bauteile	21
4.1.6 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHolzR	22
4.1.7 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie) – MLAR	24
4.1.8 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen M -LüAR.....	25
4.2 Mehrgeschossiger Holzbau – International.....	26
4.3 Werkstoff Holz: Materialeigenschaften und Brandverhalten.....	28
4.3.1 Holz als Roh- und Baustoff.....	28
4.3.2 Aufbau des Werkstoffs Holz	29
4.3.3 Bauphysikalische Eigenschaften	30
4.3.4 Brandverhalten von Holz	30
4.4 Wand- und Deckenkonstruktionen aus Holz.....	35
4.4.1 Vertikale Holzbauelemente (Wand)	36
4.4.2 Horizontale Holzbauelemente (Decke)	39
4.5 Wirkungsweise von Brandschutzprodukten	42
4.6 Leitungsabschottungen	43
4.6.1 Brandschutzmanschetten	43

4.6.2	Brandschutzbandagen	44
4.6.3	Brandschutzrohrschalen.....	44
4.6.4	Brandschutzsteine und -stopfen	44
4.6.5	Weichschott	45
4.6.6	Brandschutzmörtel	46
4.6.7	Brandschutzschaum.....	46
4.6.8	Kabelbox	46
4.7	Ver- und Anwendbarkeit von Leitungsabschottungssystemen.....	47
4.8	Aktuelle Lösungen für die Leitungsdurchführung durch Holzbauteile mit brandschutztechnischen Anforderungen	47
4.9	Prüfung von Leitungsabschottungen	50
5.	Vorversuchsreihe	52
5.1	Versuchsprogramm.....	55
5.2	Prüfofen	59
5.3	Durchführung der Versuche	60
5.4	Ergebnisse der Vorversuche	61
5.4.1	Allgemeines	61
5.4.2	Darstellung der Ergebnisse	62
5.4.3	Interpretation der Versuchsergebnisse.....	63
5.4.3.1	Brandschutzkabelmanschette.....	63
5.4.3.2	Weichschott.....	64
5.4.3.3	Brandschutzrohrschale	64
5.4.3.4	Brandschutzbandage	64
5.4.3.5	Brandschutzmanschette	65
5.4.3.6	Oberflächentemperatur der Holzmodule.....	65
5.4.3.7	Innentemperaturen der Holzmodule	67
5.4.3.8	Verkohlung Modul-/ Wandfläche.....	69
5.4.3.9	Thermografie.....	70
5.4.4	Folgerungen für die Durchführung der Großbrandversuche	71
5.4.4.1	Brandschutzkabelmanschette.....	71

5.4.4.2	Weichschott.....	71
5.4.4.3	Brandschutzrohrschale	72
5.4.4.4	Brandschutzbandage	72
5.4.4.5	Brandschutzmanschette	72
5.4.4.6	Module	73
6.	Großbrandversuche	73
6.1	Versuchsprogramm.....	73
6.2	Wandaufbauten.....	75
6.2.1	Holzrahmenwand	75
6.2.2	Brettsperrholzwand	76
6.3	Aufbaudetails	78
6.3.1	Öffnungsleibung.....	78
6.3.2	Modulbelegung und Anordnung	79
6.3.3	Leitungsunterstützung.....	83
6.3.4	Fugenverschluss Öffnungsleibung	84
6.4	Prüfofen	85
6.5	Durchführung der Versuche	85
6.6	Ergebnisse der Großbrandversuche.....	85
6.6.1	Darstellung der Ergebnisse	86
6.6.2	Interpretation der Versuchsergebnisse	87
6.6.2.1	Brandschutzkabelmanschetten.....	88
6.6.2.2	Rohrmanschetten.....	88
6.6.2.3	Brandschutzbandagen	91
6.6.2.4	Brandschutzrohrschalen	92
6.6.2.5	Mobiles Thermoelement	93
6.6.2.6	Schrauben.....	94
6.6.2.7	Fugen	95
6.6.2.8	Temperaturen auf den Modulen.....	95
6.6.2.9	Dicke / Beständigkeit der Holzkohleschicht	95
6.6.2.10	Einbrand im Ringspaltbereich (Abstand zwischen Bohrungen).....	96

6.6.2.11	Thermografie.....	99
7.	Analyse der Versuchsrandbedingungen	100
7.1	Vorteile der Methode „Holz-in-Holz“	100
7.1.1	Optische Vorteile.....	100
7.1.2	Ökonomische Vorteile	100
7.1.3	Ökologische Vorteile	101
7.2	Allgemeine Erkenntnisse für die Prüfungen von Abschottungssystemen in Holzbauteilen	101
7.2.1	Prüfbedingungen.....	101
7.2.2	Temperaturkriterium.....	102
7.2.3	Mindestmoduldicke	102
7.2.4	Abbrandverhalten von Leimholz	103
7.2.5	Anschluss der Module an die Holzkonstruktion	104
7.2.6	Kleinst- / größtmögliches Ringspaltmaß	104
7.2.7	Abstände zwischen Bohrungen und zwischen Leitungen	105
7.2.8	Schrauben / Befestigungen von Abschottungssystemen	105
7.2.9	Oberflächentemperaturen	106
7.2.10	Lokalisierung heißer Stellen mit Thermografiekamera, Validierung mit beweglichem TE.....	106
7.3	Beanspruchung der Proben in Abhängigkeit vom Prüfofen	106
7.4	Erkenntnisse im Hinblick auf die untersuchten Abschottungssysteme.....	107
7.4.1	Rohrmanschetten.....	107
7.4.2	Weichschotts.....	108
7.4.3	Brandschutzkabelmanschetten	108
7.4.4	Brandschutzrohrschalen.....	109
7.4.5	Brandschutzbandagen	109
8.	Handlungsempfehlung	110
8.1	Leitungsabschottung in Holzbauteilen	110
8.2	Prüfung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen	110

9. Kritische Systembetrachtung

111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der Gebäudeklassen [13]	19
Abbildung 2:	Bauteilöffnung mit Brandschutzbekleidung M-HFHolzR.....	23
Abbildung 3:	Bauteilöffnung mit Brandschutzbekleidung nach M-HFHolzR_Schnitt	23
Abbildung 4:	Höhenvorgaben mehrgeschossiger Holzbau in verschiedenen Ländern, in Anlehnung an [18].....	27
Abbildung 5:	Holzbauprojekte großer Höhe [19]	28
Abbildung 6:	Aufbau eines Baumstamms [24]	29
Abbildung 7:	Abhängigkeit der Zeit bis zur Entzündung von der Temperatur [27]	32
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Brandverlaufes mit Werten aus [28] [31].....	33
Abbildung 9:	Wandkonstruktionen aus Holz [12].....	36
Abbildung 10:	Vertikales Holzbauelement (Außenwand): Rahmenbau / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Pestalozzischule Stuttgart, 2014-16.....	38
Abbildung 11:	Vertikales Holzbauelement (Innenwand): Brettsperrholz / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kindertagesstätte Parkstraße Stuttgart, 2016-19	39
Abbildung 12:	Deckenkonstruktionen aus Holz [12].....	39
Abbildung 13:	Horizontales Holzbauelement (Decke): Balkendecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Pestalozzischule Stuttgart, 2014-16.....	41
Abbildung 14:	Horizontales Holzbauelement (Decke): Brettstapeldecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kinder- und Familienzentrum Harheim, 2010-14..	41
Abbildung 15:	Horizontales Holzbauelement (Decke): Rippendecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kindertagesstätte Schöne Aussicht, Frankfurt am Main, 2010-13	42
Abbildung 16:	Beispielhafte Leitungsabschottung in einer Holzbalkendecke [50]	48
Abbildung 17:	Abschottung mit Hilti CFS-BL P innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung [51].....	49
Abbildung 18:	Hilti Abschottungssysteme in Brettsperrholzwand v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzstein CFS-BL P, Brandschutzmanschette CFS-C EL [55].....	49
Abbildung 19:	"Conlit"- Abschottungen in Brettsperrholzdecke [58]	50

Abbildung 20:	Hilti Abschottungssysteme in Brettsperrholzdecke v. l. n. r. Brandschutzhülse CFS-SL, Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzbandage CFS-B) [55]	50
Abbildung 21:	Brettschichtholzmodul (BSH-Modul)	53
Abbildung 22:	OSB-Element-Modul	54
Abbildung 23:	Positionierung der Schrauben im OSB-Element.....	54
Abbildung 24:	v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzmanschette CP 644, Brandschutzrohrschaale Conlit 150 U und Brandschutzbandage CFS-B, Platten-Weichschott mit Brandschutzbeschichtung CP 673 (jeweils in OSB-Modul).....	57
Abbildung 25:	v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzmanschette CP 644, Brandschutzrohrschaale Conlit 150 U und Brandschutzbandage CFS-B, Platten-Weichschott mit Bandschutzbeschichtung CP 673 (jeweils in BSH-Modul).....	58
Abbildung 26:	Draufsicht kleiner Prüfofen.....	59
Abbildung 27:	Seitenansicht kleiner Prüfofen	59
Abbildung 28:	Tragkonstruktion für Module	60
Abbildung 29:	Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 [60]	61
Abbildung 30:	Temperaturverläufe Holzoberfläche Brandschutzkabelmanschette in OSB-Modul.....	66
Abbildung 31:	Temperaturverläufe Holzoberfläche Brandschutzkabelmanschette in BSH-Modul.....	67
Abbildung 32:	Temperaturerhöhungen im BSH-Modul in Abhängigkeit der Zeit und der Ofenraumtemperatur.....	69
Abbildung 33:	Verkohlungsmuster	70
Abbildung 34:	Thermografie Vorversuche (v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette, Brandschutzrohrschaale, Rohrmanschette, Brandschutzbandage, Kabel-Weichschott).....	71
Abbildung 35:	Verschraubung der Holzmodule.....	74
Abbildung 36:	Aufbau der Holzrahmenwandkonstruktion.....	76
Abbildung 37:	Fertiger Aufbau Holzrahmenwand.....	76
Abbildung 38:	Schichtaufbau BSP-Wand.....	77

Abbildung 39:	Brettsperrholzwandkonstruktion, Stärke 160mm	77
Abbildung 40:	Detail Öffnungsleibung Holzrahmenwand	78
Abbildung 41:	Modulanordnung Großbrandversuch B1	81
Abbildung 42:	Modulanordnung Großbrandversuch B2	82
Abbildung 43:	Versuchsaufbauten Großbrandversuche.....	83
Abbildung 44:	Leitungsunterstützung.....	84
Abbildung 45:	Fugenausbildung	84
Abbildung 46:	Rohrmanschetten Versuch B2 (Darstellung bis Minute 64)	89
Abbildung 47:	Abbruch Kupferrohr / Brandschutzbandage B1	92
Abbildung 48:	Abbruch Kupferrohr / Brandschutzrohrschale B1	93
Abbildung 49:	Messungen mobiles Thermoelement	94
Abbildung 50:	Temperaturdifferenz Schrauben.....	95
Abbildung 51:	Unterschiedliche Kohleschichtdicken	96
Abbildung 52:	Abbrandtrichter des Ringspalts mit Richtungsdefinition.....	97
Abbildung 53:	Abbrandtiefe im Ringspalt.....	98
Abbildung 54:	Thermografie B1	99
Abbildung 55:	Thermografie B2	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Baustoffklassen national / europäisch [15]	20
Tabelle 2:	Legende Baustoffklassen [15]	20
Tabelle 3:	Feuerwiderstandsklassen national / europäisch [15]	21
Tabelle 4:	Abbrandraten β_0 und β_n für Bauholz, Furnierschichtholz, Holzbekleidungen und Holzwerkstoffe nach DIN 1995-1-2.....	33
Tabelle 5:	Prüfung von Abschottungen nach DIN EN 1366-3 [60, 59].....	51
Tabelle 6:	Leitungsauswahl Vorversuchsreihe.....	55
Tabelle 7:	Zuordnung Leitungsart_Abschottung	55
Tabelle 8:	Zuordnung entsprechende Feuerwiderstandsklasse nach DIN EN 13501-262	
Tabelle 9:	Versagen Wärmedämmkriterium Kabelmanschette	62
Tabelle 10:	Versagen Wärmedämmkriterium Weichschott	62
Tabelle 11:	Versagen Wärmedämmkriterium Brandschutzrohrschale.....	63
Tabelle 12:	Versagen Wärmedämmkriterium Brandschutzbandage	63
Tabelle 13:	Versagen Wärmedämmkriterium Rohrmanschette.....	63
Tabelle 14:	Temperaturen Holzoberfläche (Module).....	65
Tabelle 15:	Leitungsauswahl Großbrandversuche.....	75
Tabelle 16:	Verwendete Leitungsarten und Abschottungssysteme.....	80
Tabelle 17:	Ergebnisdarstellung Großbrandversuch B1	86
Tabelle 18:	Ergebnisdarstellung Großbrandversuch B2	87
Tabelle 19:	Moduldicken für unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern	103

Formelverzeichnis

(1) Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate.....	34
(2) Korrekturfaktor charakteristische Rohdichte.....	34
(3) Korrekturfaktor Werkstoffdicke	34
(4) Einheitstemperaturzeitkurve.....	60
(5) Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandtiefe.....	79

Abkürzungsverzeichnis

aBG	Allgemeine Bauartgenehmigung
abP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
GKF-Platte	Gipskartonfeuerschutzplatte
LBO	Landesbauordnung
MBO	Musterbauordnung
MLAR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie)
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
M-HFHolzR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Musterholzbaurichtlinie)
M-LüAR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen (Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie)
OSB-Platte	Oriented Strand Board (Grobspanplatte)

Definitionen

Abschottung

Eine Abschottung ist eine Bauart zum Abschotten von Leitungen, die Bauteile mit Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit durchdringen. Eine Abschottung hat konkrete Abmessungen und eine konkrete Belegung, ihr kann genau eine Feuerwiderstandsklasse zugewiesen werden (in Anlehnung an [5]).

Abschottungssystem

Der Begriff Abschottungssystem beschreibt alle zugelassenen Kombinationen von Produkten zum Erstellen von Abschottungen, die mit den im Anwendbarkeitsnachweis vorgegebenen Produkten möglich sind. In Abhängigkeit der Randbedingungen bzw. der Art des Einbaus der Produkte können dabei unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern erreicht werden. Es werden im Anwendbarkeitsnachweis Vorgaben zu möglichen Einbauvarianten gemacht. Zur Öffnungsgröße oder Abständen der Leitungen untereinander können beispielsweise Maximalwerte angegeben werden (in Anlehnung an [5]).

Hinterbrennen

„Hinterbrennen“ beschreibt in dieser Arbeit den Effekt, dass der Abbrand des Bauteils von der brandbeanspruchten Seite aus soweit fortschreitet, dass der Bereich hinter dem brandseitigen Einbauteil und aller dazugehöriger Abdichtungsmaßnahmen vom Brand einseitig beansprucht werden kann. Somit kann der Brand, am brandseitigen Bauteilen vorbei, in das Innere des, von den Leitungen durchdrungenen Bauteils, in den Bereich der Öffnung vordringen. Es verbleibt somit nur noch der feuerabgewandte Teil der Abschottung zum aufrechterhalten der Leistungskriterien.

Raumabschließende Wände

„Als raumabschließende Wände gelten z. B. Wände in Rettungswegen, Treppenraumwände, Trennwände von Nutzungseinheiten und Brandwände. Sie dienen zur Verhinderung der Brandübertragung von einem Raum zum anderen. Sie werden nur 1seitig vom Brand beansprucht. Als raumabschließende Wände gelten ferner Außenwandscheiben mit einer Breite > 1,0 m. Raumabschließende Wände können tragende oder nichttragende Wände sein.“ [6]

1. Anlass

In der letzten Dekade sind Bestrebungen erkennbar, die Verwendung des Baustoffs Holz weiter voranzutreiben, siehe dazu [7] [8]. Dies ist vor allem durch die Vorfertigbarkeit, die optischen und ökologischen Eigenschaften des Holzes zu begründen. Holz ist ein nachwachsender Rohstoff, der als Kohlenstoffdioxid-Speicher (CO₂-Speicher) wirkt. Aufgrund der Brennbarkeit von Holz ist dessen Verwendung als Baumaterial zurzeit allerdings stark reglementiert (Musterbauordnung (MBO) / Musterholzbaurichtlinie (M-MFHHolzR)). Diese Vorsichtsmaßnahmen lassen sich vor allem auf historische Stadtbrände wie z. B. 1666 in London und Geschehnisse in Kriegen zurückführen.

Bis 2002 war die Verwendung des Baustoffs Holz im Regelfall für tragende und aussteifende Bauteile in Gebäuden, deren Aufenthaltsräume oberhalb von sieben Metern liegen nicht gestattet [9]. Im Jahr 2002 wurde mit der neuen Fassung der MBO eine neue Gebäudeklasse 4 (Gebäude mit einer Höhe von bis zu 13 Metern) eingeführt. Für diese Gebäudeklasse gilt nun nicht mehr die Anforderung „feuerbeständig“ an die tragenden und aussteifenden Bauteile, sondern „hochfeuerhemmend“ [10]. So wird in diesen Gebäuden die Verwendung von brennbaren Baustoffen, also auch Holz, ermöglicht. Zunächst sind Bauteile aus Holz dabei selbst als eine immobile Brandlast zu werten. Die Brennbarkeit der Baustoffe von Bauteilen erhöht das Risiko von Brandentstehung und Brandausbreitung. Aus diesen Gründen darf das Holz bislang nicht ungeschützt verbaut werden. Die M-MFHHolzR regelt, dass eine Beplankung mit nichtbrennbaren Baustoffen erfolgen muss, die die Beteiligung der Bauteile am Brandgeschehen über eine Dauer von 60 Minuten wirksam verhindert [11]. Dadurch wird sichergestellt, dass durch die Verwendung des brennbaren Baustoffs in der relevanten Zeitspanne, die durch die Feuerwiderstandsanforderung des jeweiligen Bauteils festgelegt wird, keine zusätzliche Brandlast in Form der Konstruktion in das Gebäude eingebracht wird. Weiterhin soll der Brandeintrag ins Innere von Bauteilen vermieden werden. Hohlraumbrände sind schwer zu detektieren und zu löschen und können noch lange nach den Löscharbeiten zu einem erneuten Ausbruch des Brandes führen.

Aus diesen Gründen relativieren sich die Vorteile des Bauens in Holz. Die optisch ansprechenden Holzoberflächen sind nicht sichtbar und auch der Vorteil der Vorfertigbarkeit wird durch die geforderte Beplankung geschmälert. Außerdem werden durch die Beplankung zusätzlich zum umweltfreundlichen Baustoff Holz andere, weniger umweltfreundliche Materialien verwendet. Am Ende ist das Bauwerk nicht mehr ganz „grün“. Weiterhin sind die erforderlichen Maßnahmen mit ein Grund dafür, dass die primären Kosten für ein Gebäude aus Holz teilweise höher sind als bei konventionellen Gebäuden [12].

Seit einiger Zeit beschäftigen sich viele Forschungseinrichtungen (z. B. TU München, TU Braunschweig, ETH Zürich, sowie Institute der Fraunhofer Gruppe) damit, eine Lösung zu finden, wie der Werkstoff Holz auch ohne eine Beplankung verwendet werden kann. Es existiert bereits eine Vielzahl an Bauwerken, die ohne eine solche Beplankung errichtet wurden (z. B. „Woodcube“ Hamburg). Weitere Bauwerke weichen von den Vorgaben der M-MFHHolzR in Bezug auf ihre Höhe oder auch durch die Verwendung brennbarer Dämmstoffe ab und erfüllen die in der MBO festgelegten Schutzziele auf andere Weise. (z. B. K8 Aalen-Waldhausen, H8 Bad-Aibling, E3 Berlin) Dies erfordert ein durchdachtes Brandschutzkonzept und ist ggf. mit einem großen Aufwand an Kompensationsmaßnahmen verbunden.

All diese Bemühungen lassen die Vermutung zu, dass in den nächsten Jahren eine Novellierung der MBO bzw. der M-MFHHolzR angestrebt wird, die das Bauen in Holz auch ohne eine zusätzliche Beplankung ermöglichen könnte.

Eine besondere Rolle nimmt das Bundesland Baden-Württemberg ein. Die dort gültige Landesbauordnung (LBO) ließ als erste hochfeuerhemmende und feuerbeständige Bauteile aus brennbaren Baustoffen zu, wenn die geforderte Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen wird und die Bauteile so eingebaut werden, dass sichergestellt wird, dass Feuer und Rauch keine Bereichsgrenzen (Brand- bzw. Rauchabschnitte) überschreiten können (§26 Abs.3 LBO BW). Mittlerweile (Stand 02/2019) haben auch die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Berlin, Hamburg und Hessen gleiche oder ähnliche Passagen in ihre Landesbauordnungen übernommen.

Um das Bauen in Holz attraktiver werden zu lassen, müssen noch viele Details, die den Brandschutz betreffen, erarbeitet und technisch beschrieben werden. Ein besonders kritisches Detail im Holzbau sind Leitungsführungen durch Bauteile mit Anforderungen an den Feuerwiderstand. Der aktuelle Stand der Technik sieht an der Stelle der Leitungsdurchführung eine gewerkübergreifende Lösung zur Abschottung vor (siehe 4.8). Die Lösung verursacht einen hohen Zeit- und Kostenaufwand und bringt optische Nachteile mit sich. Dieses Forschungsprojekt zielt darauf ab Handlungsempfehlungen für Anwender und Prüfinstitute zu formulieren, wie Leitungsdurchführungen in Holz ausgeführt werden können ohne den Baustoff Holz an der Stelle der Leitungsdurchführung zu substituieren. Dabei sollen aus vorgenannten Gründen Methoden untersucht werden, die auch ohne eine Beplankung funktionsfähig bleiben, sodass diese auch in der Zukunft uneingeschränkt weiter angewendet werden können.

2. Ziel des Vorhabens

In diesem Vorhaben sollen die brandschutztechnischen Grundlagen für verschiedene Leitungsdurchführungen im Holzbau ermittelt werden. Dabei werden verschiedene Parameter der Durchführungen in Betracht gezogen. Zu nennen sind beispielsweise Leitungswerkstoff, Öffnungsmaße, Verschluss der Restöffnung sowie Befestigungsmittel und –tiefe. Es sollen Hand-

lungsempfehlungen für Baubeteiligte entwickelt werden, wie Leitungsdurchführungen im Holzbau brandschutztechnische ausführbar sind. Für Zulassungsbehörden werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, wie Leitungsdurchführungen im Holzbau geprüft bzw. bewertet werden können. Besonders kritische bzw. unkritische Details sollen aufgezeigt werden.

3. Ablauf des Projekts

Zunächst fand eine umfassende Literaturrecherche statt. Dabei wurden vor allem die Themen:

- Brandschutzregelungen in Deutschland, vor allem bezüglich Holzbau und Leitungsdurchführungen,
- Höhenbeschränkungen des Holzbaus in Deutschland und International,
- Aufbau und Brandverhalten von Holz,
- Stand der Wissenschaft zu Leitungsführungen im Holzbau (national und international),
- sowie zur Abschottung von Leitungsdurchführungen

betrachtet. Im Anschluss wurde erarbeitet, wie diese Ziele zu erreichen sind. Es wurde eine Vorversuchsreihe geplant und durchgeführt. Dabei konnten bereits viele Erkenntnisse erlangt werden. Mithilfe dieser Erkenntnisse wurden die Versuchsaufbauten für die Validierung der Ergebnisse in zwei Großbrandversuchen optimiert. Ein Versuchsaufbau wurde in einer Simulation nachgebildet, um durch die Abänderung von einzelnen Parametern die Versuchsergebnisse extrapolieren zu können. Alle Versuchsergebnisse wurden ausgewertet und interpretiert, um möglichst präzise Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Im Laufe des Projekts entstanden weitere Fragestellungen, die es zukünftig zu beantworten gilt.

4. Grundlagen

4.1 Brandschutzspezifische Regelungen in Deutschland

4.1.1 Musterbauordnung – MBO

Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Gebäude sind in den Bauordnungen der Länder geregelt. Aufgrund des in Deutschland herrschenden Föderalismus ergeben sich für die einzelnen Bundesländer teils unterschiedliche Anforderungen. Diese landesspezifischen Unterschiede ergeben sich meist auf Detailebene, die grundlegenden Anforderungen sind die gleichen. Aus diesem Grund wird in diesem Dokument stellvertretend Bezug auf die MBO genommen. Die MBO wird von der Bauministerkonferenz verabschiedet und dient als Grundlage zur Erstellung der LBO der einzelnen Bundesländer. Die aktuell gültige Fassung wurde 2002 verabschiedet und zuletzt im Jahr 2016 geändert. Die MBO selbst hat keinen gesetzlichen Charakter. In technischen Regeln können die Vorgaben der LBO präzisiert werden. Verweist die LBO auf diese Regeln, werden sie bindend (Technische Baubestimmungen).

4.1.2 Schutzziele nach MBO

Die MBO stellt in Bezug auf den Brandschutz folgende grundlegende Anforderungen an bauliche Anlagen:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass

- der Entstehung eines Brandes und
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und
- die Rettung von Menschen und Tieren sowie
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Generell kann entweder das von der MBO vorgegebene Brandschutzkonzept befolgt und somit ein Gebäude in Übereinstimmung mit den bauordnungsrechtlichen Vorgaben errichtet werden oder es muss ein alternatives Brandschutzkonzept erarbeitet werden, welches auf andere Weise die Schutzzielanforderungen erfüllt. Wird vom „Musterbrandschutzkonzept“ abgewichen, müssen Maßnahmen zur Kompensation der Abweichung unternommen werden. Diese müssen jeweils das gleiche Schutzziel wie die zu kompensierende Maßnahme verfolgen und nachweislich ein vergleichbares Sicherheitsniveau bereitstellen.

4.1.3 Gebäudeklassen

Jedes Gebäude wird in eine von fünf Gebäudeklassen eingeteilt. Von diesen Gebäudeklassen sind die Brandschutzanforderungen an Bauteile, Rettungswege und Abschlüsse in großem Maß abhängig. Die Einteilung in Gebäudeklassen findet gemäß MBO wie folgt statt:

Gebäudeklasse 1:

- a) freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m² und
- b) freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude

Gebäudeklasse 2:

Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m²,

Gebäudeklasse 3:

sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m,

Gebäudeklasse 4:

Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m²,

Gebäudeklasse 5:

sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude.

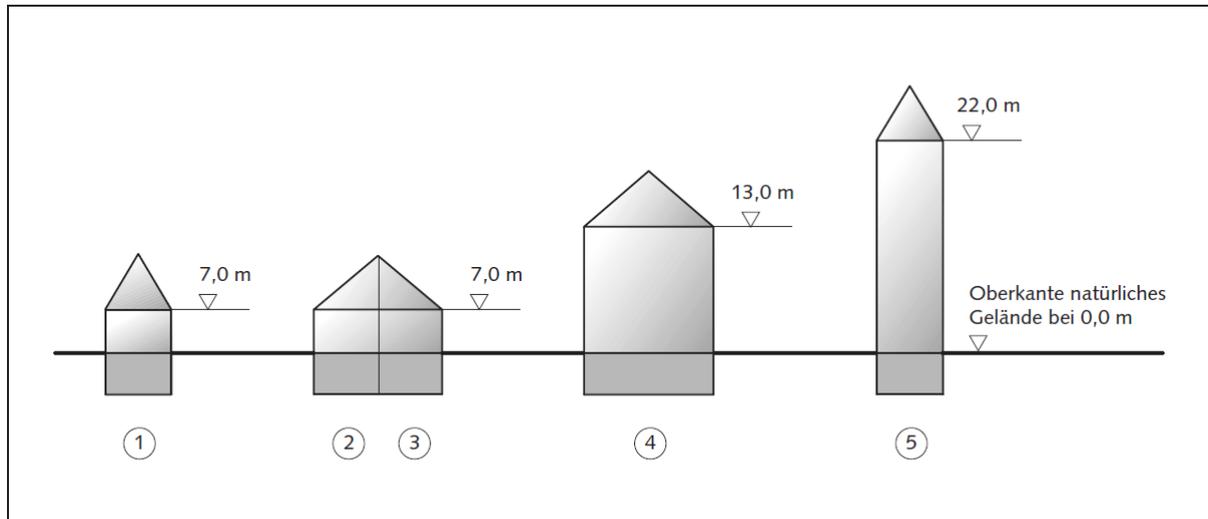


Abbildung 1: Darstellung der Gebäudeklassen [13]

Diese Einteilung in Gebäudeklassen (siehe Abbildung 1), welche nicht nur von der Höhe, sondern auch von der Größe und Anzahl der Nutzungseinheiten des Gebäudes abhängt, wurde mit der MBO im Jahr 2002 eingeführt. Zuvor erfolgte die Einordnung der Gebäude nach ihrer Höhe in Gebäude geringer Höhe, Gebäude mittlerer Höhe sowie Hochhäuser. Dabei gab es als Feuerwiderstandsanforderung an Bauteile die Einstufungen feuerhemmend und feuerbeständig. Seit dem Jahr 2002 ist zudem die Feuerwiderstandsanforderung hochfeuerhemmend eingeführt. Diese ermöglicht die konstruktive Holzverwendung in Gebäudeklasse 4, also für Gebäude mit bis zu fünf Geschossen (siehe [14]).

4.1.4 Feuerwiderstand und Brandverhalten

Die brandschutztechnischen Anforderungen an Bauteile und Baustoffe lassen sich mit den Begriffen Feuerwiderstand und Brandverhalten beschreiben. Dabei ist der Feuerwiderstand die Fähigkeit eines Bauteils bei einem genormten Brand für eine gewisse Dauer (30, 60 oder 90 Minuten) die Tragfähigkeit und / oder den Raumabschluss sowie die Wärmedämmung aufrechtzuerhalten. Das Brandverhalten gibt Aufschluss darüber, wie ein Baustoff brennt, das heißt wie leicht oder schwer entflammbar er ist und wie sich beim Brand Rauch und Wärme entwickeln. Klassifiziert wird das Brandverhalten mithilfe der DIN EN 13501-1 (Euroklassen) oder DIN 4102-1. Der Feuerwiderstand wird in DIN EN 13501-2 bzw. DIN 4102-2 klassifiziert. Zurzeit besteht in Deutschland eine Gleichberechtigung des nationalen (DIN) und des neueren

europäischen (DIN EN) Klassifizierungssystem. Auf Europäischer Ebene kann nur eine Klassifizierung nach DIN EN 13501 stattfinden. Das gleichzeitige Vorhandensein von Ü-Zeichen und CE-Zeichen auf Bauprodukten ist nach § 87 MBO nicht gestattet, daher kann ein Baustoff / Bauteil immer nur nach DIN EN 13501 oder DIN 4102 beurteilt sein.

Die MBO stellt in Abhängigkeit von Gebäudeklasse, Gebäudeart, Bauteil und Höhenlage der Geschosse Anforderungen an den Feuerwiderstand und das Brandverhalten der verwendeten Baustoffe. Diese Anforderungen werden durch die (Muster-) Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) den Klassifizierungen der Normen DIN 4102 oder DIN EN 13501 zugeordnet. Siehe dazu Tabelle 1 und Tabelle 3 bzw. Anhang 4 der MVV TB [15].

Tabelle 1: Baustoffklassen national / europäisch [15]

Bauaufsichtliche Anforderung	Mindestens geeignete Baustoffklassen nach DIN 4102-1:1998-05 und weitere Angaben	Mindestens geeignete Klassen nach DIN EN 13501-1:2010-01		
		Bauprodukte, ausgenommen lineare Rohrdämmstoffe und Bodenbeläge	lineare Rohrdämmstoffe	Bodenbeläge
nichtbrennbar ¹	A 2	A2-s1,d0	A2 _L -s1,d0	A2 _{fl} -s1
schwerentflammbar	B 1 und begrenzte Rauchentwicklung (l ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C-s3,d2	C _L -s3,d2	C _{fl} -s1
schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	B 1 und nicht brennend abfallend oder abtropfend sowie begrenzte Rauchentwicklung (l ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C-s3,d0	C _L -s3,d0	-
schwerentflammbar und geringe Rauchentwicklung	B 1 und geringe Rauchentwicklung (l ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C-s1,d2	C _L -s1,d2	C _{fl} -s1
schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend sowie geringe Rauchentwicklung	B 1 und nicht brennend abfallend oder abtropfend sowie geringe Rauchentwicklung (l ≤ 400 % x Min. bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C-s1,d0	C _L -s1,d0	-
normalentflammbar nicht brennend abfallend oder abtropfend	B 2	E	E _L	-
normalentflammbar	B 2 (auch brennend abfallend oder abtropfend)	E-d2	E _L -d2	E _{fl}
¹ ggf. zusätzlich Schmelzpunkt > 1000 °C	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000 °C nach DIN 4102-17:1900-12	-	-	-

Tabelle 2: Legende Baustoffklassen [15]

Herleitung des Kurzzeichens	Kriterium	Anwendungsbereich
s (Smoke)	Rauchentwicklung	Anforderungen an die Rauchentwicklung - s1: geringe Rauchentwicklung - s2, s3: begrenzte Rauchentwicklung
d (Droplets)	brennendes Abtropfen/Abfallen	Anforderungen an das brennende Abtropfen/Abfallen - d0: kein brennendes Abtropfen/Abfallen - d1, d2: brennendes Abtropfen/Abfallen
....fl (Floorings)		Brandverhaltensklasse für Bodenbeläge
....L (Linear Pipe Thermal Insulation Products)		Brandverhaltensklasse für Produkte zur Wärmedämmung von linearen Rohren

Tabelle 3: Feuerwiderstandsklassen national / europäisch [15]

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile mit Raumabschluss	
	DIN EN 13501-2:2010-02	DIN 4102-2:1977-09
feuerhemmend	REI 30	F 30 - B
feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	REI 30	F 30 - A
hochfeuerhemmend und in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen	REI 60	F 60 - AB
hochfeuerhemmend (tragende Teile brennbar, Dämmstoffe nichtbrennbar mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung)	REI 60-K ₂ 60	-
hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	REI 60	F 60 - A
feuerbeständig (tragende und aussteifende Teile nicht brennbar)	REI 90	F 90 - AB
feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	REI 90	F 90 - A
Brandwand (feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen)	REI 90-M	-
Wand anstelle einer Brandwand (hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen auch unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung standsicher)	REI 60-M	-

Das Brandverhalten der Baustoffe und die Feuerwiderstandsfähigkeit haben zwar einen gewissen Zusammenhang, werden aber getrennt betrachtet. Auf den ersten Blick könnte angenommen werden, dass Bauteile aus Baustoffen, die nichtbrennbar sind, in jedem Fall dem Feuer länger Widerstand leisten können als Bauteile aus brennbaren Baustoffen. Um eine ausreichend lange Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils zu generieren, ist es allerdings nicht immer notwendig dieses aus nichtbrennbaren Baustoffen herzustellen. Mit entsprechender Dimensionierung von Bauteilen unter Berücksichtigung nicht nur des Verhaltens bei der Entzündung, sondern auch ihres Abbrandverhaltens kann auch eine ausreichend lange Feuerwiderstandsdauer erreicht werden. Die Bauteile werden in diesem Fall zwar am Brandgeschehen teilnehmen, was an anderer Stelle zu berücksichtigen ist (Brandlast), allerdings hat dies keinen Einfluss auf die Kriterien des Feuerwiderstands. Die MBO stellt aber in § 26 eine Verbindung zwischen Feuerwiderstandsanforderung und dem Brandverhalten der in den Bauteilen enthaltenen Baustoffe her. So müssen feuerbeständige Bauteile in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und hochfeuerhemmende Bauteile, die aus brennbaren Baustoffen bestehen eine brandschutztechnische wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, sowie Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen. Die reine Klassifizierung der Bauteile in Bezug auf ihren Feuerwiderstand nach DIN EN 13501 oder DIN 4102 ist demnach nicht direkt mit der geforderten Feuerwiderstandsfähigkeit nach der MBO gleichzusetzen. Die MBO stellt zusätzlich Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe in den Bauteilen.

4.1.5 Führung von Leitungen durch Bauteile

In § 40 Abs. 1 der MBO wird festgelegt, dass Leitungen nur durch Bauteile mit Feuerwiderstandsanforderung hindurchgeführt werden dürfen, wenn eine Brandausbreitung ausreichend

lang nicht zu befürchten ist oder entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Diese Festlegungen gelten nicht für

- Einzelne Nutzungseinheiten < 400 m² in nicht mehr als zwei Geschossen,
- Wohnungen
- Gebäude, die der Gebäudeklasse 1 oder 2 zugeordnet werden können.

Details darüber, wann diese Voraussetzung (Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten) als erfüllt gilt, werden in der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie geregelt.

4.1.6 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHolzR

Die M-HFHolzR gilt für Gebäude deren tragende, aussteifende oder raumabschließende Bauteile aus Holz sind und diese hochfeuerhemmend sein müssen. „Aus Holz“ meint dabei eine Holzbauweise mit einem gewissen Grad der Vorfertigung, wie Holztafel-, Holzrahmen- und Fachwerkbauweise, nicht jedoch Massivbauweisen. Diese wurden in dem zugrunde liegenden Forschungsprojekt nicht behandelt [16]. Die Anforderung „hochfeuerhemmend“ wird in der MBO an tragende und aussteifende Wände und Stützen von Gebäuden der Gebäudeklasse vier gestellt. Durch die Bauteileigenschaft „hochfeuerhemmend“ wird in § 26 Abs. 2 Satz 3 Nr. 2 MBO gefordert, dass Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen, eine allseitige Brandschutzbekleidung nach § 26 Abs. 2 Satz 2 Nr. 3 MBO haben müssen und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen (Schmelzpunkt ≥ 1000 °C) bestehen müssen. Die Brandschutzbekleidung muss eine Entzündung der Bauteile aus Holz mindestens 60 Minuten verhindern. Sie muss als K₂60 nach DIN EN 13501-2 klassifiziert sein und ist mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindung auszuführen. Die hochfeuerhemmenden Bauteile mit einer Brandschutzbekleidung müssen als REI 60 bzw. EI 60 nach DIN 13501-2 klassifiziert sein.

Öffnungen für Türen, Fenster und sonstige Einbauten

Sollen in hochfeuerhemmenden Bauteilen Öffnungen für Einbauten hergestellt werden, so ist die Brandschutzbekleidung in den Öffnungsleibungen mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindung auszuführen (Abbildung 2, Abbildung 3). Sind an den Verschluss einer Öffnung brandschutztechnische Anforderungen gestellt, muss ein Verwendbarkeits-/ Anwendbarkeitsnachweis vorliegen, der den Einbau der Abschlüsse (z.B. Feuerschutzabschlüsse, Rohr- oder Kabelabschottungssysteme, Brandschutzklappen) in hochfeuerhemmende Bauteile regelt.

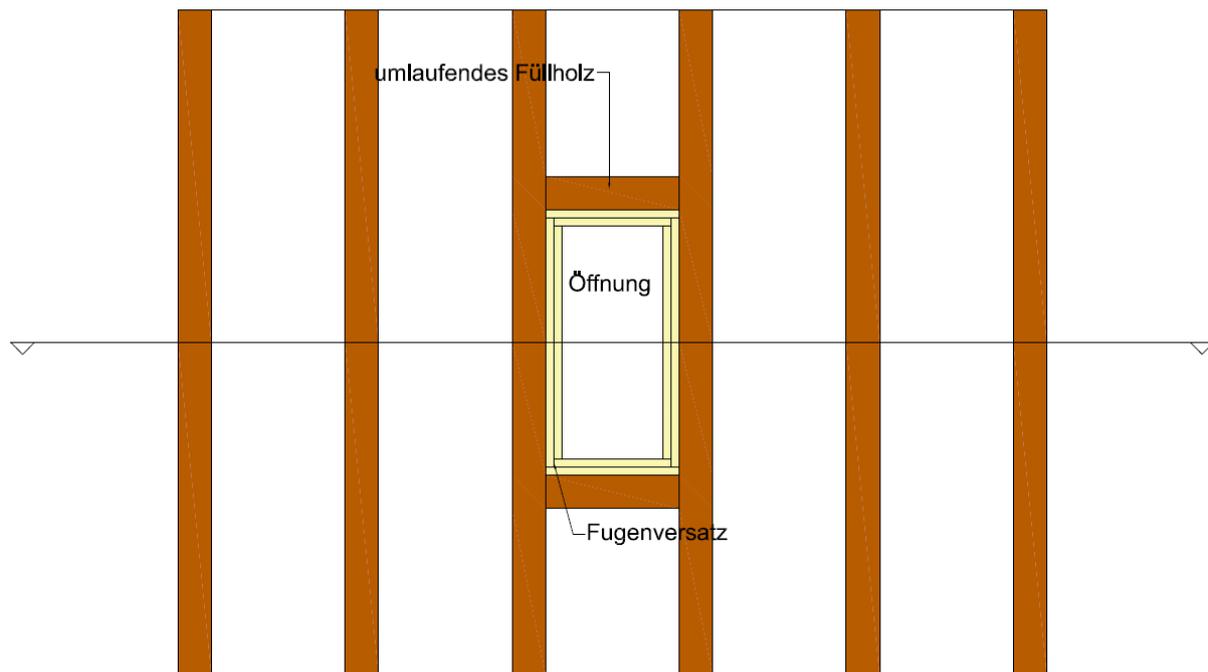


Abbildung 2: Bauteilöffnung mit Brandschutzbekleidung M-HFHolzR

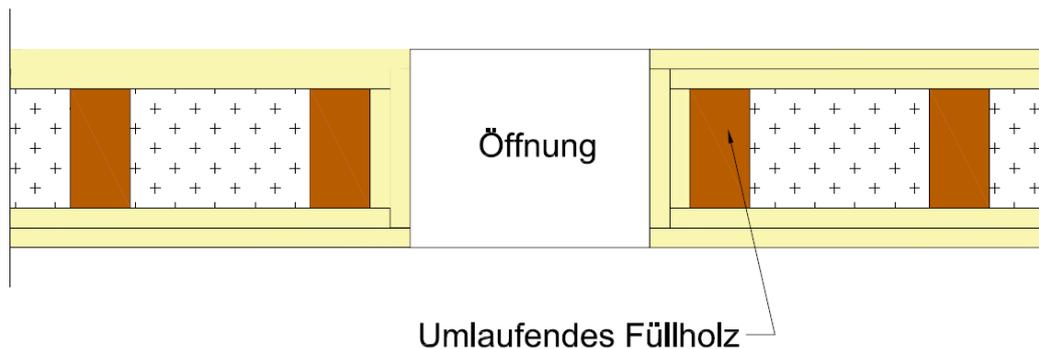


Abbildung 3: Bauteilöffnung mit Brandschutzbekleidung nach M-HFHolzR_Schnitt

Installationen

Installationen, wie Leitungs- oder Lüftungsanlagen dürfen nicht in, sondern nur vor Wänden oder unterhalb von Decken sowie in Schächten und Kanälen geführt werden. Wird zur Durchführung von Schächten oder Kanälen eine Öffnung in einer hochfeuerhemmenden Wand oder Decke hergestellt, gelten dieselben Regelungen wie bei Öffnungen für Türen, Fenster und sonstige Einbauten. Abweichend von diesen Vorgaben dürfen einzelne elektrische Leitungen oder nichtbrennbare Hüllrohre mit bis zu drei Leitungen innerhalb von Wänden und Decken geführt werden, wenn die Leitungen zur Versorgung des angrenzenden Raumes innerhalb derselben Nutzungseinheit dienen. Weitere besondere Regelungen gibt es für Hohlwanddosen. Diese abweichenden Regelungen gelten generell nicht für Wände, die anstelle von Brandwänden zulässig sind sowie in Treppenträumen lediglich für die Leitungen, welche der Versorgung des Treppenraumes selbst dienen.

4.1.7 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie) – MLAR

Die Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR) konkretisiert die Anforderungen zur Durchführung von Leitungen durch Bauteile, die in der MBO (§ 40 Abs. 1) gestellt werden, sodass bei Befolgen der Regelungen (4.1 - 4.3 der MLAR) das angestrebte Sicherheitsniveau erreicht wird. Nach MLAR müssen Leitungen entweder durch Abschottungen geführt werden, welche die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen wie das durchdrungene Bauteil oder die Leitungen müssen in Installationskanälen oder –schächten geführt werden. Die Kanäle oder Schächte müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen hergestellt sein und einschließlich der Abschlüsse von Öffnungen der Feuerwiderstandsfähigkeit des durchdrungenen Bauteils entsprechen. Zwischen den einzelnen Abschottungen sind die in den Verwendbarkeitsnachweisen angegebenen Mindestabstände einzuhalten. Sind dort keine vermerkt, gilt ein Mindestabstand von 50 mm.

Erleichterungen bei feuerhemmenden Wänden

Für die Durchführung von Leitungen durch feuerhemmende Wände werden Erleichterungen gestattet. Elektrische Leitungen und Rohrleitungen (auch mit einer brennbaren Rohrbeschichtung von bis zu 2 mm Dicke) dürfen durch feuerhemmende Wände geführt werden, wenn der verbleibende Raum, der nicht größer als 50 mm sein darf, zwischen Leitung und dem Bauteil aus nichtbrennbaren Baustoffen mit nichtbrennbaren Baustoffen oder im Brandfall aufschäumenden Stoffen ausgefüllt wird. Mineralfasern, die dazu verwendet werden, müssen eine Schmelztemperatur > 1000 °C ausweisen.

Erleichterungen für einzelne Leitungen ohne Dämmung

Für die Durchführung einzelner elektrischer Leitungen und Rohrleitungen in gemeinsamen Durchbrüchen werden ebenfalls Erleichterungen zugelassen. Diese gelten nur für Rohre bis zu einem bestimmten Durchmesser und sind abhängig von der Einhaltung eines gewissen Abstands zwischen den einzelnen Leitungen. Außerdem muss die Wand oder Decke durch die die Leitung geführt wird, abhängig von ihrer Feuerwiderstandsanforderung, eine erforderliche Mindestdicke aufweisen. Der verbleibende Raum ist mit Beton oder Zementmörtel auszufüllen.

Erfolgt die Durchführung der Leitungen in jeweils eigenen Durchbrüchen, so muss der verbleibende Raum mit nichtbrennbaren Baustoffen, mit Baustoffen aus Mineralfasern (Schmelztemperatur > 1000 °C) oder im Brandfall aufschäumenden (intumeszierenden) Baustoffen verschlossen werden. Auch hier darf der Abstand zwischen Leitung und Bauteil, bei Verwendung von Mineralfasern, höchstens 50 mm betragen, bei der Verwendung von aufschäumenden Baustoffen weniger als 15 mm.

Erleichterungen für einzelne Rohrleitungen

Auch einzelne Rohrleitungen mit Dämmung dürfen unter Einhaltung einiger Bedingungen durch Wände und Decken geführt werden. Dazu muss die Wand oder Decke eine von ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit abhängige Dicke aufweisen und entsprechend verschlossen sein. Die Dämmung muss im Bereich der Durchführung aus nichtbrennbaren Baustoffen mit einer Schmelztemperatur $> 1000\text{ °C}$ bestehen. Eine Umhüllung aus brennbaren Baustoffen $< 0,5\text{ mm}$ Dicke ist gestattet. Der Abstand zu anderen Leitungen muss mindestens 50 mm betragen. Außerhalb der Durchführung ist eine Umhüllung aus Stahlblech oder beidseitig der Durchführung eine Dämmung aus nichtbrennbaren Baustoffen, in einer Länge von je 500 mm anzubringen.

Weitere Erleichterungen bestehen für die Durchführung einzelner Rohrleitungen mit oder ohne Dämmung durch Decken, wenn sie in diesen durchgehend entweder in Schlitzen massiver Wände oder in Wandecken massiver Wände und dabei vollständig mit mineralischen Baustoffen umschlossen verlegt werden.

4.1.8 Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen M - LüAR

Die Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie (M-LüAR) betrifft den Brandschutz von Lüftungsanlagen, an die Anforderungen nach §41 MBO gestellt werden. Grundsätzlich müssen Lüftungsleitungen und deren Bekleidungen und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Ist kein Beitrag zur Brandentstehung oder Brandweiterleitung zu befürchten dürfen jedoch brennbare Baustoffe verwendet werden. Die Verwendung von schwerentflammenden Baustoffen für Lüftungsleitungen ist gestattet, wenn die Leitungen nicht durch Bauteile geführt werden, deren Anforderungen an den Feuerwiderstand aufgrund des Raumabschlusses bestehen. Sie dürfen jedoch durch diese Bauteile hindurchgeführt werden, wenn an der Durchtrittsstelle Brandschutzklappen vorhanden sind. Die Brandschutzklappen müssen mindestens feuerhemmend sein. Höhere Anforderungen an den Feuerwiderstand können gestellt werden. Die Verwendung schwerentflammender Baustoffe ist dabei in notwendigen Treppenträumen, notwendigen Fluren sowie in Räumen zwischen notwendigen Treppenträumen und den Ausgängen ins Freie nicht gestattet, außer diese sind feuerhemmend. Oberhalb von Unterdecken, die tragende Bauteile schützen, dürfen brennbare Baustoffe nicht verwendet werden. Weiterhin darf die innere Schale von Lüftungsleitungen aus schwerentflammenden Baustoffen bestehen, wenn die Leitungen feuerhemmend sind oder in mindestens feuerhemmenden Schächten verlaufen. Auch hier können Teils höhere Anforderungen gestellt werden. Brennbare Baustoffe dürfen generell keine Anwendung finden, wenn Luft mit Temperaturen über 85 °C gefördert wird oder sich in den Leitungen brennbare Stoffe in besonderen Maße ablagern können. Die beschriebenen Anforderungen gelten für Beschichtungen, Bekleidungen und Dämmschichten

sinngemäß. Für Dampfsperren, Folien und Beschichtungen mit Dicken von 0,5 mm oder weniger werden Erleichterungen gestattet. Generell gelten die Anforderungen des §41 Abs. 2 MBO als erfüllt, wenn die Abschnitte 5 bis 8 der M-LüAR eingehalten werden. Dabei gilt, dass bei der Durchdringung von Bauteilen mit brandschutztechnischen Anforderungen die Feuerwiderstandsfähigkeit der Brandschutzklappen der Bauteile entsprechen muss. In notwendigen Fluren sind Lüftungsleitungen aus Stahlblech anstelle von feuerhemmenden Lüftungsleitungen zulässig, wenn sie keine Öffnungen haben und mit Abhängern aus Stahl befestigt sind. Weiterhin stellt die M-LüAR Anforderungen an die Installation von Lüftungsleitungen, an die Einrichtungen zur Luftaufbereitung und Lüftungszentralen, an Lüftungsanlagen für besondere Nutzungen und an die Abführung von Küchenluft und Abgasen aus Feuerstätten. Auf diese Punkte wird nicht weiter eingegangen, da kein direkter Zusammenhang zum hier behandelten Thema gesehen wird. Generell ist die M-LüAR nicht direkt Bestandteil der Untersuchungen, es können jedoch teilweise parallelen bzw. Berührungspunkte mit der MLAR erkannt werden, weshalb die M-LüAR an dieser Stelle vor allem zur Abgrenzung des Themas erwähnt wird.

4.2 Mehrgeschossiger Holzbau – International

Abbildung 4 zeigt den Stand der Höhenbegrenzungen für den mehrgeschossigen Holzbau im Jahr 2009 in verschiedenen Ländern. Mittlerweile (Stand 2018) haben sich die Vorgaben in der Schweiz mit der Novellierung der Brandschutzvorschriften verändert, die Grafik wurde dementsprechend angepasst. Es können Wohn-, Büro- und Schulhäuser, Industrie- und Gewerbebauten, Beherbergungsbetriebe oder Verkaufsgeschäfte in Holzbauweise bis zu einer Höhe von 30m realisiert werden. Auch bei Hochhäusern ist die Verwendung von tragenden und trennenden Bauteilen aus Holz unter bestimmten Rahmenbedingungen gestattet [17].

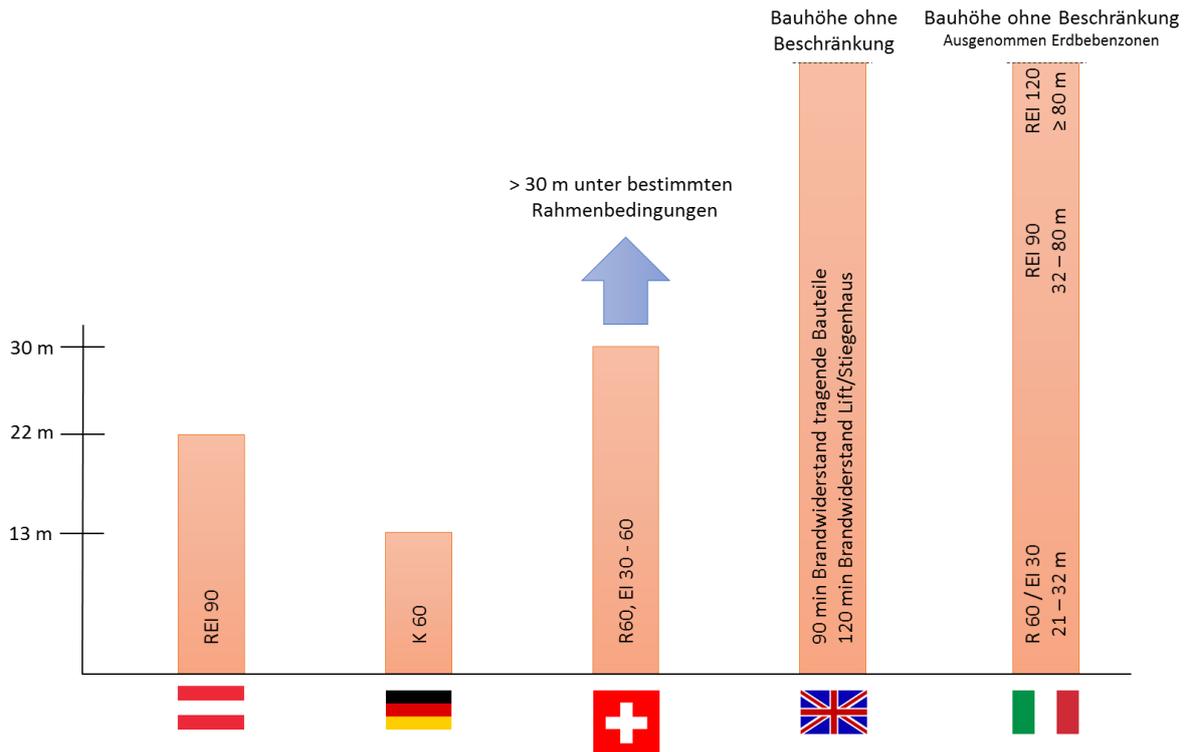


Abbildung 4: Höhenvorgaben mehrgeschossiger Holzbau in verschiedenen Ländern, in Anlehnung an [18]

In Großbritannien, Italien und auch Australien bestehen keine Anforderungen hinsichtlich der Nichtbrennbarkeit des Tragwerks solange die erforderliche Feuerwiderstandsdauer gewährleistet ist [12].

Es ist zu erkennen, dass die Regelungen in Deutschland den Holzbau deutlich mehr einschränken als in anderen, auch angrenzenden europäischen Ländern. Von den Nachbarländern wird gezeigt, dass auch bei Verwendung des brennbaren Baustoffs Holz in Gebäuden größerer Höhe ein akzeptables Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Weltweit ist es sogar so, dass bereits ein Wettlauf um die höchsten holzbasierten Gebäude begonnen hat. Abbildung 5 zeigt eine Reihe großer, zum Teil bereits abgeschlossener, Holzprojekte mit den zugehörigen Gebäudehöhen.

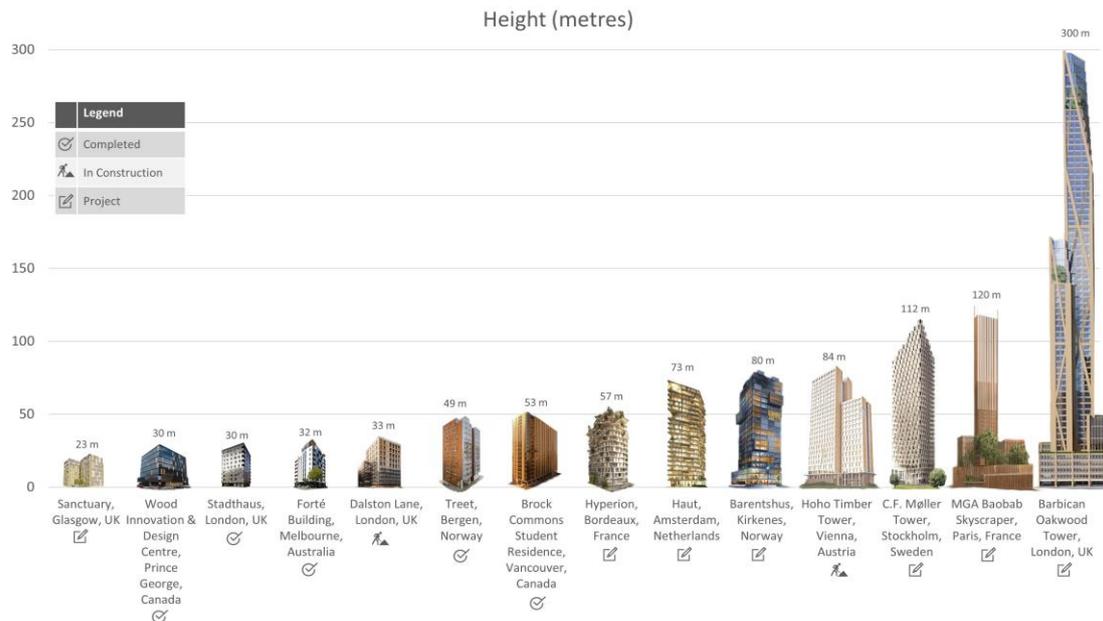


Abbildung 5: Holzbauprojekte großer Höhe [19]

4.3 Werkstoff Holz: Materialeigenschaften und Brandverhalten

4.3.1 Holz als Roh- und Baustoff

Holz ist ein altbekannter Baustoff, aber auch Energieträger. Dies lässt direkt auf die Brennbarkeit von Holz schließen. Auf das Brandverhalten von Holz wird in Punkt 4.3.4 näher eingegangen. Heute verbindet der Baustoff Holz traditionelle Werte mit aktuellen Anforderungen wie Klimaschutz und Nachhaltigkeit. Holz benötigt zum Wachsen CO_2 , welches dabei im Holz „eingelagert“ wird. Dadurch wird in Bauwerken aus Holz über lange Zeit umweltschädliches CO_2 gebunden und somit unschädlich gemacht [20]. Holz ist ein natürlich gewachsener Rohstoff, dessen Wachstum von vielen Faktoren, wie Standort, Klima und weiteren Umwelteinflüssen abhängt. Somit ergibt sich eine Inhomogenität des Materials, welche Einfluss auf die Eignung des Rohstoffs als Baustoff hat. Andere heute verwendete Baustoffe wie Beton oder Stahl lassen sich gezielt einstellen und sind homogener.

Holz kann durch seine hygroskopischen Eigenschaften Wasser in Form von Wasserdampf aus der Umgebung aufnehmen oder abgeben [21]. Die Feuchtigkeit des Holzes passt sich somit selbstregulierend an die Umgebungsfeuchte an. Für Nadelhölzer liegt die sich einstellende Ausgleichsfeuchte in geschlossenen, beheizten Innenräumen zwischen 5% und 15%, wobei meist eine Feuchte von 12% nicht überschritten wird [22]. Der Anteil des in den Holzzellen gespeicherten Wassers beeinflusst beispielsweise die technologischen Eigenschaften Festigkeit und Elastizitätsmodul. Auch schwindet und quillt das Holz in Abhängigkeit der prozentualen Holzfeuchte. Weiterhin beeinflusst der Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit des

Baustoffes. [23] Die Festigkeit von Holz ist stark Abhängig von der Belastungsrichtung in Bezug zur Faserrichtung des Holzes. Diese Eigenschaft wird als Anisotropie bezeichnet [21]. Außerdem ist der Werkstoff Holz porös. Mit der Porosität wird das Verhältnis zwischen Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen des Stoffes beschrieben. Die Dichte eines Materials wird maßgeblich durch die Porosität beeinflusst [23]. Holz kann von Natur aus Widerstand gegen Schädlinge, wie Pilze und Insekten leisten. Diese Eigenschaft nennt man natürliche Dauerhaftigkeit. Sie lässt sich durch Verwendung von Holzschutzmitteln künstlich erhöhen [23]. Holz kann sich also an die herrschenden Umgebungsbedingungen anpassen. Teilweise ändern sich dabei die Eigenschaften des Holzes zum Positiven oder zum Negativen je nach angestrebtem Verwendungszweck.

4.3.2 Aufbau des Werkstoffs Holz

Holz besteht zu 50% aus Kohlenstoff (C) zu 43% aus Sauerstoff (O) ca. 6% aus Wasserstoff (H) und aus bis zu einem 1% aus Stickstoff (N). Der Rest entfällt auf Spurenelemente (Mineralien). Aus chemischer Sicht betrachtet, besteht Holz (je nach Holzart mit schwankenden Anteilen) zu 40-60% aus Zellulose, 20% Hemizellulose und 20-30% Lignin [24].

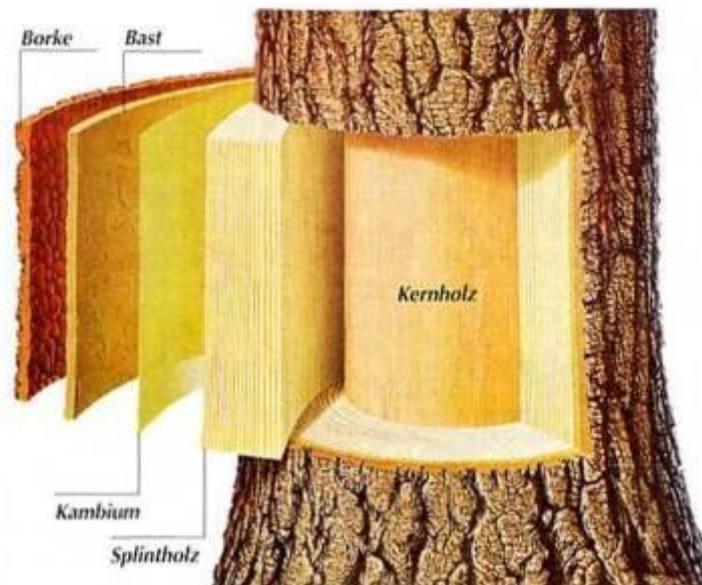


Abbildung 6: Aufbau eines Baumstamms [24]

Die Borke, welche den äußeren Teil der Rinde beschreibt, dient zum Schutz vor Umwelteinflüssen, wie z.B. unterschiedlichen Temperaturen, Sonneneinstrahlung oder Schädlingsbefall. Der innere Teil der Rinde wird Bast genannt. Er versorgt den Baum mit Nährstoffen. Nachdem der Bast abstirbt wird er zunächst zu Kork und anschließend zur Borke. Im Kambium findet das eigentliche Wachstum des Baumes statt. Es handelt sich dabei um eine

dünne Zellschicht. Sie ist verantwortlich für die Bildung von Borke und Holz. Pflanzenhormone, die im Frühjahr in den Blattknospen gebildet werden, steuern diesen Prozess. Im Splintholz findet der Transport des Wassers bis hin zur Baumkrone statt. Werden neue Splintholzringe gebildet, werden die älteren zu Kernholz und verlieren somit diese Funktion. Als Kernholz wird es dann zum Traggerüst des Baumes, welches aus hohlen, nadelartigen Zellulosefasern besteht, die durch Lignin zusammengehalten werden [25] [24]. Die Eigenschaften von Holz können sich also je nach Holzart und der damit verbundenen unterschiedlichen Zusammensetzung verändern. Selbst innerhalb eines einzelnen Baumes variieren die Holzeigenschaften, je nachdem, aus welchem Teil des Stammes sie entnommen werden.

4.3.3 Bauphysikalische Eigenschaften

Holz ist ein poröser, leichter Baustoff mit bemerkenswerten Dämmeigenschaften. Wichtige Eigenschaften sind relative Feuchte, Rohdichte und Festigkeit. Holz ist chemisch widerstandsfähig und ist für Korrosion durch Luftschadstoffe weniger anfällig als mineralische oder metallische Baustoffe. Auch ist Holz biologisch dauerhaft. Bei richtiger Verwendung wird trockenes Konstruktionsholz von Pilzen und Schädlingen kaum befallen [20].

Die Verwendung von Holz in Innenräumen hat in Bezug auf den Wohnkomfort eine große Bedeutung. Der Holzbau als auch die Ausstattung aus Holz weisen unter den Gesichtspunkten Wärmestrahlung, Ästhetik und Wohnklima Vorteile auf. Diese werden durch Merkmale wie Behaglichkeit, Haptik, Oberflächenbeschaffenheit, Antistatik, Geruch und Feuchteausgleichswirkung bestimmt. Holz wird bei Berührung als warmer und weicher Werkstoff empfunden. Dies ist durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit, seine Dichte, Porosität und Elastizität zu begründen. Zudem weisen Holzoberflächen ein antibakterielles Verhalten auf, was es von vielen anderen Werkstoffen abhebt. Weiterhin beeinflusst Holz das Raumklima positiv. Insgesamt bietet Holz bei guter Optik und guten bauphysikalischen Eigenschaften fast unbegrenzte Gestaltungsmöglichkeiten für Konstruktion und Ausstattung von Innenräumen [20]. Insgesamt hat der Werkstoff Holz sehr viele Eigenschaften, die für eine sichtbare / zugängliche Verwendung in Innenräumen sprechen. Dagegen sprechen allerdings (noch) brandschutztechnische und teilweise auch schallschutztechnische Gründe.

4.3.4 Brandverhalten von Holz

In diesem Kapitel wird die Auswirkung einer Temperaturbeanspruchung auf den Werkstoff Holz betrachtet. Anzumerken ist, dass die aus verschiedenen Quellen gewonnenen Daten teils sehr unterschiedliche Aussagen über das Brandverhalten treffen, da die Werkstoffeigenschaften stark streuen (vgl. 4.3.1).

Generell ist erforscht, wie Holz brennt. Somit stellen Holzkonstruktionen eine berechenbare Größe im vorbeugenden baulichen Brandschutz dar. Dies ist als Vorteil im Vergleich zu vielen anderen Baustoffen zu sehen [26].

Wird Holz über Raumtemperatur erwärmt, kommt es zunächst zu einer *Trocknung*, da das in den Zellen gebundene Wasser zu entweichen beginnt. Die verdampfende Holzfeuchtigkeit hat einen kühlenden Effekt, der der Erwärmung entgegenwirkt, da ein Teil der Wärmeenergie benötigt wird um das Wasser zu verdampfen. Dieser Kühleffekt ist bei Temperaturen in der Nähe des Siedepunktes von Wasser am größten [27].

Bei Temperaturen unter 95 °C kommt es nicht zu einer Holzzersetzung. Oberhalb erfolgt die Zersetzung der Holzbestandteile zunächst sehr langsam und ist zudem in großem Maße vom Zustand des Holzes und den Umgebungsbedingungen abhängig. Nach [27] sind bei Temperaturen von 95 °C bereits Verkohlungserscheinungen möglich. Unter Extrapolation der Kurve aus Abbildung 7 ergibt sich näherungsweise eine Mindestentzündungstemperatur von etwa 105 °C. Eine Entzündung bei solchen Temperaturen setzt allerdings eine Dauereinwirkung hoher Temperaturen sowie Effekte der Wärmestauung voraus, wodurch punktuell höhere Temperaturen entstehen, die wiederum exotherme Reaktionen ermöglichen. Auf diese Weise kommt es beispielsweise auch in Saunen immer wieder zu Bränden [27].

Die pyrolytische Zersetzung beginnt ab einer Temperatur von näherungsweise 150 °C mit dem Abbau von Lignin und Hemizellulose [28]. Es entstehen Gase (u. a. Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe), Öle und Teere. Die oberste Schicht des Holzes wird durch die Pyrolysereaktion zu Holzkohle [29]. Zellulose hingegen zeigt bei dieser Temperatureinwirkung noch keine Reaktion [28]. Wird die Temperatur darüber hinaus gesteigert, verliert die Zellulose zunehmend ihre Stabilität [28].

Die Verbrennung ist die letzte Phase der thermischen Holzzersetzung und stellt eine unter Flammenbildung verlaufende Oxidation von Stoffen dar. Die in den Phasen der Trocknung und Pyrolyse entstandenen Gase verbrennen mithilfe des Luftsauerstoffs zu Kohlendioxid und Wasser. Auch die Holzkohle verbrennt mit der Zeit vollständig und es bleibt Asche als einziger fester Verbrennungsrückstand zurück [29].

In Abbildung 7 ist die Abhängigkeit der Zeit bis zur Entzündung von der Temperatur dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei Temperaturen von etwa 300 °C bereits nach vier Minuten mit einer Entzündung des Holzes zu rechnen ist. Bei einer Temperatur von 200 °C hingegen dauert es bereits 23 Minuten ehe eine Entzündung eintritt. Durch Extrapolation lässt sich die Temperatur abschätzen, der sich die Kurve asymptotisch annähert, wodurch sich etwa eine Temperatur von 105 °C ergibt. Eine Entzündung bei solchen Temperaturen setzt allerdings optimale Bedingungen voraus. Da diese unter üblichen Verhältnissen selten bis nie gegeben sind, wird in

der Praxis oftmals angenommen, dass erst ab Temperaturen oberhalb von 200 °C mit exothermen Reaktionen zu rechnen ist. Die Zersetzung verläuft im Temperaturbereich zwischen 200 und 275 °C deutlich schneller und es kommt zusätzlich zur Bildung von Gasen und Dämpfen [27].

Physikalisch gesehen lassen sich bei der thermischen Zersetzung von Holz drei Zustandspunkte bestimmen. Der Flammpunkt liegt etwa zwischen 225 und 260 °C und beschreibt den Moment, bei dem die entstehenden Zersetzungsgase erstmals aufflammen. Als Brennpunkt (260 bis 290 °C) wird jener Zeitpunkt bezeichnet, ab dem eine bleibende Flamme auftritt. Die Zersetzungsreaktion des Holzes wird als Folge zu einer exothermen Reaktion, wodurch die Temperatur weiter steigt bis der Zündpunkt erreicht wird. Dieser tritt üblicherweise in einem Bereich zwischen 330 und 470 °C auf und stellt den Zeitpunkt dar, bei dem sich die entstehenden Gase in der Luft selbst entzünden [27].

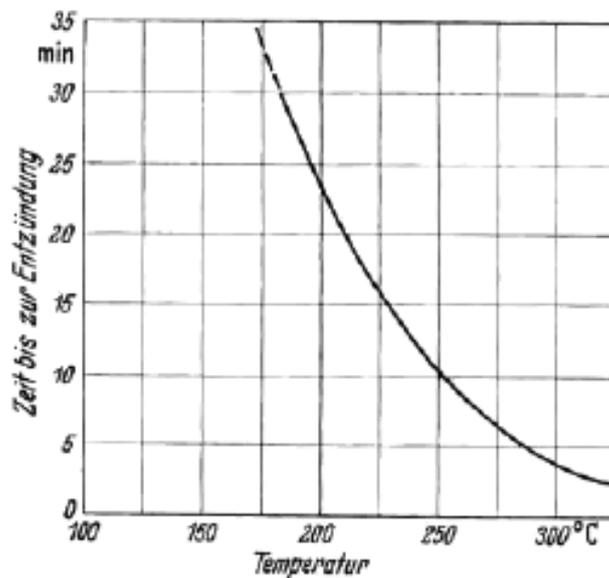


Abbildung 7: Abhängigkeit der Zeit bis zur Entzündung von der Temperatur [27]

Mit dem Erreichen von 300 °C beginnt die Verkohlung des Holzes [28] [30]. Dabei werden bis zu einer Temperatur von 380 °C Destillaten überwiegend Essigsäure und Methanol, in großen Mengen gebildet [28]. Dabei treten die flüssigen Komponenten aus und schützen dadurch die Holzoberfläche vor der Wärmeeinwirkung [28]. Vermischen sich die aus dem Holz austretenden flüchtigen Bestandteile mit dem freien und ungebundenen Sauerstoff können diese sich beim Kontakt mit einer Zündquelle entzünden [28].

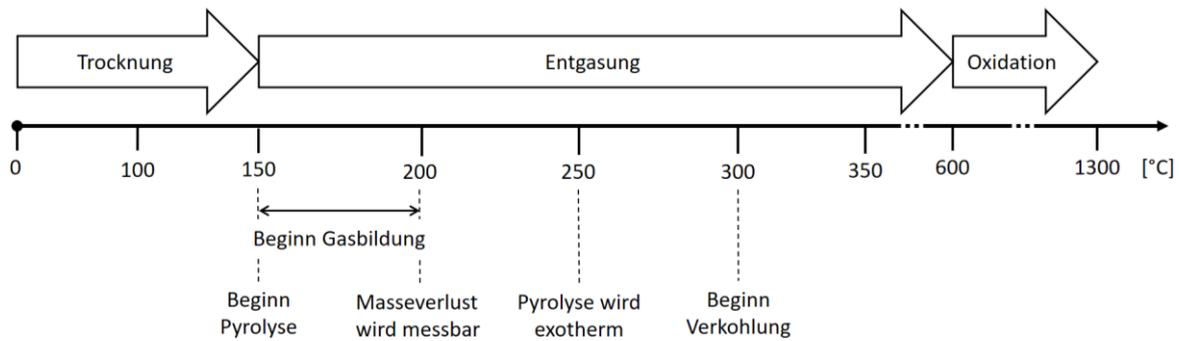


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Brandverlaufes mit Werten aus [28] [31]

Um den Abbrand von Holz zu bestimmen wird häufig Tabelle 3.1 aus DIN EN 1995-1-2 (siehe Tabelle 4) verwendet. Diese gibt Abbrandraten für verschiedene Holzarten und Holzwerkstoffe vor. Die vorgegebenen Werte gelten für eine charakteristische Rohdichte von 450 kg/m³ und eine Werkstoffdicke von 20 mm.

Tabelle 4: Abbrandraten β_0 und β_n für Bauholz, Furnierschichtholz, Holzbekleidungen und Holzwerkstoffe nach DIN 1995-1-2

Material		β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a)	Nadelholz und Buche Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Vollholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b)	Laubholz Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,5	0,7 0,55
c)	Furnierschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d)	Platten Holzbekleidungen Sperrholz Holzwerkstoffplatten außer Sperrholz	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	- - -
β_0	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung		
β_n	Bemessungswert der ideellen Abbrandrate, einschließlich der Auswirkungen von Eckausrundungen und Rissen		
a	Die Werte gelten für eine charakteristische Rohdichte von 450 kg/m ³ und eine Werkstoffdicke von 20mm, für andere Werkstoffdicken und Rohdichten, siehe 3.4.2 (9)		

Für abweichende Rohdichten und Werkstoffdicken, die kleiner als 20 mm sind, gibt DIN EN 1995-1-2 eine Alternative zur Bestimmung der Abbrandrate vor (Gleichungen 1 bis 3). Es ist anzumerken, dass es sich bei den Abbrandraten nach DIN EN 1995-1-2 (Eurocode 5) um

Bemessungswerte handelt. Demnach sind diese im Vergleich zu den in der Praxis zu erwartenden Werten in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegend.

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (1)$$

Berechnet mit

$$k_\rho = \sqrt{450/\rho_k} \quad (2)$$

$$k_h = \sqrt{20/h_\rho} \quad (3)$$

dabei ist

ρ_k die charakteristische Rohdichte in kg/m^3 ,

h_ρ die Werkstoffdicke, in Millimeter

ANMERKUNG Für Holzwerkstoffplatten werden charakteristische Rohdichten in DIN EN 12369 angegeben [32].

Rechenbeispiel: Nadelholz ($\beta_0 = 0,65$ mm/min, Tabellenwert)

- | | |
|---|---|
| 1) $\rho_1 = 450 \text{ kg/m}^3$, $h_\rho = 10 \text{ mm}$ | → $\beta_{0,\rho,t} = 0,919 \text{ mm/min}$ |
| 2) $\rho_2 = 300 \text{ kg/m}^3$, $h_\rho = 20 \text{ mm}$ | → $\beta_{0,\rho,t} = 0,796 \text{ mm/min}$ |
| 3) $\rho_3 = 600 \text{ kg/m}^3$, $h_\rho = 20 \text{ mm}$ | → $\beta_{0,\rho,t} = 0,563 \text{ mm/min}$ |

Die DIN EN 1995-1-2 legt also zur Berechnung der Abbrandrate die Rohdichte des jeweiligen Holzes zugrunde. Diese Vorgehensweise ist jedoch mit Bedacht anzuwenden. Mehr dazu im folgenden Abschnitt (vor allem: *Rohdichte und Werkstoffdicke*).

Einflussfaktoren auf das Abbrandverhalten von Holz

Brandbelastung

Bei Versuchsbränden wird in der Regel die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) als Brandbelastung auf den Probekörper beaufschlagt. Eine Abweichung von der ETK und somit eine veränderte Temperaturbeanspruchung hat entscheidenden Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit von Holz. Eine Temperaturbelastung, die über der ETK liegt, führt zu einer erhöhten Abbrandrate, ein niedrigerer Temperaturverlauf zu einer reduzierten Abbrandrate [28].

Holzfeuchte

Die Holzfeuchte u [%] stellt einen weiteren Einflussfaktor auf die Abbrandgeschwindigkeit dar. Mit steigender Holzfeuchte nimmt die Abbrandgeschwindigkeit ab. Einen großen Einfluss haben Holzfeuchten von $u = 50 \%$ bis $u = 100\%$. In diesem Bereich kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Abbrandgeschwindigkeit. Im baupraktisch relevanten Bereich von etwa

9 – 14 % hat die Holzfeuchte einen geringen Einfluss auf das Brandverhalten des Holzes, weshalb sie im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren vernachlässigt werden kann [33].

Rohdichte und Werkstoffdicke

Die Untersuchungen aus [34] haben gezeigt, dass sich Festigkeit und Steifigkeit von Fichtenholz etwa proportional mit dem Verdichtungsgrad bzw. der Rohdichte ändern. In Bezug auf das Brandverhalten ergaben unter anderem Untersuchungen an Balsa, Fichte und Kunstharz-Pressholz ähnliche Ergebnisse [35]. Mit steigender Rohdichte nimmt die Abbrandrate ab, das Holz brennt langsamer.

Andere Untersuchungsergebnisse wiederum widersprechen dieser Aussage. In [33] konnte dieser Zusammenhang beispielsweise lediglich bei Holzwerkstoffen festgestellt werden, bei Massivholz hingegen nicht. Neben den genannten Beispielen gibt es zahlreiche weitere Untersuchungsergebnisse, jedoch kann kein eindeutiger und allgemein gültiger Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Abbrandrate festgestellt werden.

Spangröße und Ausrichtung der Späne

Weiterhin wurde in [33] der Einfluss von Spangröße und Ausrichtung der Späne auf die Abbrandrate von Holzwerkstoffen untersucht. Es konnte allerdings kein Zusammenhang festgestellt werden. Eine weitere Erkenntnis der Betrachtungen war, dass die Plattendicke der betrachteten Holzwerkstoffe keinen nennenswerten Einfluss auf die Abbrandrate hatte.

Holzart

Das Abbrandverhalten von Holz wird maßgeblich von dessen chemischer Zusammensetzung und damit von der Art des Holzes beeinflusst. Auch innerhalb eines Holzstücks kann deshalb die Abbrandgeschwindigkeit je nach Bereich des Holzes (z. B. Kernholz oder Splintholz) variieren [28]. Eine eindeutige Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit von der Rohdichte konnte, wie in [33], auch in [28] nicht festgestellt werden.

4.4 Wand- und Deckenkonstruktionen aus Holz

Seit den 1990er Jahren hat sich der Holzbau hierzulande stetig weiterentwickelt und Marktanteile zurückgewonnen. 2017 betrug die Quote genehmigter Wohngebäude in Holzbauweise 16,2 % in Deutschland. Die Quote genehmigter Nichtwohngebäude in Holzbauweise war im gleichen Jahr mit 19,3 % noch etwas höher [36]. Die allgemeine Entwicklung lässt sich einfach zusammenfassen - mit dem Urbaustoff Holz wird immer mehr und höher gebaut.

Die Gründe hierfür sind vielfältig und liegen zum einen in den positiven Eigenschaften des Werkstoffes und zum anderen in der Industrialisierung und Digitalisierung der Holzbaubranche. Das Material Holz leistet als CO₂-Speicher einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz. Dies ist auch ein wesentlicher Grund, warum das Bauen mit Holz in das öffentliche Bewusstsein

zurückgekehrt ist und sich bei Entscheidungsgebern, Architekten und Ingenieuren einer wiederentdeckten Wertschätzung erfreut. Technologische Innovation bildet die Grundlage für eine Vielfalt an heute verfügbaren Vollholzprodukten, Holzwerkstoffen und neuen Verbindungsmitteln, die in Konstruktionselementen für Wand und Decke eingesetzt werden. Hinzu kommen moderne Abbundanlagen sowie digitale Holzverarbeitungszentren, die Ausdruck dafür sind, dass der Holzbau technisch konkurrenzfähig geworden ist.

Mit dem technischen Fortschritt im Holzbau geht auch einher, dass Architekten und Ingenieure das „sortenreine“ Entwerfen und Konstruieren aufgegeben haben und heute verschiedene Holzbauweisen innerhalb eines Projektes miteinander kombiniert werden. Die lange in Praxis und Theorie strikte Einteilung in Holzskelett-, Holzrahmen- und Holzmassivbauweise ist überholt. Je nach Spannweite, Funktion und projektspezifischer Anforderung (z. B. Installationsgrad, Akustik, Gestaltung) lassen sich die Konstruktionselemente für Wände und Decken auswählen. Die nachfolgende Übersicht zeigt die heute kombinierbaren Wand- und Deckenkonstruktionen im Holzbau und führt Prinzipien und Besonderheiten auf.

4.4.1 Vertikale Holzbaulemente (Wand)

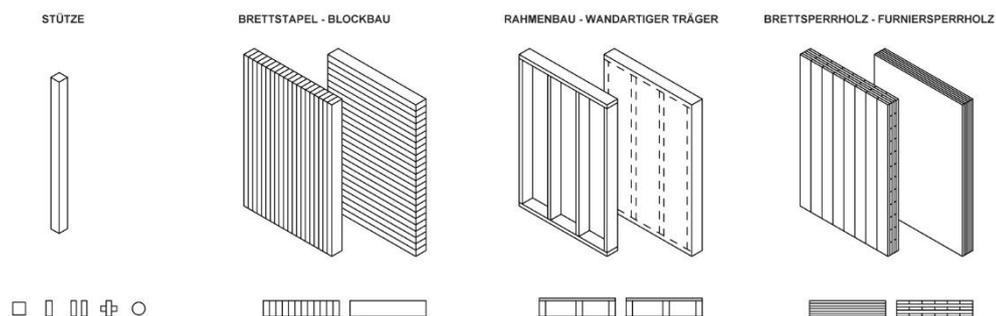


Abbildung 9: Wandkonstruktionen aus Holz [12]

Stütze

- Leichtbauelement
- Vertikale Lastabtragung (auch großer Spannweiten) über Stützen, Aussteifung mittels Auskreuzung, Beplankung oder andere Aussteifungselemente vorzusehen
- Unterschiedliche Stützenabstände (Spannweiten) möglich, große Flexibilität für Grundrissgestaltung
- Raumbildung: Trennung von Tragwerk und Hülle; Lage des Raumabschlusses ist variabel
- U.a. geeignet für mehrgeschossigen Holzbau

Brettstapel-/ Dübelholzwand

- Massivholzelement

- Flächige, tragende Wandelemente aus vertikal gestellten oder horizontal geschichteten Brettlagen, genagelt oder mit Hartholzdübeln verbunden
- Hoher Holzverbrauch
- Hoher Vorfertigungsgrad, einfache Anschlüsse

Rahmenbau / Tafelbau

- Leichtbauelement
- Aufbau: Schwelle, Ständer, Rähm, Beplankung
- Flächige Tragwirkung: filigrane Hölzer mit Holzwerkstoffplatten
- Einfache Verbindungen mittels Verschraubung
- Flächenoptimierter Außenwandaufbau durch Wärmedämmung in Ständerebene
- Große Gestaltungsfreiheit / vielfältige Anwendungsmöglichkeiten

Brettsperrholzwand

- Massivholzelement
- Großformatige Elemente aus kreuzweise verleimten, keilgezinkten Brettlagen
- Mindestens drei Lagen, immer ungerade Anzahl an Lagen
- Hoher Holzverbrauch
- Hoher Vorfertigungsgrad, einfache Anschlüsse
- U.a. geeignet für mehrgeschossigen Holzbau

Von den hier aufgeführten vertikalen Holzbauelementen sind zwei besonders hervorzuheben. Der Rahmen-/ Tafelbau hat sich bei uns zur universellen Bauweise entwickelt. Auf der Grundlage des europäischen Fachwerkbaus wurde in Nordamerika die sogenannte „Timber-Frame-Structure“ ausgebildet. Standardisierte Konstruktionshölzer und Nägel als einfache Verbindungsmittel spielten bei der Besiedelung des Kontinents eine Schlüsselrolle. Als Re-Import gelangte die Bauweise zurück nach Deutschland, wurde nach hiesigen Konstruktionsregeln und Verbindungsmitteln (Schrauben statt Nägel) weiterentwickelt. Die Bauweise lässt sich in unterschiedlichen Graden vorfertigen und eignet sich für ein- bis viergeschossige Wohn- und Nichtwohngebäude. Nach definierten Konstruktionsregeln kann im Grunde jede Zimmerei die aus wenigen Elementen bestehende Bauweise umsetzen.

Der Holzrahmenbau besitzt einen weiteren großen Vorteil, den flächenoptimierten Wandaufbau. Die Wärmedämmung liegt in Ständerebene, die Bauweise ermöglicht somit im Vergleich zum Massivbau (bspw. in Stahlbeton) geringere Außenwandstärken und somit einen reduzierten Flächenverbrauch. Die aus Klimaschutzgründen mehrfach novellierte Energieeinsparverordnung hat im Bauwesen insgesamt zu größeren Dämmstärken bei Gebäuden geführt. Hierauf hat der Holzrahmenbau reagiert, Ständertiefen haben sich von 12 cm, über 16 cm bis

20 cm und 24 cm entwickelt. Außenwände konstruiert als Holzrahmenbau, leicht und flächenoptimiert, kommen vielfach bei Neubauten sowie auch bei Sanierung von Bestandsbauten (bspw. Stahlbetonskelettbaukonstruktionen vorgehängt) zum Einsatz.

Die Erfahrung in der Praxis der letzten Jahre hat gezeigt, der Schichtenaufbau einer Holzrahmenbauwand erfolgt bevorzugt diffusionsoffen, der Vorfertigungsgrad (einseitig oder beidseitig beplankt, mit oder ohne Fassadenbekleidung) variiert je nach Projekt und ausführender Firma.

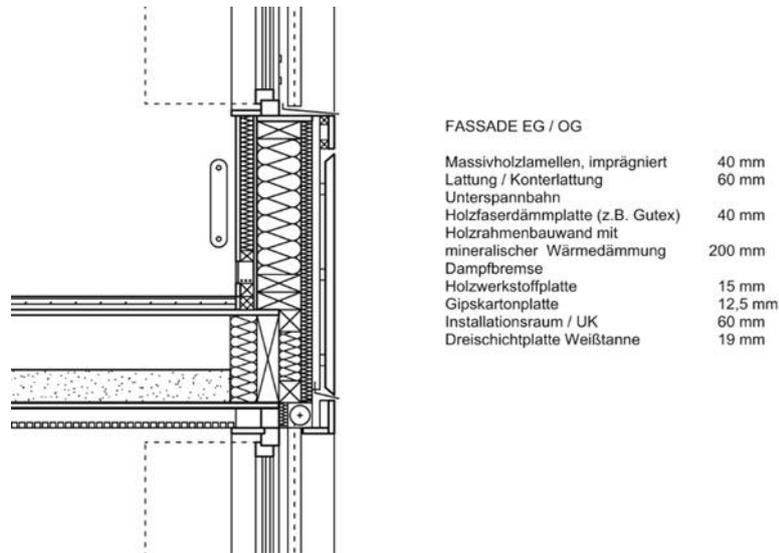


Abbildung 10: Vertikales Holzbauelement (Außenwand): Rahmenbau / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Pestalozzischule Stuttgart, 2014-16

Holzbauelemente aus Brettsperrholz (BSP) gibt es in Deutschland seit den 1990er Jahren. „Am eindrucklichsten steht die Erfindung von BSP für einen epochalen Wandel im Holzbau“ [37].

Die Erfindung von Brettsperrholz, Bauelementen aus ungerader Anzahl kreuzweise verleimter, keilgezinkter Brettlagen, markiert die Abkehr vom stabförmigen Holzbau hin zum Holzmassivbau. Das von mehreren Herstellern angebotene Produkt steht wie kein anderes für den modernen Holzbau. Die Vorteile liegen in der flächigen Tragwirkung, in dem präzisen (computer-gestützten) Abbund der Elemente, dem hohen Vorfertigungsgrad (bis hin zum Modulbau) und der damit einhergehenden schnellen, einfachen Montage auf der Baustelle. BSP-Wände kommen bei Wohn- und Nichtwohngebäuden zum Einsatz.

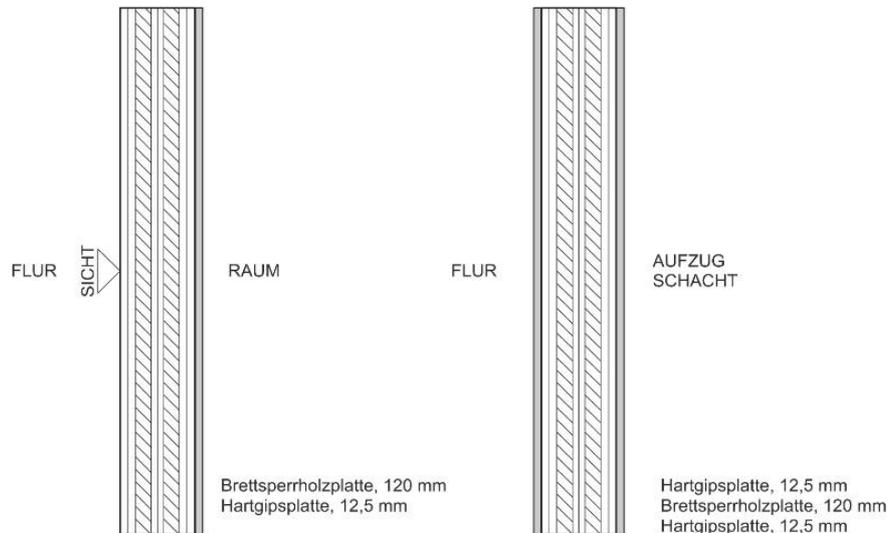


Abbildung 11: Vertikales Holzbauelement (Innenwand): Brettsperrholz / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kindertagesstätte Parkstraße Stuttgart, 2016-19

4.4.2 Horizontale Holzbauelemente (Decke)

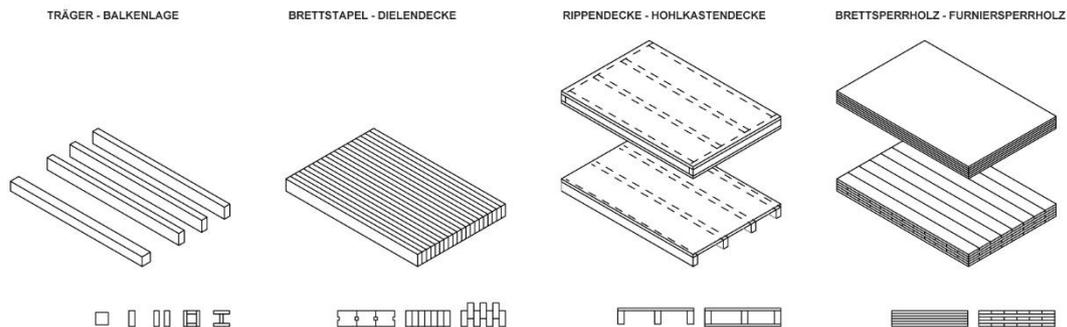


Abbildung 12: Deckenkonstruktionen aus Holz [12]

Träger / Balkenlage

- Leichtbauelement
- Einachsig gespannte Konstruktion aus einzelnen, parallel gesetzten Trägern
- Scheibenwirkung mittels Beplankung oder zusätzlicher Aussteifung erforderlich
- Vorfertigung möglich, einfache Anschlüsse

Brettstapel-/ Dübelholzdecke

- Massivholzelement
- Einachsig gespannte Konstruktion aus vertikal gestellten Lamellen, genagelt oder mit Hartholzdübeln verbunden
- Hoher Vorfertigungsgrad, einfache Anschlüsse
- Hoher Holzverbrauch
- Verschiedene Profile/ Untersichten je nach Anforderung und Gestaltung

Rippen-/ Hohlkastendecke

- Leichtbauelement
- Einachsig spannende Deckenelemente zusammengesetzt aus stabförmigen und flächigen Holzbauteilen
- Rippendecke: einseitig offen, sichtbare stabförmige Bauteile (Träger); Zwischenraum nutzbar für Dämmung, Schüttung, Installationen, etc.
- Hohlkastendecke: beidseitig geschlossen; Hohlraum nutzbar für Dämmung, Schüttung, Installationen, etc.
- Hoher Vorfertigungsgrad

Brettsperrholzdecke

- Massivholzelement
- Zweiachsig spannende Deckenelemente aus kreuzweise verleimten, keilgezinkten Brettlagen
- Mindestens drei Lagen, immer ungerade Anzahl an Lagen
- Hoher Holzverbrauch
- Hoher Vorfertigungsgrad, einfache Anschlüsse

Die Wahl des geeigneten horizontalen Holzbauelementes hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. In jedem Fall empfiehlt sich eine ganzheitliche Betrachtung der Themen Gestaltung, Konstruktion, Vorfertigung, Schwingung, Brandschutz, Akustik, Leitungsführung (bzw. technischer Installationsgrad).

Die klassische Holzbalkendecke eignet sich hervorragend für kleine (bis mittlere) Spannweiten und lässt sich in transportfähigen Abmessungen gut vorfertigen. Der Zwischenraum der Balken ist nutzbar. Hier lassen sich Leuchten sowie Elemente zur Schallabsorption anbringen, Leitungen verziehen oder aber durch Schließen der Untersicht, Schüttungen zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens des Deckenelementes einbringen.

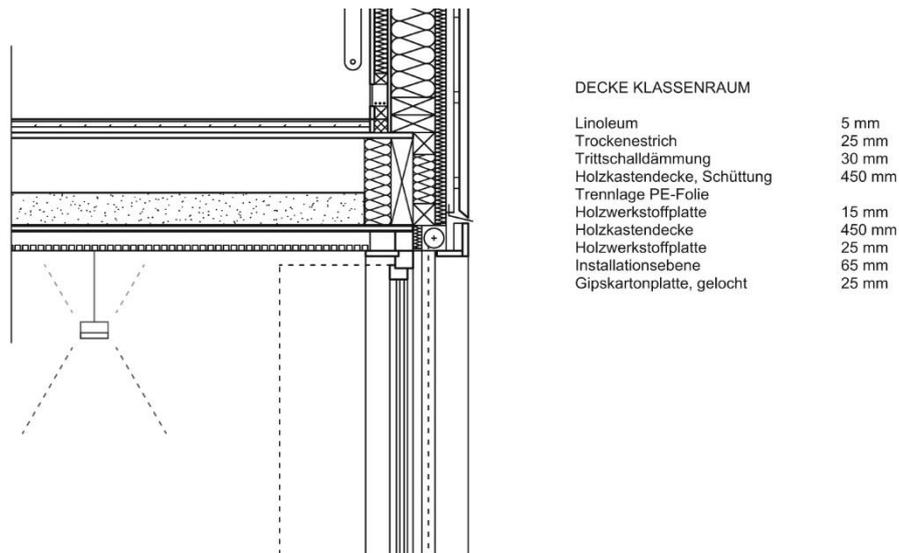


Abbildung 13: Horizontales Holzbauelement (Decke): Balkendecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Pestalozzischule Stuttgart, 2014-16

Decken aus Brettstapel, bzw. Dübelholz, bestehend aus kostengünstigen Brettern und sind für Spannweiten bis circa sechs Meter geeignet. Die einfache Herstellung erfolgt in transportfähigen Elementen mit variierender Länge und Breite je nach geometrischer Ordnung des Gebäudes.

Für größere Spannweiten bietet sich eine Kombination mit Beton an. Bei dieser sogenannten Holz-Beton-Verbunddecke übernehmen die Brettstapel zusätzlich die Funktion einer verlorenen Schalung für den Aufbeton. Der vergleichsweise hohe Holzeinsatz ist nicht als Nachteil zu werten. Brettstapeldecken sind CO₂-Speicher und damit gebauter Klimaschutz. Die Massivholzelemente sind leicht bearbeitbar und finden vielfältige Anwendung bei Wohn- sowie Nichtwohngebäuden.

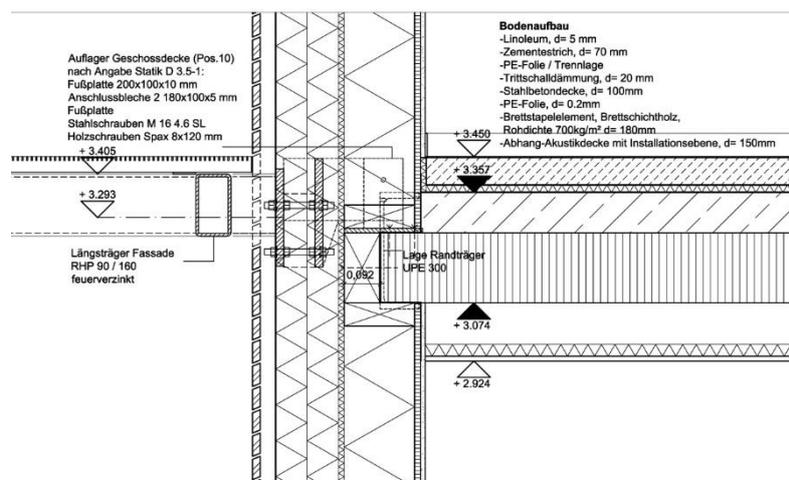


Abbildung 14: Horizontales Holzbauelement (Decke): Brettstapeldecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kinder- und Familienzentrum Harheim, 2010-14

Rippen- und Hohlkastendecken stellen eine Weiterentwicklung der Balkendecke dar. Durch Verleimen stab- und plattenförmiger Einzelelemente entsteht ein statisch wirksames horizontales Holzbauelement mit fertiger Untersicht. Die Vorteile liegen „dazwischen“: In die Hohlräume können bereits im Herstellungsprozess zum Beispiel weiche Holzfaserplatten zur Schallabsorption, Betonfertigteile zur Verbesserung des Schwingungsverhaltens oder aber Leitungen gelegt werden. Seit den 1990er Jahren bieten einzelne Hersteller Rippen- und Hohlkastenelemente als standardisierte Bauteile mit technischer Zulassung an. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Holzbausysteme Lingnotrend (Hersteller: LIGNOTREND, Weilheim-Bannholz) sowie Lignatur (Hersteller: Lignatur AG, CH-Waldstatt) genannt.

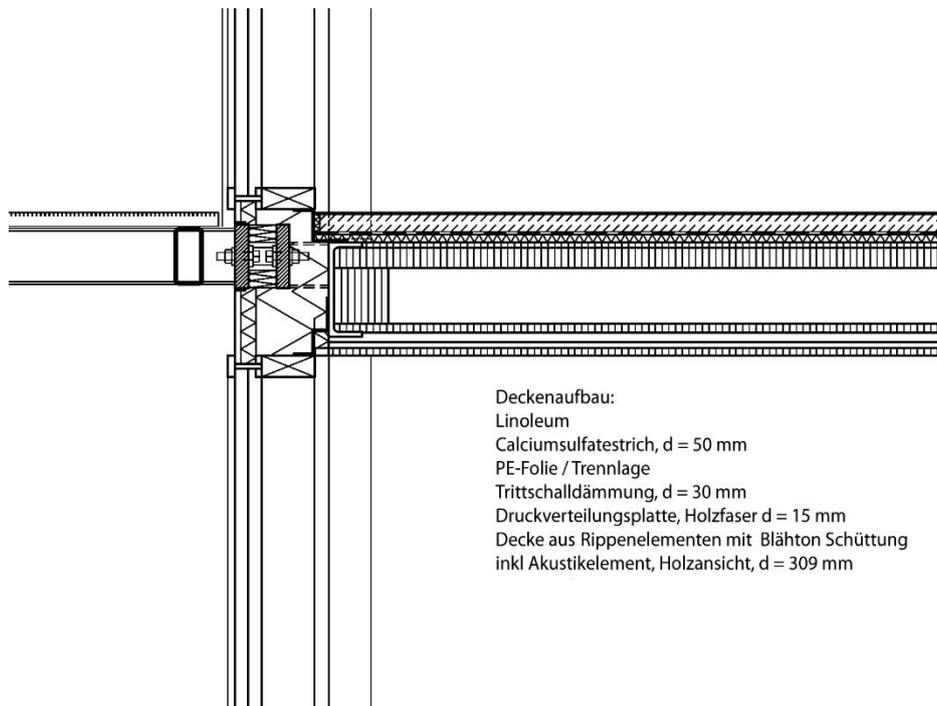


Abbildung 15: Horizontales Holzbauelement (Decke): Rippendecke / Birk Heilmeyer und Frenzel Architekten, Kindertagesstätte Schöne Aussicht, Frankfurt am Main, 2010-13

Für den horizontalen Einsatz von Brettsperrlementen gelten die gleichen (bereits genannten) Eigenschaften und Besonderheiten wie für den vertikalen. Vor allem die zweiachsige Lastabtragung stellt einen großen Vorteil dar und macht das Holzbauelement gegenüber Stahlbetondecken konkurrenzfähig.

Das aktuelle Baugeschehen mit einzelnen Leuchtturmprojekten aus BSP, in Deutschland bis zur Gebäudeklasse 5, in Österreich und Skandinavien bereits jenseits der Hochhausgrenze zeigt das große Potential von BSP für die naheliegende Zukunft auf.

4.5 Wirkungsweise von Brandschutzprodukten

Der Markt bietet für Leitungsdurchführungen ein breit gefächertes Angebot an Brandschutzsystemen von verschiedenen Herstellern. Die Funktionsweisen der dabei verwendeten

Brandschutzprodukte unterscheiden sich zwischen den Herstellern grundlegend nicht nennenswert. In Abhängigkeit der Leitungsart haben sich verschiedene Materialien etabliert, die eine Brandweiterleitung durch unterschiedliche Wirkungsweisen verhindern.

Intumeszierende Materialien (oft auch „Dämmschichtbildner“) erfahren unter starker Wärme- einwirkung eine große Volumenzunahme, das Material quillt / schäumt auf. Es bildet sich ein stabiler feinporiger Kohlenstoffschaum mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit, der angren- zende Bauteile oder Leitungen vor der Temperatureinwirkung schützt. Intumeszierende Mate- rialien sind teilweise auch in der Lage durch den Vorgang des Aufquellens Druck zu erzeugen und auf diese Weise Öffnungen oder Spalten zu verschließen [38] [39].

Endotherme Materialien sind in der Lage große Mengen Energie zu absorbieren, indem sie z.B. Wasser freisetzen und so die eigene Oberfläche kühlen [39].

Wärmedämmende Materialien besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit und verhindern auf diese Weise eine Wärmeübertragung.

Karbonisierende Materialien bilden bei der Verbrennung eine Schicht mit erhöhtem Kohlen- stoffanteil (Barrierschicht aus Verkohlungsrückständen). Diese weist eine geringe Wärmeleit- fähigkeit auf und reduziert den Transport von Luftsauerstoff zu dem darunterliegenden, ggfs. brennbaren, Material, wodurch dieses vor der Temperatureinwirkung geschützt wird [40].

Nichtbrennbare Materialien zersetzen sich nicht durch Brandeinwirkung und leisten dementsprechend keinen Beitrag zum Brand [39].

4.6 Leitungsabschottungen

Die gängigsten Abschottungsprodukte, inklusive ihrer Wirkungsweisen und Anwendungsbe- reiche, werden in den folgenden Punkten erläutert. Die einzelnen Produkte lassen sich nicht immer scharf voneinander trennen. Teilweise existieren Produkte die Eigenschaften zweier beschriebener Produkte vereinen. Auch bezeichnen unterschiedliche Hersteller gleich wir- kende Produkte unterschiedlich.

4.6.1 Brandschutzmanschetten

Eine Brandschutzmanschette ist eine vorgefertigte, wärmeaktivierte Vorrichtung, bestehend aus einem Außengehäuse und einer Einlage eines intumeszierenden Materials. Unter Brand- einwirkung schäumt die dämmschichtbildende Manschetteneinlage auf, verschließt Hohl- räume und/oder drückt Rohrquerschnitte zusammen. Auf diese Weise wird sowohl die direkte Brandweiterleitung durch die Öffnung verhindert als auch eine Verbesserung der Wärmedäm- meigenschaften erreicht. Das Außengehäuse der Manschette dient als äußere Begrenzung des intumeszierenden Materials. Dies ermöglicht sowohl eine Anbringung an der Oberfläche

als auch innerhalb des raumabschließenden Bauteils [41]. Brandschutzmanschetten werden in der Regel bei Leitungsdurchführungen von brennbaren Rohren und Kabeln verwendet.

4.6.2 Brandschutzbandagen

Brandschutzbandagen sind, wie Brandschutzmanschetten, vorgefertigte, wärmeaktivierte Vorrichtungen. Sie bestehen in der Regel aus einem intumeszierenden Material und einem umliegenden Trägergewebe. Die Funktionsweise einer Brandschutzbandage entspricht der einer Brandschutzmanschette. Im Gegensatz zu Brandschutzmanschetten sind Brandschutzbandagen allerdings stets innerhalb des raumabschließenden Bauteils anzubringen, da diese die Bauteilleibung als äußere Begrenzung des intumeszierenden Materials benötigen [41]. Brandschutzbandagen finden vor allem bei Durchführungen nichtbrennbarer Rohre (auch mit Rohrisolierung) Anwendung, allgemein eignen sie sich jedoch für alle üblichen Leitungsarten. Vorteile durch die Verwendung brennbarer Rohrisolierungen (z. B. aus Kautschuk) können sich dadurch ergeben, dass diese geschlossenzellig und diffusionsdicht sind. So bildet sich unter der Isolierung kein Tauwasser und das Risiko einer Korrosion der Leitungen unterhalb der Dämmung (CUI) kann verringert werden [42].

4.6.3 Brandschutzrohrschalen

Brandschutzrohrschalen bestehen in der Regel aus Mineralwolle oder anderen nichtbrennbaren Baustoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit und einer Ummantelung aus Aluminium-Folie. Oftmals sind Brandschutzrohrschalen in Kombination mit einer weiterführenden Rohrisolierung zu verwenden. Dabei wird die Brandschutzrohrschale meist nur im Bereich der Durchführung eingesetzt, die weiterführende Rohrisolierung wird beidseitig des durchdrungenen Bauteils angeordnet. Durch die Kombination aus nichtbrennbaren und wärmedämmenden Eigenschaften wird eine Brandweiterleitung über die Leitungsdurchführung verhindert. Um die Montage zu erleichtern, sind Rohrschalen meist einseitig eingeschlitzt und mit einem Klebestreifen versehen. Als Anwendungsgebiet für Brandschutzrohrschalen sind vor allem nichtbrennbare Rohrleitungen zu nennen, in der Baupraxis existieren allerdings auch Brandschutzrohrschalen, die sich zur Durchführung brennbarer Rohre eignen [43].

Neben Brandschutzrohrschalen aus nichtbrennbaren Baustoffen gibt es auch Brandschutzrohrschalen aus dämmschichtbildenden Materialien. Die Wirkungsweise dieser Rohrschalen entspricht der von Brandschutzbandagen. Als Anwendungsgebiet sind sowohl brennbare als auch nichtbrennbare Rohrleitungen zu nennen [44].

4.6.4 Brandschutzsteine und -stopfen

Brandschutzsteine und -stopfen bestehen aus dämmschichtbildenden Materialien. Die Funktionsweise dieser Brandschutzprodukte entspricht der von Brandschutzmanschetten und -ban-

dagen. Im Brandfall schäumen sie auf und verschließen Hohlräume und/oder drücken Rohrquerschnitte brennbarer Rohre zusammen. Das aufgeschäumte Material besitzt in der Regel eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Wärmeleitung durch die Öffnung reduziert wird. Die genannten Abschottungssysteme unterscheiden sich vor allem durch ihre Form. Brandschutzsteine sind in der Regel quaderförmig, Brandschutzstopfen meist zylindrisch oder konisch [41]. Durch die unterschiedlichen Formen ergeben sich zum Teil leicht unterschiedliche Anwendungsgebiete. Brandschutzsteine eignen sich am besten um rechteckige Öffnungen zu verschließen. Es können alle Leitungsarten durchgeführt werden, weshalb sich Brandschutzsteine gut eignen um verschiedene Leitungsarten gemeinsam abzuschotten (Kombischott). Brandschutzstopfen werden vor allem bei runden Öffnungen (z.B. Kernbohrungen) zur Durchführung von Kabeln verwendet. Sowohl Brandschutzsteine als auch Brandschutzstopfen eignen sich gut für eine Nachbelegung von Kabeln [39]. Bei der Herstellung von Abschottungen mit Brandschutzsteinen sind die Herstellervorgaben genauestens zu beachten, da je nach Leitungsart gegebenenfalls zusätzliche Brandschutzprodukte erforderlich sind (beispielsweise weiterführende Isolierungen bei nichtbrennbaren oder Brandschutzbandagen bei brennbaren Rohren).

Da bei der Verwendung dieser Abschottungssysteme häufig Restspalte entstehen, werden sie in der Regel in Kombination mit weiteren Brandschutzprodukten verwendet. Zur Verfüllung von Restspalten oder Zwickeln von Kabelbündeln werden unter anderem spachtelbare oder auspressbare intumeszierende Materialien oder Brandschutzschäume verwendet [39].

4.6.5 Weichschott

Weichschotts bestehen in der Regel aus nichtbrennbaren Mineralwollplatten, die die umliegende Bauteilöffnung verschließen. Die Leitungen werden durch passgenaue Öffnungen in den Mineralwollplatten geführt. Auf den Mineralwollplatten und den durchgeführten Leitungen ist meist eine Brandschutzbeschichtung (endotherm oder intumeszierend) anzubringen. Es gibt aber auch zugelassene Systeme, die ohne eine Brandschutzbeschichtung auskommen. Weichschotts eignen sich für alle Leitungsarten. Die Herstellung von Kombischotts ist ebenfalls möglich. Bei der Herstellung von Weichschotts können je nach Leitungsart gegebenenfalls zusätzliche Brandschutzprodukte erforderlich sein. Die Nachbelegung von Weichschotts ist prinzipiell möglich, jedoch nicht zu empfehlen, da in vielen Fällen die Wirksamkeit der Abschottung zerstört wird.

Im Brandfall wird eine Brandweiterleitung durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Mineralwollplatten und die Wirkung der Beschichtung verhindert. Endotherme Beschichtungen absorbieren große Mengen der Brandenergie indem sie Wasser freisetzen, wodurch darunterliegende Oberflächen gekühlt werden. Intumeszierende Beschichtungen schäumen unter Temperatureinwirkung auf und bilden einen kohleartigen, wärmedämmenden Schaum, wodurch

die Wärmeleitung durch die Mineralwollplatte und die Leitungen behindert wird [39]. Die Funktionsweisen der zusätzlich erforderlichen Brandschutzprodukte sind in den jeweiligen Kapiteln erläutert.

4.6.6 Brandschutzmörtel

Brandschutzmörtel sind Mörtel, die mithilfe Zusatzstoffen (beispielsweise Perlit) eine wärmedämmende Wirkung erzielen können. Brandschutzmörtel sind nichtbrennbar und beteiligen sich dementsprechend nicht am Brandgeschehen. Die Abschottungswirkung wird durch die Kombination der beiden genannten Eigenschaften (wärmedämmend und nichtbrennbar) erzielt. Beim Einbau von Brandschutzmörteln ist die gesamte Öffnung um die durchgeführten Leitung zu verschließen. Dabei ist darauf zu achten, dass Hohlräume vollständig verschlossen werden. Brandschutzmörtel eignen sich für alle Leitungsarten, Kombiabschottungen können ebenfalls realisiert werden. Bei der Verwendung von Brandschutzmörteln können je nach durchzuführender Leitungsart zusätzliche Brandschutzprodukte erforderlich sein [39].

4.6.7 Brandschutzschaum

Brandschutzschäume sind Materialien, die bei Raumtemperatur aushärten und bei der Verarbeitung ihr Volumen vergrößern [41]. Im Brandfall wirken sie sowohl intumeszierend als auch wärmedämmend. Als Anwendungsgebiete sind sowohl alle Leitungsarten aber auch Kombinationen dieser (Kombiabschottungen) zu nennen. Brandschutzschäume werden oft in Kombination mit Brandschutzsteinen verwendet. In diesem Fall werden größere Flächen mit den Brandschutzsteinen ausgefüllt, kleinere Bereiche um die Leitungen werden mit dem Brandschutzschaum verschlossen. Um eine wirksame Abschottung herstellen zu können sind bei der Verwendung von Brandschutzschäumen häufig zusätzliche Brandschutzprodukte erforderlich. Eine Nachinstallation ist bei der Verwendung von Brandschutzschäumen in der Regel problemlos möglich [39].

4.6.8 Kabelbox

Kabelboxen bestehen in der Regel aus einem Metallrahmen mit intumeszierenden Einlagen [41]. Im Brandfall schäumen die Einlagen auf und stellen einen wärmedämmenden Verschluss der Kabelbox sicher. Zusätzlich werden Kabelboxen mit Schaumstoffplatten und/oder Fugendichtstoffen (z. B. Acryl) abgedichtet. Dies soll einer Kaltrauchverschleppung und einem Rauchdurchtritt in der Brandentstehungsphase vorbeugen. Durch Kabelboxen können alle Arten von Leitungen gleichzeitig geführt werden [45]. Ein großer Vorteil dieser Abschottungssysteme ist die einfache Möglichkeit der Nachbelegung.

Neben Kabelboxen mit Metallrahmen gibt es auch Produkte mit Schalen aus anderen Materialien (z. B. Spritzguss). Bei diesen Kabelboxen schäumt die gesamte Schale auf, nicht nur die intumeszierende Einlage [46].

4.7 Ver- und Anwendbarkeit von Leitungsabschottungssystemen

National

Es existiert keine technische Baubestimmung oder allgemein anerkannte Regel der Technik, die beschreibt wie Abschottungen auszuführen sind.

→ Nach Anhang 4 Kapitel 6 MVV TB sind Kabel- und Rohrabschottungen Bauarten, die eines Anwendbarkeitsnachweises, in der Regel einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) nach § 16a MBO, bedürfen.

Abschottungssysteme bestehen als Bauart aus verschiedenen Bauprodukten. Für die einzelnen Bauprodukte sind Verwendbarkeitsnachweise nach § 17 MBO erforderlich. Der Nachweis der Verwendbarkeit erfolgt über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder für Bauprodukte, die nach allgemein anerkannten Prüfverfahren beurteilt werden können, über ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP). National können Verwendbarkeits- und Anwendbarkeitsnachweis kombiniert beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beantragt werden. Der Teil der abZ beschreibt in diesen Fällen Produktmerkmale, der Teil der aBG die Aspekte des Zusammenfügens und der Anwendung.

Europäisch

Für Abschottungssysteme, bei denen Bauprodukte / Bausätze mit ETAs nach BauPVO verwendet werden, muss der Nachweis der Anwendbarkeit als Bauart nach MVV TB getrennt in Form einer Bauartgenehmigung nach § 16a MBO erfolgen. In wenigen Ausnahmen entfällt das Erfordernis einer zusätzlichen Bauartgenehmigung, siehe dazu Punkt 6.3.2.2/1 in Anhang 4 der MVV TB.

4.8 Aktuelle Lösungen für die Leitungsdurchführung durch Holzbauteile mit brand-schutztechnischen Anforderungen

Durch Anwendung der M-MFHHolzR (siehe 4.1.6) in Verbindung mit der Muster-Leitungsanlagenrichtlinie (siehe 4.1.7) ergibt sich für die Führung von Leitungen durch hochfeuerhemmende Bauteile aus Holz mit einer Feuerwiderstandsanforderung von 60 Minuten in den meisten Fällen eine gewerkübergreifende Lösung. Die M-MFHHolzR hat zwar keine Gültigkeit für feuerhemmende Bauteile, die Herangehensweise der Abschottung von Leitungen in hochfeuerhemmende Bauteile kann allerdings auf die Abschottung von Leitungen in feuerhemmenden Bauteilen übertragen werden [47].

Aufgrund der Musterleitungsanlagenrichtlinie (MLAR) dürfen Leitungen nur durch Abschottungen geführt werden, die mindestens die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen wie das durchdrungene Bauteil [48]. Diese Abschottungen werden gemäß DIN EN 1366-3 in Massiv-

oder Leichtbau Wand- und Deckenkonstruktionen geprüft (siehe (4.9)), also nicht in Holzbauteilen. Demnach beschränkt sich im Normalfall der Anwendbarkeitsnachweis für Abschottungssysteme (siehe Absatz 4.7) auf die Anwendung in Massivbauteilen oder leichten Trennwänden. Um Abschottungssysteme in Verbindung mit Holzbauteilen verwenden zu können, wird im Holzbauteil eine Öffnung nach M-MFHHolzR hergestellt. Innerhalb dieser klassifizierten Ausleibung ist der Einbau klassifizierter Abschottungen baurechtlich zulässig [49]. Gemäß M-MFHHolzR ist die Öffnung mit einer nichtbrennbaren Ausleibung zu versehen, die die Entzündung von tragenden bzw. aussteifenden Holzbauteile für die Dauer von 60 Minuten verhindert (Brandschutzbekleidung K₂60 nach DIN EN 13501-2) [11]. Die Öffnung wird im Anschluss mit Mörtel oder Beton verfüllt. Diese Einbauart stellt eine nicht wesentliche Abweichung von den in den Anwendbarkeitsnachweisen der klassifizierten Abschottungssysteme beschriebenen Bedingungen dar [47]. In der folgenden Abbildung 16 sind Leitungsabschottungen in einer Holzbalkendecke mit Öffnungsleibung gemäß M-MFHHolzR und Mörtelverguss dargestellt. Sinngemäß kann die Darstellung auf Wandbauteile übertragen werden.

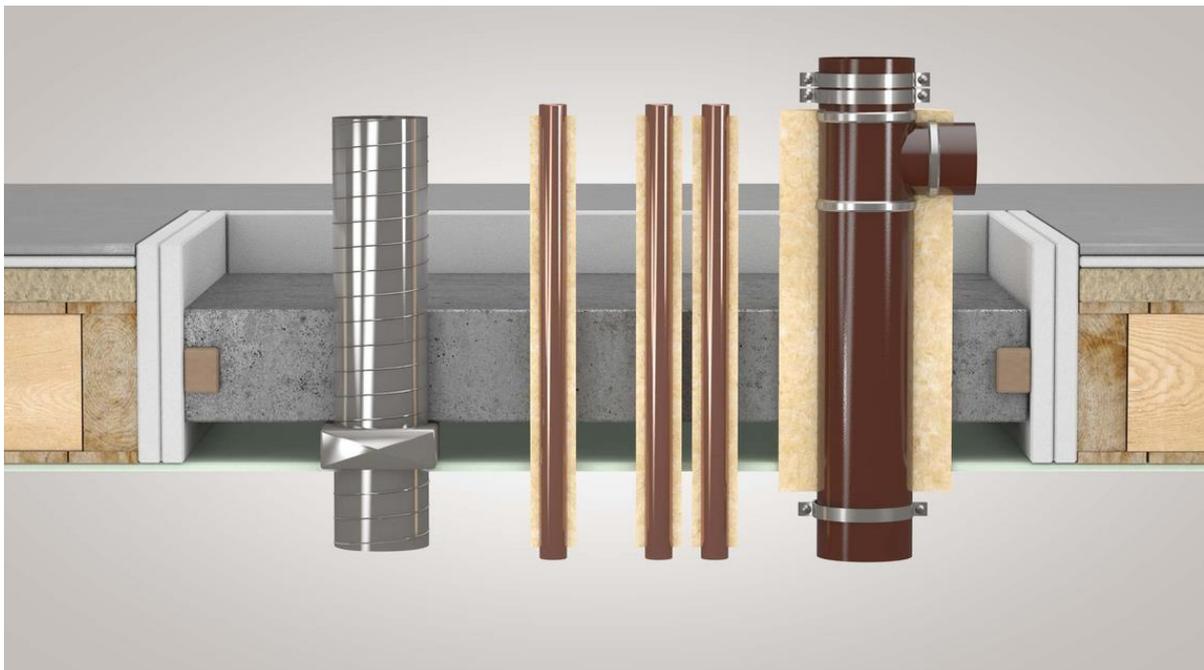


Abbildung 16: Beispielhafte Leitungsabschottung in einer Holzbalkendecke [50]

Abbildung 17 zeigt alternativ den Einbau einer Abschottung mittels Brandschutzsteinen innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung in einer Massivholzwand.



Abbildung 17: Abschottung mit Hilti CFS-BL P innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung [51]

Für bestimmte Wandaufbauten liegen beim Projektpartner offizielle Prüfergebnisse [52, 53, 54] vor, die die Anwendbarkeit vieler Abschottungssysteme (beispielhaft dargestellt in Abbildung 18) darin bestätigen.



Abbildung 18: Hilti Abschottungssysteme in Brettsperrholzwand v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzstein CFS-BL P, Brandschutzmanschette CFS-C EL [55]

Auch andere Hersteller haben bereits offizielle Versuche z. B. mit dem System „Conlit“ an einer Holzwand durchgeführt. Geprüft wurde eine beidseits mit 12,5 mm GKF-Platten beplankte Holzständerkonstruktion (nach DIN 4102-4 Tabelle 10.6, Zelle 6). Die Abschottungssysteme Conlit 150 U, Conlit Brandschutzmanschetten sowie die Conlit Bandage konnten ihre Funktion über 90 Minuten hinweg erbringen. [56]

Auch im Bereich feuerwiderstandsfähiger Decken in Holzbauweise ergibt sich die Möglichkeit durch Abschottungssysteme deren Verwendbarkeitsnachweis den Einbau in diese Decken ohne die Ausbildung einer Öffnungsleibung gestattet. An dieser Stelle ist das „Conlit-System“ der Deutschen Rockwool aufzuführen. Dieses kann nach Herstellerangaben sowie nach abP ohne eine klassifizierte Öffnungsleibung nach M-MFH HolzR in bestimmten Holzbalkendecken und BSP-Decken angewendet werden [57]. Die folgende Abbildung 19 zeigt die Anwendung des „Conlit-Systems“ in einer BSP-Decke.

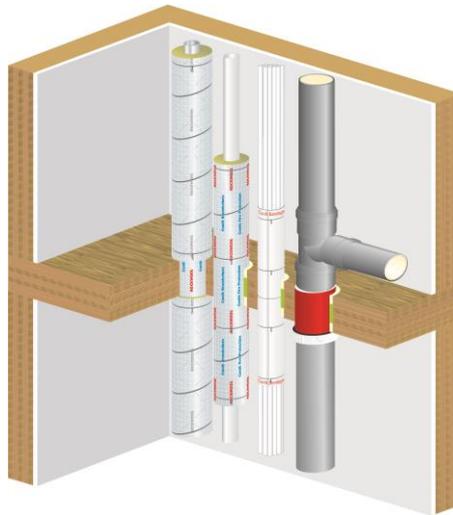


Abbildung 19: "Conlit"- Abschottungen in Brettsperrholzdecke [58]

Auch für Produkte von Hilti weisen die oben genannten Prüfberichte [52, 53, 54] die Anwendbarkeit mehrerer Abschottungssysteme in Decken in Holzbauweise nach. Beispielhafte Anwendungen sind in dargestellt

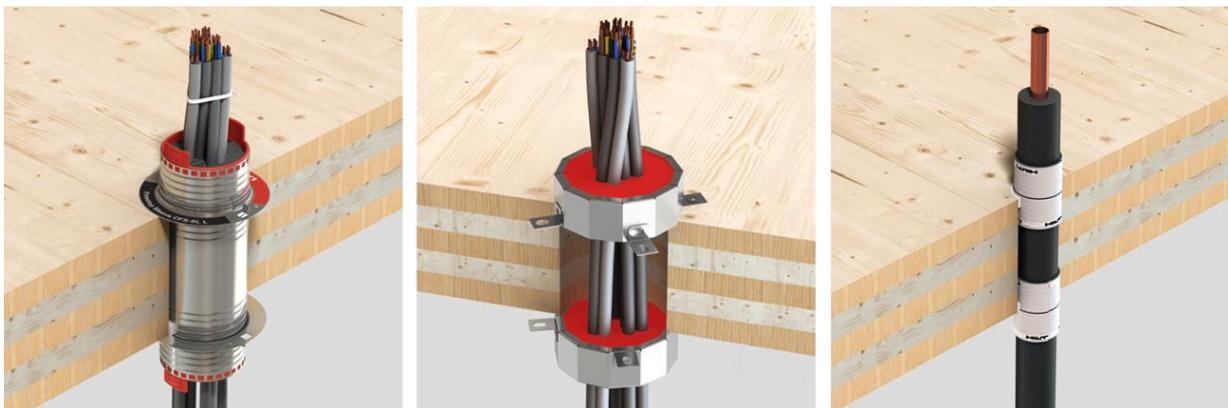


Abbildung 20: Hilti Abschottungssysteme in Brettsperrholzdecke v. l. n. r. Brandschutzhülse CFS-SL, Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzbandage CFS-B) [55]

Bisher gibt es allerdings nur sehr wenige Produkte, deren Anwendung in Holzbauteilen ohne die Ausbildung einer Öffnungsleibung nach M-MFH HolzR und Mörtel- oder Betonverguss möglich und zugelassen ist.

4.9 Prüfung von Leitungsabschottungen

Die Prüfung von Leitungsabschottungen kann entweder auf nationaler Ebene nach DIN 4102-9 bzw. -11 oder auf europäischer Ebene nach DIN EN 1366-3 erfolgen. Inhaltlich ist der Prüfungsvorgang nach beiden Normierungen sehr ähnlich. Systematisch besteht der Unterschied, dass auf europäischer Ebene Prüf- und Klassifizierungsnorm getrennt sind, auf nationaler Ebene wird sowohl die Klassifizierung als auch die Prüfung in einer Norm beschrieben. Für die durchgeführten Versuche wurde die europäisch harmonisierte Norm herangezogen. Im Folgenden wird daher auf die Anforderungen der europäischen Prüfnorm eingegangen.

Der Anwendungsbereich der Norm erstreckt sich auf eine „Prüfmethode und Kriterien zur Beurteilung der Fähigkeit einer Abschottung, den Feuerwiderstand eines raumabschließenden Bauteils an der Stelle, wo durch dieses eine oder mehrere Leitungen durchgeführt werden, aufrechtzuerhalten“ [59]. Generell sind die zu verwendenden Prüfeinrichtungen und Prüfbedingungen in DIN EN 1363-1 beschrieben. In DIN EN 1366-3 ist das Verfahren zur Prüfung von Leitungsabschottungen detailliert dargestellt. In folgender Tabelle 5 wird auf einige wichtige Punkte eingegangen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 5: Prüfung von Abschottungen nach DIN EN 1366-3 [60, 59]

Kriterium	Anforderung nach DIN EN 1366-3
Druckbedingungen	Nach DIN EN 1363-1* und - Mindestens 20 Pa am oberen Rand der höchstgelegenen Abschottung; Leitungen müssen in die Zone eingebaut werden, in der der Druck 10 Pa übersteigt (10 Pa am untersten Punkt der Abschottung müssen aufrechterhalten werden) - Im Falle eines Leerschotts muss ein Mindestdruck von 20 Pa am oberen Rand der Abschottung aufrechterhalten werden - Bei einer horizontalen Tragkonstruktion muss ein Druck von 20 Pa (100±10 mm unterhalb der Unterseite der Tragkonstruktion) aufrechterhalten werden
Größe und Abstände des Probekörpers	- Originalgröße - Abstand Rand der Abschottung zu Ofeninnenwand 200 mm - Abstand zwischen zwei Abschottungen ≥ 200 mm
Anzahl	In horizontalen Bauteilen (Decken) genügt ein Probekörper (Beflammung von unten). Bei angestrebter Verwendung in Decken und Wänden (vertikale Bauteile) müssen beide Ausrichtungen, vertikal und horizontal, geprüft werden
Tragkonstruktionen/ Leitungsabstützungs Vorrichtung	Die Leitungsabstützvorrichtung ist ein Bestandteil des Prüfkörpers.
Länge im Brandraum	mindestens 500 mm, dabei muss die Leitung/ müssen die Leitungen mindestens 150 mm über den äußeren Rand der Abschottung hinausragen
Länge auf der unbeflammten Seite	mindestens 500 mm, mindestens 150 mm über den äußeren Rand der Abschottung
Belastung	keine, außer das Eigengewicht (Tragkonstruktion beachten)
Kabelenden	im Brandraum offen, auf der unbeflammten Seite verschlossen (Acryldichtmasse)
Rohrenden	je nach Anwendungsbereich, siehe Tabelle 2, Tabelle H1, Tabelle H2 in DIN EN 1366-3
Leerschott	größte vorgesehene Abschottung
Thermoelemente	nach DIN EN 1363-1 und - Abdeckung mit silikatfaserbasiertem Material (2 mm dick, Dichte 130 kg/m ³ - 200 kg/m ³ , Klassifizierungstemperatur > 1000 °C, Glühverlust < 12%, Wärmeleitfähigkeit 0,05 W/m ² *K - 0,065 W/m ² *K - Größe darf u. U. verändert werden - Stellen nach Bild 3 und 4 DIN EN 1366-3 - bewegliches Thermoelement
Wärmedämmverhalten	Das Kriterium des mittleren Temperaturanstiegs wird nicht angewendet.
Messung des Raumabschlusses	- Wattebausch nach EN 1363-1 - evtl. Zusätzlich kleine Wattebausche (30 mm*30 mm*20 mm) - Spaltlehren nach EN 1363-1
Aufbau der Wände	- Massivwandkonstruktion: Massiv-Normtragkonstruktion (Porenbetonplatten, Leichtbeton, Normalbeton mit einer Dicke entsprechend der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer) für Wände aus Mauerwerk oder Beton - Leichtwandkonstruktion: Norm-Leichtwandkonstruktionen, Mindestgröße nach 7.2.2.1.2 beachten
Aufbau der Decken	- Massivdecken: Massiv-Normtragkonstruktion für Bauteile aus Beton oder Mauerwerk (Platten aus Porenbeton, Leichtbeton oder Normalbeton) nach 7.2.2.2.1 - Leichtbauweise: Mindestgröße beachten 7.2.2.2.2

*5 Minuten nach Beginn der Prüfung muss der Ofendruck ±5 Pa des Nenndrucks erreicht haben. Nach 10 Minuten und fortlaufend muss er ±3 Pa des Nenndrucks erreicht haben. Bei einem schnell brennenden Probekörper darf eine Abweichung von mehr als den angeführten zulässigen Abweichungen höchstens für die Dauer von 5 min vorliegen, vorausgesetzt diese sind auf eine plötzliche Entzündung zurückzuführen.

Nach DIN EN 1363-1 und DIN EN 1366-3 müssen bei der Prüfung von Leitungsabschottungen die Leistungskriterien Wärmedämmung und Raumabschluss untersucht werden. Für das Wärmedämmkriterium ist, wie in Tabelle 5 bereits beschrieben, lediglich die mittlere Temperaturerhöhung um 180 Kelvin an einer einzelnen Messstelle relevant. Die mittlere Temperaturerhöhung der Messstellen zur Ermittlung der mittleren Temperatur auf der unbeflammten Seite um 140 Kelvin wird nicht betrachtet. Die Temperaturerhöhung wird bestimmt, als Differenz der Temperatur einer Messstelle zu der zu Versuchsbeginn herrschenden Temperatur. Der Raumabschluss des Probekörpers wird mittels eines Wattebauschs, Spaltlehren und Beobachten überprüft. Entzündet sich ein angehaltener Wattebausch, lässt sich ein Spalt mit der vorgegebenen Spaltlehre durchdringen oder werden Flammen auf der unbeflammten Seite beobachtet ist das Leistungskriterium „Raumabschluss“ nicht mehr erfüllt. Das Leistungskriterium „Wärmedämmung“ ist automatisch nicht mehr erfüllt, sobald das Leistungskriterium „Raumabschluss“ versagt. Der Rauchdurchtritt durch Abschottungen ist kein direkt quantifiziertes Prüfkriterium, er wird jedoch vom jeweiligen Prüfer / Prüfinstitut beurteilt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass zur Bewertung eines Produkts nur ein einziges positives Prüfergebnis ausreichend ist. Gleichzeitig sind Brandprüfungen als sehr individuell einzustufen und es können teils große Streuungen entstehen zwischen den Ergebnissen identischer Versuchsaufbauten.

5. Vorversuchsreihe

Angestrebt ist die aktuell gängige Lösung „Beton-in-Holz“ (siehe 4.8) durch die neue Lösung „Holz-in-Holz“ zu ersetzen. Es sollen Holzmodule erarbeitet werden, in denen die Verwendung für den Massivbau zugelassener Abschottungssysteme möglich ist. Diese Holzmodule sollen in Wände und Decken in Holzbauweise eingesetzt werden. Auf diese Weise ergibt sich an der Stelle einer Leitungsdurchführung kein Materialwechsel und die Vorfertigbarkeit und andere Vorteile des Werkstoffs Holz bleiben gewahrt.

Um erste Erkenntnisse zu gewinnen, wurde eine Brandversuchsreihe mit, für den Massivbau zugelassenen, Abschottungssystemen durchgeführt, die in Holzprobekörper eingebaut wurden. Dabei wurden grundsätzlich die Regelungen der Anwendbarkeitsnachweise beachtet. Die Probekörper wurden bisher ausschließlich vertikal im Brandofen angeordnet. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Deckenbauteile soll in einem späteren Schritt erfolgen. Um mehr Erkenntnisse aus den Versuchen ziehen zu können, wurden bei einigen Versuchen bewusst erschwerte Bedingungen herbeigeführt. Dies geschah beispielsweise durch größere Leitungsdurchmesser bei der Auswahl der Kabel. Ein Versagen der Abschottung sollte auf diese Weise provoziert werden, um Versagensmechanismen aufzudecken und untersuchen zu können. Als

erschwerend für die Prüfung (Leistungskriterium Temperaturerhöhung) muss die direkte Beflammung der nicht brennbaren Materialien, wie Kabelkerne und Rohre in Betracht gezogen werden.

Es wurden für die Untersuchungen zwei verschiedene Holzmodule gewählt:

1. Modul aus Brettschichtholz (BSH) (Fichte) in der Dicke 160 mm (Abbildung 21)
2. Schichtaufbau aus OSB-Platten und Steinwollämmplatten (Abbildung 22)

Die Module wurden für eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten konzipiert. In Deutschland wäre aktuell die Anforderung 60 Minuten in den meisten Fällen ausreichend. Es besteht allerdings die Möglichkeit, dass die Anforderung 90 Minuten in einigen Ausnahmen oder auch in Zukunft häufig relevant wird. Die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten hat vor allem internationale Relevanz.

Die Dicke des Moduls bzw. die Stärke und Anzahl der Platten wurden unter Beachtung der Abbrandraten der gewählten Holzwerkstoffe festgelegt. Es wurde versucht ein Modul zu kreieren, welches einer 120-minütigen Beflammung nach ETK im Brandofen sicher übersteht, aber dennoch nicht deutlich überdimensioniert ist.

Es wurde beim Design der Module bewusst auf eine Beplankung der Module verzichtet. Auf diese Weise wird der Möglichkeit Rechnung getragen, dass die Verwendung von Holz in Zukunft unter bestimmten Bedingungen auch ohne eine Beplankung mit nichtbrennbaren Baustoffen möglich sein könnte. Eine nachträgliche Beplankung der Module würde diese nur noch sicherer werden lassen.

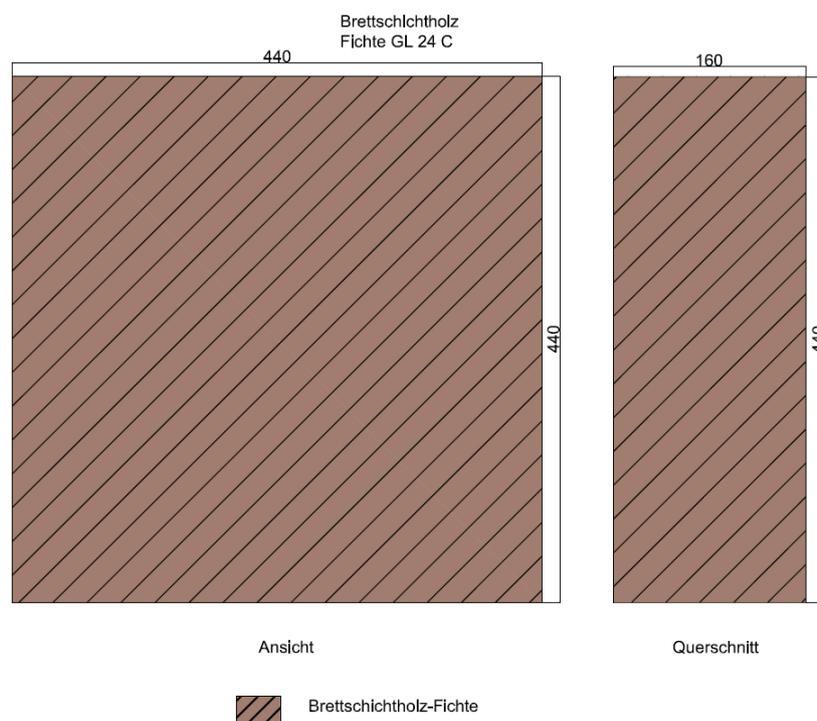


Abbildung 21: Brettschichtholzmodul (BSH-Modul)

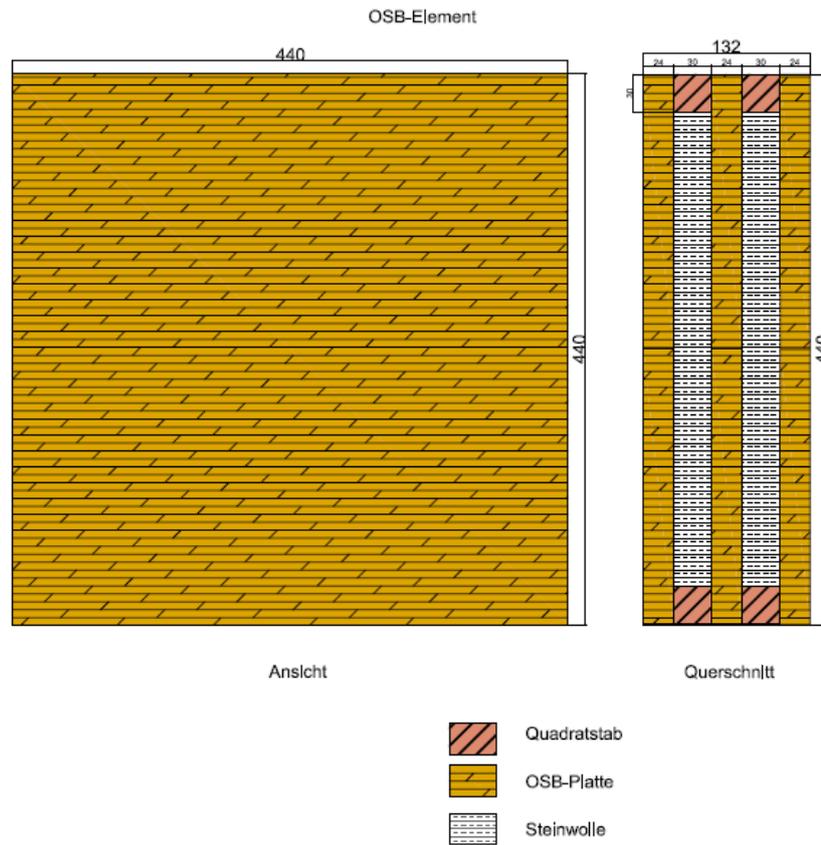


Abbildung 22: OSB-Element-Modul

Die einzelnen Schichten des OSB-Element-Moduls wurden jeweils miteinander verleimt und verschraubt. Der Abstand zwischen den OSB-Platten wurde über einen Rahmen aus Kieferleisten (Querschnitt 30 mm x 30 mm) sichergestellt, in denen die Steinwollämmplatten eingelegt waren. Die Verschraubung der Elemente erfolgte auf allen Seiten in der gleichen Art und Weise. Die Positionierung der Schrauben ist in Abbildung 23 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Anordnung der Schrauben dem symmetrischen Aufbau der Module widerspricht. Da sich die Schrauben allerdings nur im Randbereich, in dem sich die Kanthölzer, die als Abstandshalter fungieren, befinden, ist dies als nicht relevant zu bewerten.

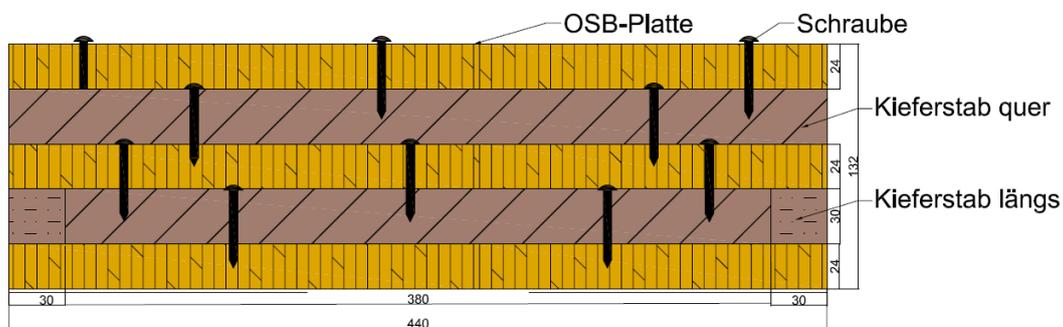


Abbildung 23: Positionierung der Schrauben im OSB-Element

5.1 Versuchsprogramm

Es wurden von jeder der im Folgenden beschriebenen Variationen Versuche in BSH-Modulen sowie in OSB-Element-Modulen durchgeführt. Dabei wurden jeweils zwei Probekörper getestet, um zufällige Ergebnisse weitgehend auszuschließen. Diese Vorgehensweise ist bei einem natürlich gewachsenen, inhomogenen Werkstoff wie Holz nach Meinung der Autoren essenziell.

Es wurden die Leitungen nach Tabelle 6 ausgewählt und durchgehend für die Vorversuche verwendet.

Tabelle 6: Leitungsauswahl Vorversuchsreihe

Art der Leitung	Maße		Material			Auswahlkriterium
	Innendurchmesser	20mm		CU[KG/KM]	Mantelwanddicke[mm]	
Kupferrohr	Innendurchmesser	20mm	Kupfer			Üblich verwendete Leitung zum Warmwassertransport in Gebäuden bis GK 4
	Außendurchmesser	22mm				
Kunststoffrohr	Innendurchmesser	ca.104mm	PPH (Polypropylen)			Üblich verwendete Leitung zum Abwassertransport in Gebäuden bis GK 4
	Außendurchmesser	110mm				
Kabel(-bündel)	Außendurchmesser C1	43,9mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: PVC Mantel: PVC	4208	2,6	Mittlere Kabelkonfiguration nach DIN EN 1366-3, damit gelten Prüfergebnisse für Kabel bis zu einem Durchmesser von 50mm. Diese Kabelkonfiguration enthält zwar für den Holzbau (GK4) eher große Kabeldurchmesser. Die Versuchsergebnisse werden somit aber auf der sicheren Seite liegen.
	Außendurchmesser C2	49mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: Gummi Mantel: Gummi	3648	k.A.	
	Außendurchmesser C3	41mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: VPE 2X 1 Mantel: halogenfreies Polymer HM4	3648	k.A.	
	Außendurchmesser E	24,6mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: PVC DIV4 Mantel: PVC DMV5	1776	1,8	

In Tabelle 7 ist dargestellt welches Abschottungssystem für die jeweiligen Leitungsarten verwendet wurde. Es wurden Abschottungssysteme ausgewählt, welche aufgrund der Vorkenntnisse und Literaturrecherche für die Anwendung in Holz als geeignet erschienen.

Tabelle 7: Zuordnung Leitungsart_Abschottung

Abschottung Art der Leitung	Brandschutzkabelmanschette	Brandschutzmanschette	Platten-Weichschott	Brandschutzbandage	Brandschutzrohrschale
Kabel	x		x		
brennbares Rohr		x			
nichtbrennbare Rohre				x	x

Die Durchführung der Leitung wurde für die Leitungsarten Kabel und brennbares Rohr mittig im Modul angeordnet und je ein Kabelbündel (bestehend aus vier Kabeln) bzw. ein Rohr durch das Modul geführt. Bei den nichtbrennbaren Rohren wurden je zwei Leitungen in einem Modul angeordnet. Dies war an dieser Stelle möglich, da der Durchmesser der Leitun-

gen deutlich kleiner war als bei den anderen Leitungsarten, sodass davon ausgegangen werden konnte, dass die Durchführungen sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die Durchführungen wurden so angeordnet, dass die Abstände zu den Modul-Außenkanten sowie die Abstände untereinander maximal waren. In der folgenden Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die verschiedenen Versuchsaufbauten, eingebaut im Ofen, zu sehen.



Abbildung 24: v. l .n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzmanschette CP 644, Brandschutzrohrschale Conlit 150 U und Brandschutzbandage CFS-B, Platten-Weichschott mit Brandschutzbeschichtung CP 673 (jeweils in OSB-Modul)

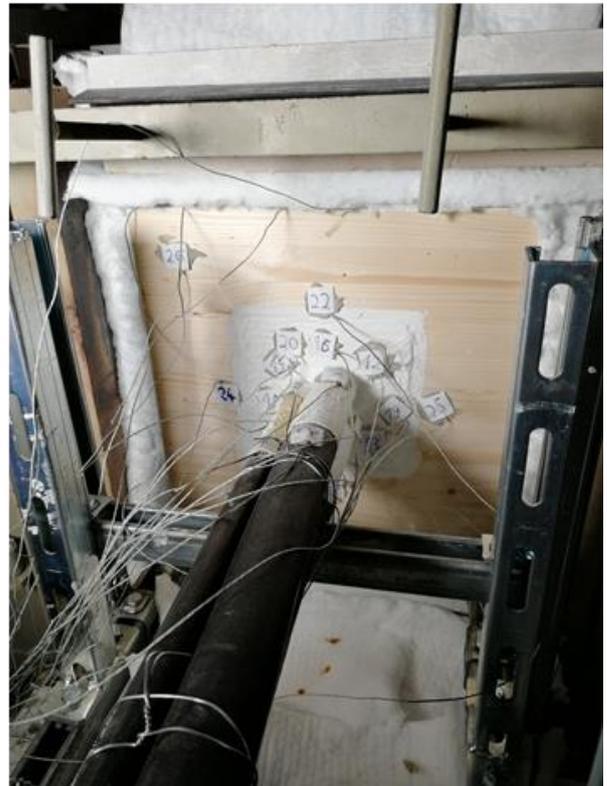


Abbildung 25: v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette CFS-CC, Brandschutzmanschette CP 644, Brandschutzrohrschale Conlit 150 U und Brandschutzbandage CFS-B, Platten-Weichschott mit Bandschutzbeschichtung CP 673 (jeweils in BSH-Modul)

5.2 Prüfofen

Der Innenraum des Prüfofens hat eine Größe von 170,5 cm x 41,5 cm. Die Beflammung des Ofenraums erfolgt mittels eines Gasbrenners, der an der kurzen Seite des Ofens angeordnet ist. In Abbildung 26 befindet sich der Brenner an der linken Seite. In den beiden langen Seiten des Ofens kann je ein Seitenteil der Größe 45 cm x 45 cm entfernt werden (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27), um an dieser Stelle vertikal anzuordnende Probekörper einzubauen. Eine Deckenplatte des Ofens kann ebenfalls abgenommen werden um Probekörper horizontal einzubauen und von der Unterseite zu beflammen. Über die Steuerung des Ofens ist es möglich im Ofen Temperaturen entsprechend verschiedener Temperaturzeitkurven herzustellen. Relevant ist in diesem Fall die ETK, siehe Abbildung 29.

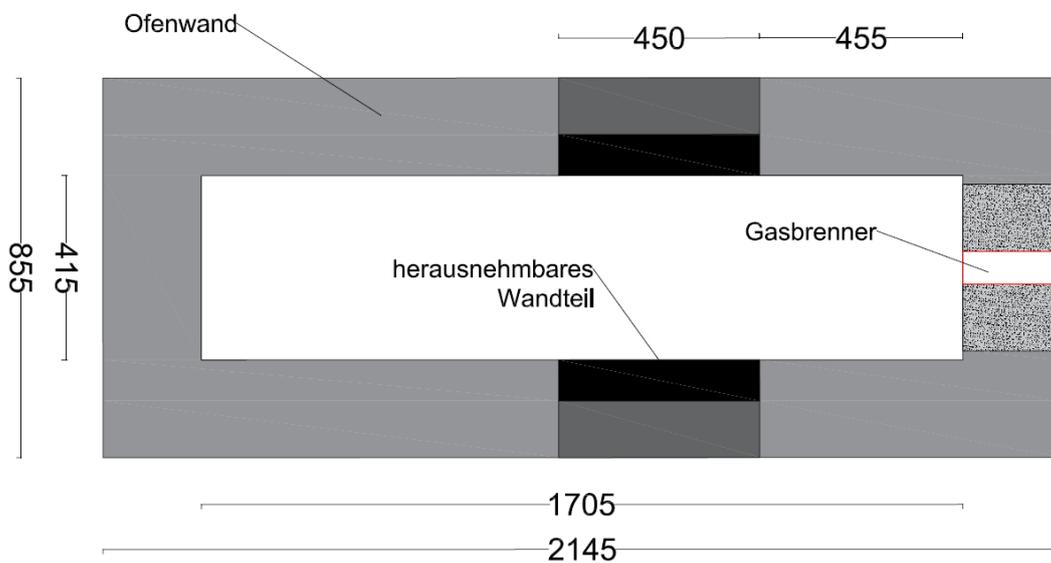


Abbildung 26: Draufsicht kleiner Prüfofen

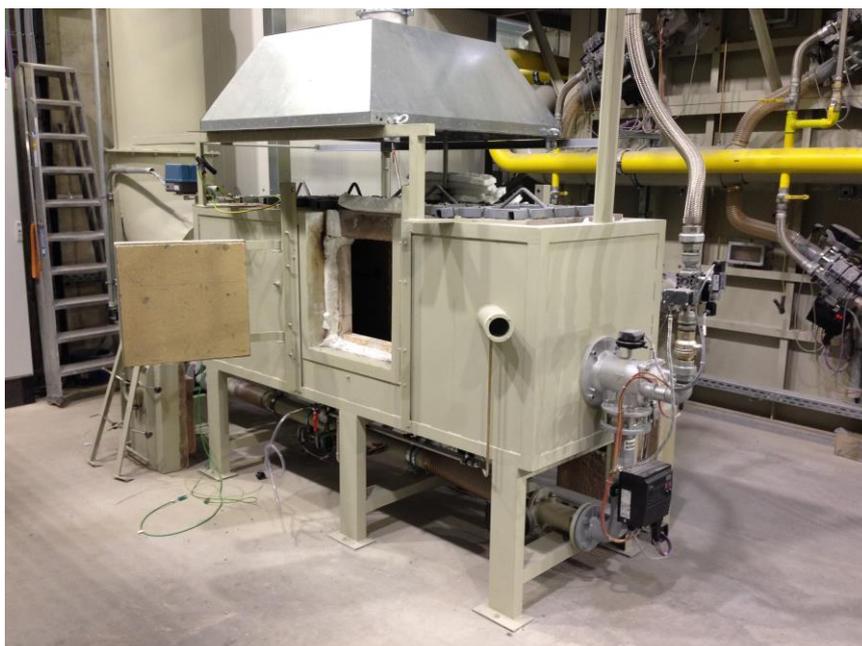


Abbildung 27: Seitenansicht kleiner Prüfofen

5.3 Durchführung der Versuche

Die Probekörper wurden mithilfe einer Vorrichtung (siehe Abbildung 28) als Wandbauteil in den Ofen eingebracht. Diese Vorrichtung diente zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Versuche, insbesondere der ersten und zweiten Leitungsabstützung. Die verbleibende Restöffnung um den Probekörper wurde mit Mineralfaserwolle mit einem Schmelzpunkt $> 1000\text{ °C}$ verschlossen. Die Leitungslänge im Ofen betrug bei allen Versuchen einheitlich 300 mm. Diese Leitungslänge im Ofen war bedingt durch die Abmessungen des Ofens (siehe 5.2). Die Module wurden mit der Temperatureinwirkung nach ETK beansprucht (siehe Abbildung 29).

$$T = 20 + 345 * \log(8t + 1) \quad (4)$$

Die Bedingungen entsprachen damit weitestgehend den Anforderungen nach DIN EN 1363-1 und DIN EN 1366-3, siehe dazu Absatz 4.9. Abweichungen zu den dort genannten Bedingungen ergeben sich bei der Leitungslängen innerhalb des Ofens, sowie die nicht durchgeführten Tests mittels Wattebausch. Entscheidend ist außerdem, dass die Abschottungen nicht in einer Normwandkonstruktion eingebaut sind, sondern in Holzmodulen.



Abbildung 28: Tragkonstruktion für Module

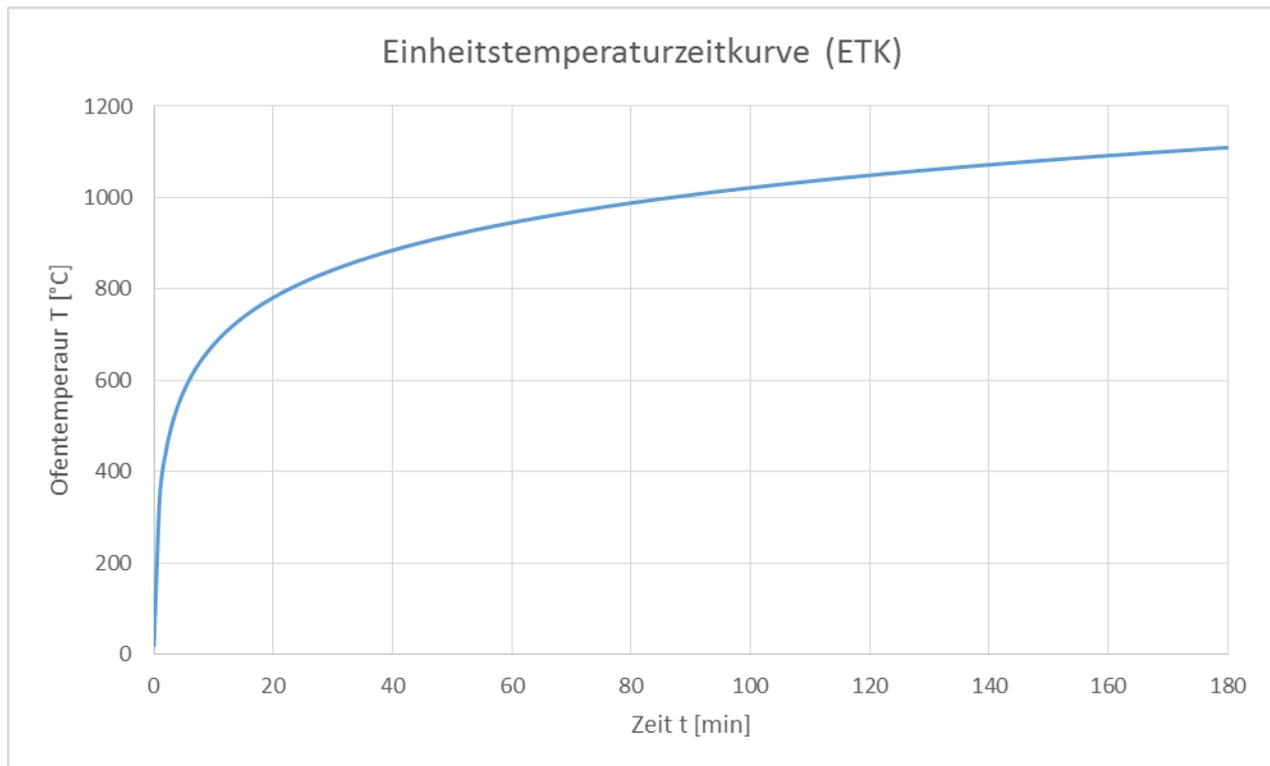


Abbildung 29: Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 [60]

5.4 Ergebnisse der Vorversuche

5.4.1 Allgemeines

Für alle Versuche wurden die visuellen Beobachtungen dokumentiert. Weiterhin wurden bei jedem Versuch an unterschiedlichen Messstellen die Temperaturen während des Versuchs erfasst. Einige der Messstellen befanden sich innerhalb der Module, die anderen auf der Oberfläche der feuerabgewandten Seite, sowie auf den Leitungen bzw. auf Teilen der Abschottungen. Die Lage der Messstellen orientierte sich an den Vorgaben aus DIN EN 1366-3. Alle Versuche wurden von der unbeflammten Seite gefilmt. Von der Brandseite konnte ebenfalls eine Videoaufnahme, mittels einer speziellen Ofenkamera, erfolgen. Die Videos ermöglichen im Nachhinein eine genauere Auswertung und Präzisierung der visuellen Beobachtungen während des Versuchs. Weiterhin wurden mithilfe der Thermografiekamera Fluke Ti480 bei vielen der Versuchen Thermografiebilder aufgenommen, um die Temperaturentwicklung am Probekörper global erkennen zu können und nicht nur an einzelnen Messstellen. Die Temperaturen, die durch die Thermografieaufnahmen abgebildet werden sind qualitativ zu sehen. Durch die vielen verschiedenen Oberflächen und deren unterschiedliche Emissivität kann bei der Kamera keine Einstellung vorgenommen werden, die verlässliche quantitative Messergebnisse liefert.

Die Details zu den durchgeführten Versuchen sind in [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70] [71, 72, 73, 74, 75, 76] dargestellt.

5.4.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vorversuche werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt. Eine Beschreibung der Prüfbedingungen ist in Absatz 5.3 erfolgt. In Tabelle 9 bis Tabelle 13 werden zu den einzelnen Versuchen die Zeitpunkte angegeben zu denen an einer beliebigen Messstelle eine Temperaturerhöhung um 180 K gemessen wurde. Damit wird das Leistungskriterium „Wärmedämmung“ (I) betrachtet. Das Leistungskriterium Raumabschluss (E) wurde bei fast allen Versuchen über die gesamte Versuchsdauer aufrechterhalten. Die Ausnahme stellen die Versuche mit der Brandschutzmanschette dar. Bei diesen Versuchen OSB_01 und BSH_01 versagte der Raumabschluss aufgrund anhaltender Flammenbildung bereits nach 48 bzw. 46 Minuten, beim Versuch OSB_02 bereits nach 24 Minuten. Lediglich beim Versuch BSH_02 kam es nicht zum Versagen des Raumabschlusses. Diese Versuchsergebnisse lassen sich vermutlich auf ein Einbaudetail zurückführen, genauere Informationen dazu folgen in den nächsten beiden Punkten.

Die Versuchsbezeichnung besteht aus den Bestandteilen „Abschottungssystem“, „Modulart“ und der Zahl 01 oder 02, die angibt, ob es sich um den ersten oder zweiten der jeweils gleichen Versuche handelt. Die farbliche Kennzeichnung ordnet den Ergebnissen, wie in Tabelle 8 zu sehen, die jeweils erreichte Feuerwiderstandsklasse (EI) zu.

Tabelle 8: Zuordnung entsprechende Feuerwiderstandsklasse nach DIN EN 13501-2

entsprechende Feuerwiderstandsklasse*	Farbe
EI 30	
EI 60	
EI 90	
EI 120	

* unter Berücksichtigung teilweise abweichender Prüfbedingungen und von den Anwendbarkeitsnacheisen teilweise nicht abgedeckten Leitungskonfigurationen

Tabelle 9: Versagen Wärmedämmkriterium Kabelmanschette

Versuch	Zeit [min]
Brandschutzkabelmanschette_OSB_01	84
Brandschutzkabelmanschette_OSB_02	72
Brandschutzkabelmanschette_BSH_01	85
Brandschutzkabelmanschette_BSH_02	87

Tabelle 10: Versagen Wärmedämmkriterium Weichschott

Versuch	Zeit [min]
Platten-Weichschott_OSB_01	57
Platten-Weichschott_OSB_02	75
Platten-Weichschott_BSH_01	62
Platten-Weichschott_BSH_02	72

Tabelle 11: Versagen Wärmedämmkriterium Brandschutzrohrschale

Versuch	Zeit [min]
Brandschutzrohrschale_OSB_01	118
Brandschutzrohrschale_OSB_02	110
Brandschutzrohrschale_BSH_01	>120
Brandschutzrohrschale_BSH_02	>120

Tabelle 12: Versagen Wärmedämmkriterium Brandschutzbandage

Versuch	Zeit [min]
Brandschutzbandage_OSB_01	72
Brandschutzbandage_OSB_02	68
Brandschutzbandage_BSH_01	113
Brandschutzbandage_BSH_02	119

Tabelle 13: Versagen Wärmedämmkriterium Rohrmanschette

Versuch	Zeit [min]
Brandschutzmanschette_OSB_01	-*
Brandschutzmanschette_OSB_02	-*
Brandschutzmanschette_BSH_01	-*
Brandschutzmanschette_BSH_02	>120

* bei diesen Versuchen konnte keine Temperaturüberschreitung ermittelt werden. Relevant war in diesem Fall das Versagen des Kriteriums "Raumabschluss".

5.4.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Es ist festzustellen, dass, bis auf eine Ausnahme, bei allen durchgeführten Versuchen die für Leitungsabschottungen relevanten Leistungskriterien "Wärmedämmung" und "Raumabschluss" für mindestens 60 Minuten eingehalten wurden (EI 60 nach DIN EN 13501-2). Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse geordnet nach den verwendeten Abschottungssystemen interpretiert. Grundlagen dafür sind die Versuchsberichte (siehe 5.4.1).

5.4.3.1 Brandschutzkabelmanschette

Bei den Versuchen mit der Brandschutzkabelmanschette wurden insgesamt gute Ergebnisse erzielt. Meist wurde eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten nur um einige Minuten verfehlt. Es kommt ca. in den ersten zehn Versuchsminuten zum Rauchdurchtritt, was keinen Unterschied zu Versuchen in Massivbauteilen darstellt. Im späteren Versuchsverlauf, ca. ab Minute 60 kam es erneut zur Rauchentwicklung, die bis zum Versuchsende zunahm. Die Rauchentwicklung spielte sich in einem akzeptablen Rahmen ab. Die Ergebnisse in den BSH-Modulen waren durchgehend besser als die in den OSB-Modulen. Die Temperaturüberschreitungen ergaben sich vor allem auf dem Kabelumfang bzw. auf dem Metallgehäuse der Manschette. Grund dafür könnten die gewählten Kabel sein. Diese wiesen einen größeren Durchmesser auf, als in der ETA für die Kabelmanschette zugelassen.

5.4.3.2 Weichschott

Das verwendete Platten-Weichschott lieferte insgesamt die schlechtesten Ergebnisse. Die Oberflächentemperaturen auf den Leitungen stiegen schnell stark an, auch die Temperatursensoren auf der Abschottungsoberfläche zeigten starke Temperaturerhöhungen. Dennoch wurde auch hier in drei von vier Versuchen eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erreicht. Die Schwelle zur Erreichung von EI 90 war jedoch recht weit entfernt. Der Temperaturanstieg auf den Kabeln ist, zumindest teilweise, auf deren große Durchmesser zurückzuführen, die nicht vom Anwendbarkeitsnachweis abgedeckt waren. Auffallend war bei den Versuchen der vergleichsweise starke Rauchdurchtritt zu Beginn und gegen Ende der Versuche. Auch konnte beobachtet werden, dass sich die durchgeführten Kabel trotz Abstützungsvorrichtung auf der Innen- und Außenseite während der Versuche absenkten. Dies fördert die Entstehung von Spalten. Durch den Abbrand des umliegenden Holzes bleibt die Weichschottplatte, die auf der Brandseite verbaut ist, nicht fest im Bauteil eingespannt. Lockert sich die Platte kommt es zur Bildung eines Spalts an der Stelle, an der die Weichschottplatten bei der Montage zusammengesetzt wurden. Weiterhin ist durch den Abbrand des Holzes und die damit verbundene Lockerung der Platte im Laufe des Versuchs die Möglichkeit gegeben, dass die Flammen aus dem Ofen hinter die Platte auf der Brandseite gelangen und somit der Brand in den Hohlraum zwischen den beiden Weichschottplatten vordringen kann. Dies könnte der Grund für die starke Temperaturerhöhung und die starke Rauchentwicklung gegen Versuchsende sein.

5.4.3.3 Brandschutzrohrschale

Die Anwendung einer Brandschutzrohrschale in Verbindung mit einem unisolierten Kupferrohr lieferte sehr gute Ergebnisse. Es konnte bei allen Versuchen eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht werden. Bei der Anwendung in BSH-Modulen sogar bei beiden Versuchen EI 120. Auch bei diesen Versuchen zeigte sich also ein Vorteil bei der Verwendung von BSH-Modulen gegenüber der Verwendung von OSB-Modulen.

5.4.3.4 Brandschutzbandage

Die Brandschutzbandage wurde verwendet, um die Durchführung eines isolierten Kupferrohrs abzuschotten. Bei diesem Versuchsaufbau zeigten sich die größten Unterschiede zwischen der Anwendung in OSB- und BSH-Modulen. Bei den Versuchen in OSB wurde die Grenze der Temperaturerhöhung bereits nach ca. 70 Minuten erreicht, in den BSH-Modulen dagegen konnten die Leistungskriterien weit über 90 Minuten, bis nahezu 120 Minuten aufrechterhalten werden. Für diese großen Unterschiede könnten bauartspezifische Materialeigenschaften sowie die Einbausituation, die mit den unterschiedlichen Wanddicken zusammenhängt, verantwortlich sein.

5.4.3.5 Brandschutzmanschette

Bei der Anwendung einer Brandschutzrohrmanschette in Holzmodulen zeigten sich bei drei von vier Versuchen bereits früh im Versuch Probleme bei der Aufrechterhaltung des Raumabschlusses. Das Kriterium „Wärmedämmung“ wurde bei diesen Versuchen nicht relevant. Dies kann auch auf die kurzen Versuchszeiten von unter 50 Minuten zurückgeführt werden. Bei einem Versuch konnte allerdings eine Versuchsdauer von über 120 Minuten erreicht werden, ohne dass ein Leistungskriterium versagte. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich um ein Montagedetail handelt, welches bei der Anwendung im Holz im Vergleich zur Anwendung in Massivbauteilen deutlich stärker bzw. überhaupt zum Tragen kommt. Bei diesem einen Versuch wurde ein Arbeitsschritt beim Einbau der Abschottung auf andere Art und Weise ausgeführt.

5.4.3.6 Oberflächentemperatur der Holzmodule

Die Oberflächentemperaturen auf der Holzoberfläche der Module waren generell nicht als kritisch anzusehen. Bei den OSB-Modulen waren die Temperaturen jedoch durchschnittlich höher als bei den BSH-Modulen. Die Messwerte der Temperaturen an den unterschiedlichen Messstellen waren bei den OSB-Modulen gleichmäßiger (um den Mittelwert) als die bei den BSH-Modulen. Tabelle 14 belegt das Beschriebene quantitativ.

Tabelle 14: Temperaturen Holzoberfläche (Module)

	Oberflächentemperaturerhöhung Holzoberfläche (90min)							
	Kabelmanschette		Weichschott		Bandage / Conlit		Rohrmanschette	
	BSH	OSB	BSH	OSB	BSH	OSB	BSH	OSB
Durchschnittliche Temperaturerhöhung [K]	26,6	69,1	28,2	60,2	32,5	71,9	22,2	nicht mögl.
Standardabweichung	13,9	10,1	9,7	11,9	11,2	7,7	17,5	nicht mögl.

	BSH	OSB
Mittelwert Temperaturerhöhung [K]	27,4	67,1
Mittelwert der Standardabweichung	13,1	9,9

Bei genauerer Betrachtung der Temperaturverläufe ist Gleiches festzustellen. Bei den BSH-Modulen ergeben sich 2 Bündel von Temperaturverläufen, das höherliegende beinhaltet die Messstellen seitlich und oberhalb der Durchführung, das tieferliegende die Messstellen die auf der Oberfläche weiter entfernt von der Durchführung liegen sowie die Messstelle unterhalb der Durchführung. Bei den OSB-Modulen liegen die eben zweitgenannten zwar auch unterhalb den erstgenannten Verläufen, es ergibt sich allerdings ein eher fließender Übergang.

Bei den BSH-Modulen nehmen die Temperaturen auf der Holzoberfläche in größerer Entfernung zur Durchführung deutlich ab. Bei den OSB-Modulen stellt sich eine eher gleichmäßige Temperaturerhöhung über die gesamten Module ein. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Eine mögliche Ursache ist, dass sich heiße Gase zwischen den Schichten des Aufbaus

verteilen können und so für einen gleichmäßigen Temperaturanstieg auf der Oberfläche sorgen. Das Beschriebene wird beispielhaft anhand der beiden folgenden Abbildungen gezeigt. Die Thermoelemente, deren Verläufe in Abbildung 30 dargestellt sind, sind wie folgt angeordnet:

- TE 14: oberhalb der Durchführung
- TE 16, 17: seitlich der Durchführung
- TE 15: unterhalb der Durchführung
- TE 18: im oberen, rechten Eck 110 mm von den Modulrändern entfernt
- TE 19: 25 mm von der Oberkante des Moduls entfernt, mittig

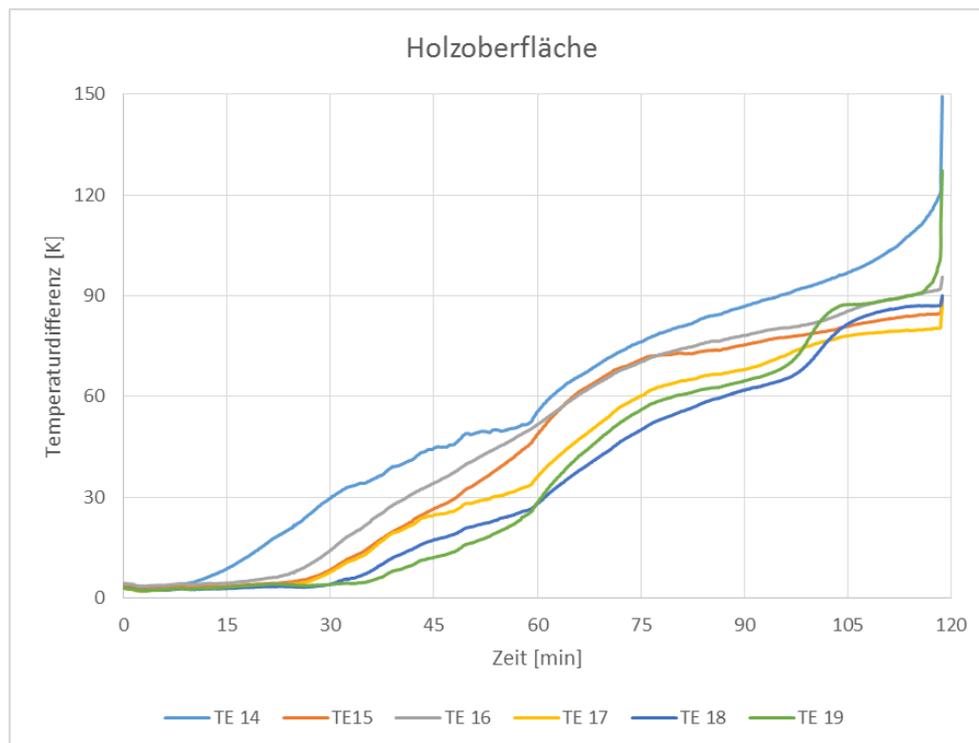


Abbildung 30: Temperaturverläufe Holzoberfläche Brandschutzkabelmanschette in OSB-Modul

Die Thermoelemente, deren Verläufe in Abbildung 31 dargestellt sind, sind wie folgt angeordnet:

- TE 14: oberhalb der Durchführung
- TE 16, 17: seitlich der Durchführung
- TE 15: unterhalb der Durchführung
- TE 18: im oberen, rechten Eck 110 mm von den Modulrändern entfernt
- TE 19: 50 mm von der Oberkante des Moduls entfernt, mittig
- TE 20: im oberen, linken Eck 50 mm von den Modulrändern entfernt

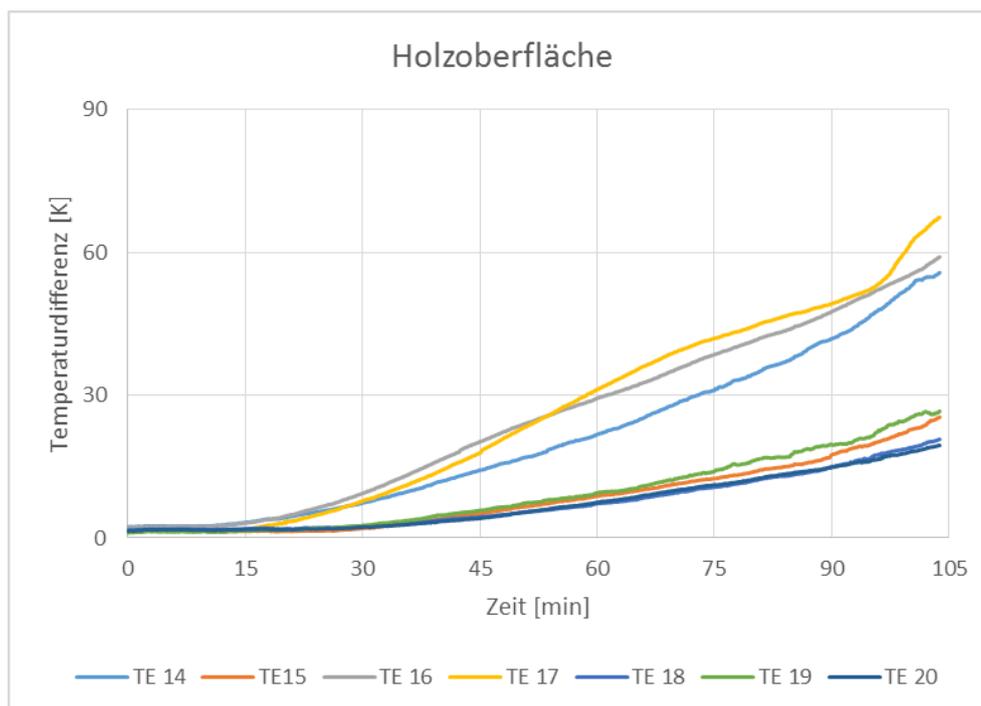


Abbildung 31: Temperaturverläufe Holzoberfläche Brandschutzkabelmanschette in BSH-Modul

5.4.3.7 Innentemperaturen der Holzmodule

Temperaturmessungen innerhalb der durchdrungenen Bauteile sind nach Prüfnorm nicht vorzusehen und sind demnach auch nicht von Relevanz zur Festlegung erzielter Feuerwiderstände. Die Anordnung TE im Innern der Holzmodule erfolgte aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten. Sie dienen zur Untersuchung des Wärmedurchgangs durch die verschiedenen Modulaufbauten.

Es wurden TE in zwei Bauteiltiefen / Schichten angeordnet. In den OSB-Modulen wurden die TE bei der Herstellung der Module zwischen den Schichten eingebracht. Die Anordnung der TE innerhalb der BSH-Module erfolgte mithilfe von Bohrungen. Die Lage der Bohrungen entsprach dabei den Schichtübergängen der OSB-Module, sodass die TE in allen Versuchen den gleichen Abstand zur unbeflammten Oberfläche aufwiesen.

- Schicht 1: 24 mm hinter der unbeflammten Oberfläche. In den OSB-Modulen entspricht dies dem Übergang zwischen der ersten OSB-Platte und der ersten Steinwolldämmplatte
- Schicht 2: 54 mm hinter der unbeflammten Oberfläche. In den OSB-Modulen entspricht dies dem Übergang zwischen der ersten Steinwolldämmplatte und der zweiten OSB-Platte

Als ein Ergebnis der Temperaturmessung innerhalb der Module sind beispielhaft die Temperaturerhöhungen des BSH-Moduls aus Versuch BSH_Kabelmanschette_02 in Abbildung 32 dargestellt. Die Temperaturen wurden im oberen, linken Eck des Moduls gemessen (TE 20, TE 22, TE 25). An der Abbildung kann abgelesen werden wie sich die Temperaturen im Modul und auf der Moduloberfläche an derselben Stelle über die Versuchszeit erhöhen. Auf der Holzoberfläche hat sich zu Versuchsende die Temperatur lediglich um 22,6 K erhöht. Innerhalb des Moduls, in einer Tiefe von 54 mm unter der Oberfläche, also nur ca. 20-25 mm von der Abbrandebene entfernt hat sich die Temperatur um 63,4 K erhöht. An der Abbrandebene beträgt die Temperatur ca. 300 °C. Die Ofentemperatur beträgt zum selben Zeitpunkt ca. 1050 °C. Es ist zu erkennen wie stark die Dämmwirkung der Kohleschicht und des verbliebenen Holzes ist.

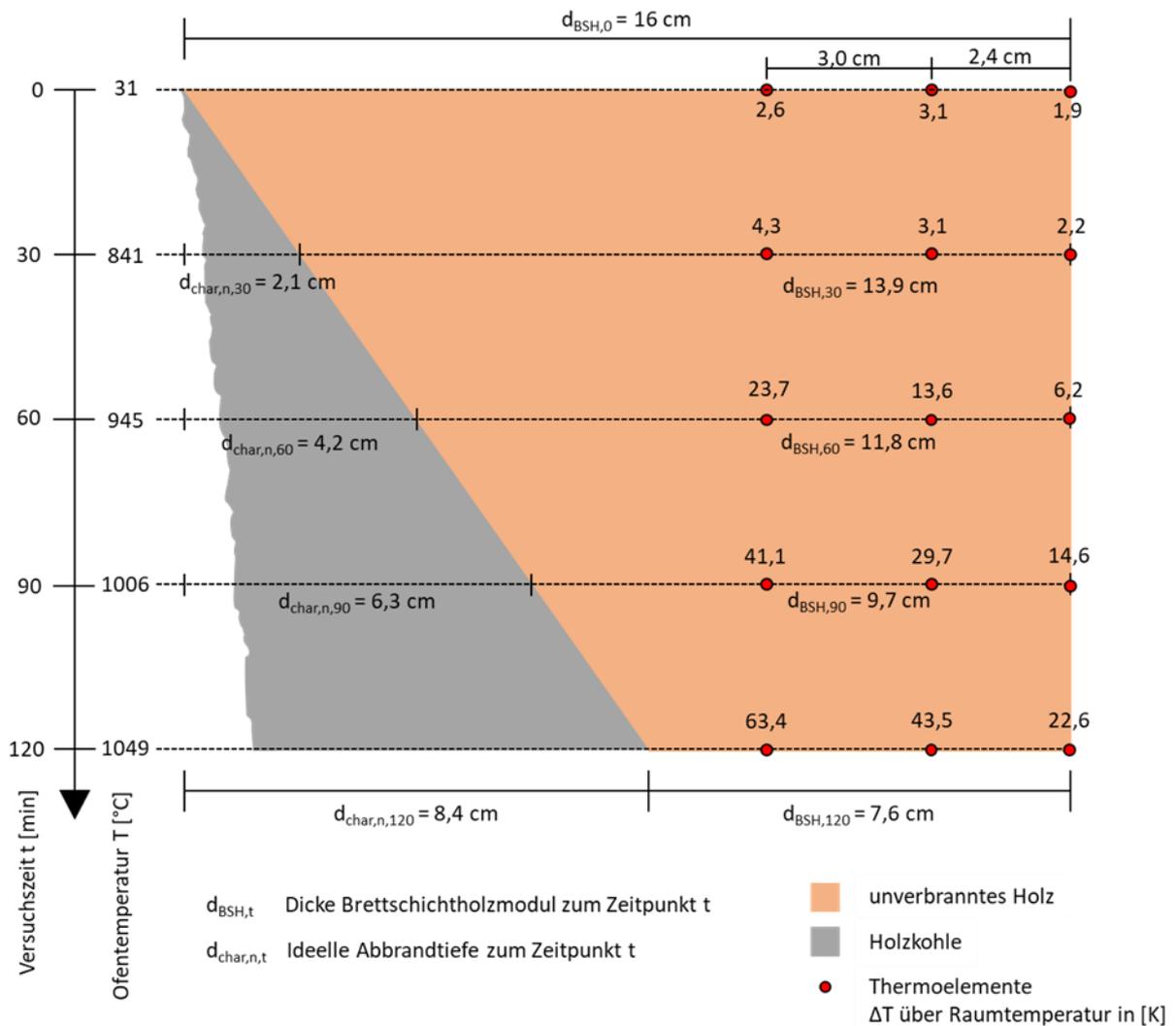


Abbildung 32: Temperaturerhöhungen im BSH-Modul in Abhängigkeit der Zeit und der Ofenraumtemperatur

5.4.3.8 Verkohlung Modul-/ Wandfläche

Beim in den Vorversuchen verwendeten OSB-Modul konnte eine schollenartige Kohlebildung beobachtet werden. Mit der Zeit fielen im Brandversuch immer wieder „Schollen“ ab, bis die darunterliegende Dämmschicht komplett frei lag. Dieses Verhalten ist auf die geringe Dicke der Holzschicht und vermutlich auf den Holzwerkstoff OSB zurückzuführen. Im Vergleich dazu entstand beim BSH-Modul zu Beginn der Brandversuche zunächst ein Muster aus horizontalen Lienen, die die Leimfugen abbildeten. Anschließend entstanden vertikale Risse und es bildete sich ein kachelartiges Kohlemuster aus. Das Abfallen einzelner Kacheln konnte über die gesamte Versuchsdauer nur selten beobachtet werden. In Abbildung 33 sind die beschriebenen, unterschiedlichen Verkohlungsmuster dargestellt.

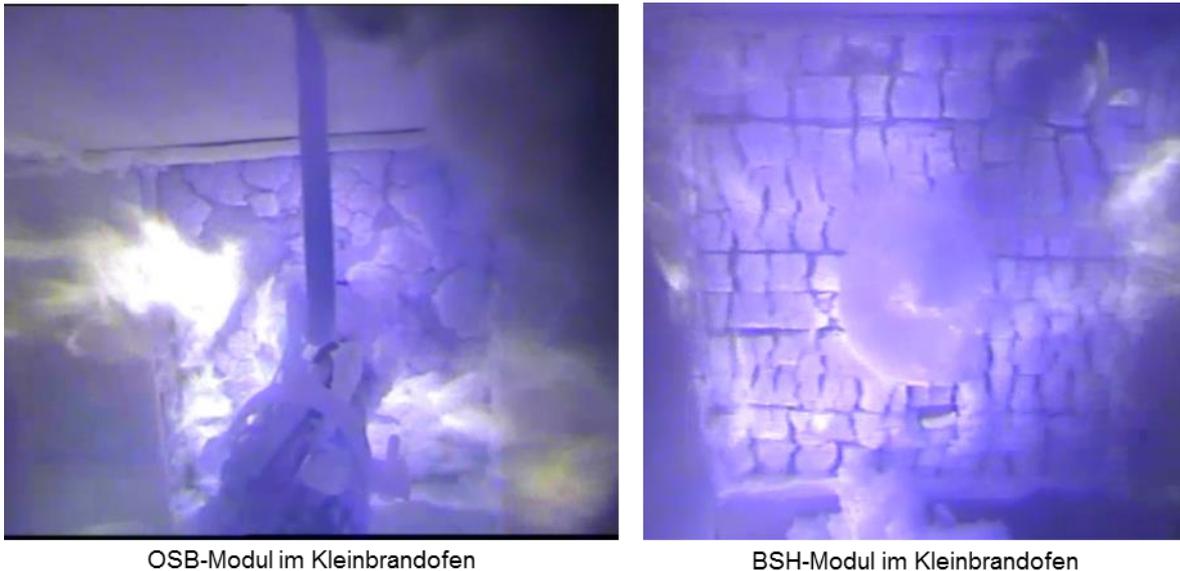


Abbildung 33: Verkohlungsmuster

5.4.3.9 Thermografie

Während der Versuche wurden Fotos mit einer Thermografiekamera aufgenommen. Die Bilder offenbaren heiße Bereiche und können dazu verwendet werden Schwachstellen zu identifizieren. In Abbildung 34 ist eine Aufnahme von jedem untersuchen Abschottungssystem dargestellt. Bei der Abschottung von Kabeln, sowohl mit der Brandschutzkabelmanschette als auch mit dem Weichschott ist eine erhöhte Temperatur im Bereich der Kabelzwickel festzustellen. Das Kupfer in den Kabeln stellt einen sehr guten Wärmeleiter dar. Zwischen den Kabeln kann sich die Hitze anstauen und durch die Zwickel austreten. Bei der Brandschutzrohrschale ist vor allem die starke Temperaturerhöhung im Bereich des Ringspalts auffallend. Auch ist die Oberseite im Bereich hinter der Durchführung erhitzt. Die weiterführende Rohrdämmung ist stumpf an die Rohrschale in der Durchführung gestoßen. Zwischen der Rohrschale und der passenden Bohrung strömen heiße Gase hindurch, die an der Stoßstelle austreten. Bei der Rohrmanschette zur Abschottung des Kunststoffrohrs hat sich lediglich das Rohr im oberen Bereich nahe der Durchführung erwärmt. Dies ist auf die heißen Gase zurückzuführen, die durch das offene Rohr strömen. Die Temperaturerhöhung an dieser Stelle ist allerdings gering, da sonst das Rohr schmelzen würde. Bei der Brandschutzbandage ist zu erkennen, dass diese um ihren gesamten Umfang und auf ihrer gesamten Länge gleichmäßig erwärmt ist. Dies spricht für eine gute Wärmeleitfähigkeit der Bandage selbst.

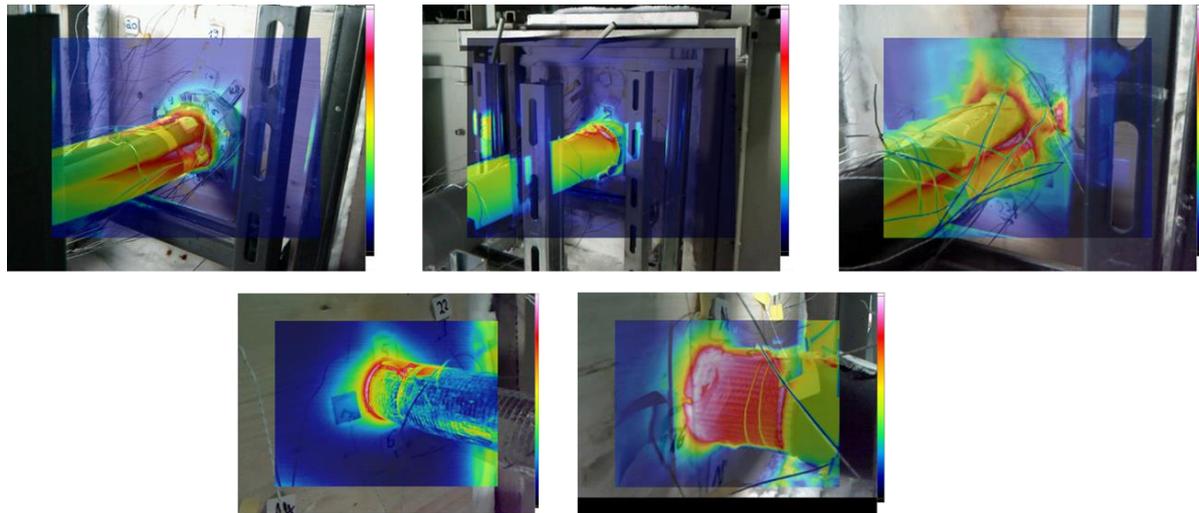


Abbildung 34: Thermografie Vorversuche (v. l. n. r. Brandschutzkabelmanschette, Brandschutzrohrschale, Rohrmanschette, Brandschutzbandage, Kabel-Weichschott)

5.4.4 Folgerungen für die Durchführung der Großbrandversuche

5.4.4.1 Brandschutzkabelmanschette

Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche scheint eine Kabelmanschette generell zur Anwendung in Holzbauteilen geeignet zu sein. In den Vorversuchen wurden gezielt Kabel mit Durchmessern gewählt, die nicht vom Anwendbarkeitsnachweis der Brandschutzkabelmanschette abgedeckt waren. Aufgrund der Temperaturüberschreitungen auf den Kabeloberflächen, werden für die Großbrandversuche Kabel mit kleineren Durchmessern verwendet. Die verwendete Kabelkonfiguration liegt dadurch im Anwendungsbereich des Anwendbarkeitsnachweises für Massiv- und Trockenbaukonstruktion. Sonst soll der Einbau der Brandschutzkabelmanschette unverändert übernommen werden.

5.4.4.2 Weichschott

Aufgrund der stark unterschiedlichen Leistung des Platten-Weichschotts in den Holzmodulen im Vergleich zu einer Anwendung in Massivbauteilen ist davon auszugehen, dass dieses Abschottungssystem für die Anwendung in den untersuchten Holzmodulen, bei dieser Art des Einbaus, nicht geeignet ist. Es fehlt eine bleibende Abstützung in den Randbereichen. Feuer und Rauch kann außerdem in den Bereich zwischen den beiden Platten des Weichschotts eindringen. Der während allen Versuchen beobachtete starke Rauchdurchtritt lässt sich nach Meinung der Autoren nicht mit den bauordnungsrechtlichen Schutzzielen vereinbaren. Weiterhin ist der Aufbau eines Platten-Weichschotts im Vergleich zu den anderen untersuchten Abschottungssystemen fehleranfällig. Beim direkten Einbau in Holzmodule können leicht Schwachstellen entstehen, die bei einem Brand die Ausbreitung von Feuer und Rauch ermöglichen. Das Abschottungssystem „Weichschott“ wird aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen in den Großbrandversuchen nicht weiter untersucht werden.

5.4.4.3 Brandschutzrohrschale

Die Anwendung der Brandschutzrohrschale in den Holzmodulen lieferte Feuerwiderstandsdauern von über 90 Minuten, in den BSH-Modulen sogar über 120 Minuten. Rauch trat bei diesen Versuchen nur in geringen Maßen auf. Der Rauchdurchtritt könnte durch zusätzliches Anwenden einer Dichtmasse minimiert werden. Die Ergebnisse der Versuche mit Brandschutzrohrschalen sollen bei unverändertem Einbau in Großbrandversuchen belegt werden.

5.4.4.4 Brandschutzbandage

Aufgrund der positiven Ergebnisse aus den Vorversuchen soll die Brandschutzbandage auch bei den Großbrandversuchen in gleicher Art in den BSH-Modulen angewendet werden. Eventuell kann durch die weniger direkte Beflammung beim Großbrandversuch sogar bei gleichem Aufbau eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten erreicht werden. Bei den Vorversuchen wurde die Temperatur zur Einhaltung des Wärmedämmkriteriums weiterhin lediglich einige Minuten zu früh überschritten. Die Anwendung der Brandschutzbandage in den OSB-Modulen lieferte deutlich schlechtere Versuchsergebnisse. Der Grund dafür könnte mit weiteren Versuchen oder auch mithilfe von Brandsimulationen untersucht werden. Es ist zu vermuten, dass die Unterschiede in den Ergebnissen mit der Bauteildicke und dem damit verbundenen Abstand der Bandagen auf beiden Bauteilseiten zusammenhängen. Die Anwendung der Brandschutzbandage in OSB-Modulen soll daher in diesem Vorhaben nicht weiterverfolgt werden (siehe dazu auch Punkt 5.4.4.6).

5.4.4.5 Brandschutzmanschette

Ein positives Versuchsergebnis und Versuchsergebnisse anderer Forschungsstellen ([8], [77]) lassen darauf schließen, dass die Brandschutzrohrmanschette grundsätzlich für die Anwendung in Holz geeignet ist. Bei genauer Betrachtung der Versuche (Aufzeichnungen von Versuchsbeobachtungen, Versuchsaufbauten, Videos) konnte festgestellt werden, dass die Verfüllung des Ringspalts mit großer Wahrscheinlichkeit die Ursache für das Gelingen, oder nicht Gelingen des Versuchs ist. Wird der Ringspalt nicht in ausreichender Tiefe verfüllt, kommt es nach einer gewissen Zeit der Beflammung zum Hinterbrennen der Manschette und der Raumabschluss kann nicht mehr aufrechterhalten werden. In den Vorversuchen war die Verfüllung des Ringspalts durch die kleine Ringspaltbreite von 1-2 mm nur schwer in ausreichender Tiefe möglich. Beim letzten, gelungenen Versuch wurde die Ringspaltverfüllung handwerklich unterschiedlich zu den ersten drei Versuchen mit Rohrmanschetten durchgeführt, sodass er umlaufend deutlich tiefer verfüllt werden konnte. In den Großbrandversuchen sollte daher die Verfüllung des Ringspalts in ausreichender Tiefe sichergestellt werden. Es wird dazu ein umlaufender Mindestspalt von 5 mm vorgesehen. Dies soll die Verfüllung des Ringspalts mit gängigen Methoden vereinfachen, sodass dies auch in der praktischen Anwendung möglich ist.

Es soll in den weiteren Versuchsaufbauten verifiziert werden, ob sich das positive Ergebnis des letzten durchgeführten Versuchs reproduzieren lässt.

5.4.4.6 Module

Generell kann festgestellt werden, dass bei nahezu allen Versuchen eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erreicht wurde, dies entspricht der bauaufsichtlichen Anforderung "hochfeuerhemmend", welche in der Regel für den Holzbau in Deutschland (bis Gebäudeklasse 4) relevant ist. Dennoch ergaben alle Versuchsaufbauten in BSH-Modulen bessere Ergebnisse als die gleichen Aufbauten in OSB-Modulen. Die OSB-Module sind kostengünstiger und handwerklich, ohne spezielle Maschinen herzustellen und weisen ein geringeres Gewicht auf. Die BSH-Module sind dagegen homogener und daher berechenbarer. Dies ist vorteilhaft bei der Anwendung der Module in neuen Situationen. Sie sind außerdem mit den entsprechenden Werkzeugen / Maschinen, die in einem Holzbaubetrieb ohnehin vorhanden sind, schnell, einfach und passgenau herzustellen. Aufgrund der deutlich besseren Versuchsergebnisse und der nach Abwägung einfacheren, maschinellen Herstellung der BSH-Module, sollen in den Großbrandversuchen nur noch diese weiterverwendet werden. Die Dicke der Module hat sich in den Vorversuchen als ausreichend erwiesen.

6. Großbrandversuche

6.1 Versuchsprogramm

Die gewonnenen Erkenntnisse der Vorversuche wurden in zwei Großbrandversuchen validiert. Dabei wurden folgende Wandkonstruktionen verwendet.

1. Holzrahmenwand, dimensioniert in Anlehnung an Tabelle 51 aus DIN 4102-4 (Fassung 1994) [78]
2. BSP-Wand, dimensioniert nach DIN EN 1995-1-2 [32] für eine Brandbelastung von 120 Minuten

Vergleichbar zu der Vorgehensweise der Vorversuche wurden auch hier alle Durchführungen zweifach untersucht.

In beiden Wänden wurden im oberen Drittel jeweils acht BSH-Module eingesetzt, durch die Leitungen hindurchgeführt und abgeschottet wurden. Unter Verwendung von Holzkeilen wurden die BSH-Module innerhalb der Öffnungen zentriert. Die Befestigung der Holzmodule innerhalb der Wandkonstruktionen erfolgte mithilfe einer Verschraubung (Abbildung 35). Diese erfolgte mit 120 mm langen Schrauben (Durchmesser 5 mm) in einem Winkel von 45 °. Die Schrauben wurden in einem Abstand von 30 mm zum Modulrand gesetzt und reichen bis in die tragenden Elemente der Wandkonstruktion.

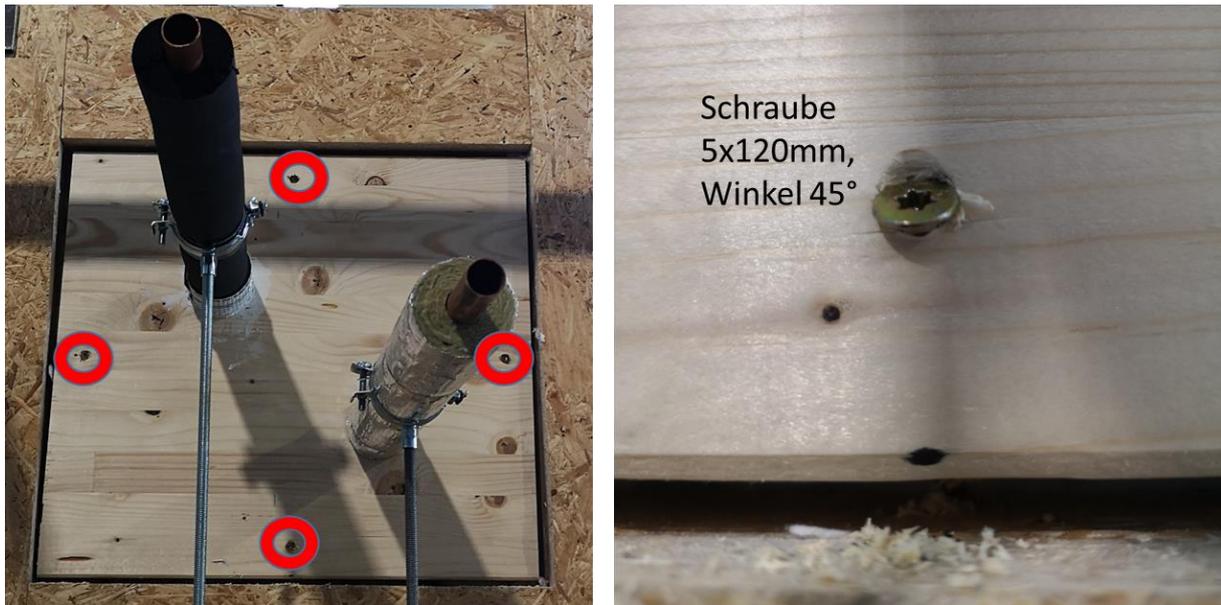


Abbildung 35: Verschraubung der Holzmodule

Die verwendeten Abschottungssysteme entsprechen bis auf das Weichschott denen aus den Vorversuchen. Dieses wurde aufgrund der Versuchsergebnisse nicht weiter untersucht. Anstelle eines Weichschotts wurde ein Modul mit mehreren Durchführungen untersucht. Mit dessen Hilfe sollten Erkenntnisse über erforderliche Abstände zwischen Durchführungen ermittelt und Effekte einer gegenseitigen Beeinflussung von mehreren Leitungsdurchführungen in einem Holzmodul untersucht werden.

Die Kabelkonfiguration wurde verändert um Ergebnisse erhalten zu können, die der tatsächlichen Situation in Holzgebäuden der GK 4 näher sind. Es wird nun die „kleine Kabelkonfiguration“ nach DIN EN 1366-3 verwendet. In Tabelle 15 sind die in den Großbrandversuchen verwendeten Leitungen zusammengefasst dargestellt. Die in dieser Kabelkonfiguration verwendeten Kabel sind, aufgrund der kleineren Durchmesser, alle vom Anwendbarkeitsnachweis der verwendeten Brandschutzkabelmanschette abgedeckt. Bei den Rohrleitungen ergeben sich im Vergleich zu den Vorversuchen keine Veränderungen (siehe diesbezüglich Absatz 5.1).

Tabelle 15: Leitungsauswahl Großbrandversuche

Art der Leitung	Maße		Material		Auswahlkriterium
Kupferrohr	Innendurchmesser	20mm	Kupfer		Üblich verwendete Leitung zum Warmwassertransport in Gebäuden bis GK 4
	Außendurchmesser	22mm			
Kunststoffrohr	Innendurchmesser	ca.104mm	PPH (Polypropylen)		Üblich verwendete Leitung zum Abwassertransport in Gebäuden bis GK 4
	Außendurchmesser	110mm			
				CU[KG/KM]	
Kabel(-bündel)	Kabeldurchmesser A1	13mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: PVC DIV4 Mantel: PVC DMV5	72	Kleine Kabelkonfiguration nach DIN EN 1366-3. Damit gelten die Versuchsergebnisse für Kabel bis zu einem Durchmesser von 21mm. Diese Kabelkonfiguration ist als repräsentativ anzusehen für die Belegung des Großteils der Abschottungen, die in Holzgebäuden der GK 4 zu finden sind. (Ausnahme Hausanschlussraum)
	Kabeldurchmesser A2	11,2-14,4mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: Gummi EI4 Mantel: Gummi EM2	72	
	Kabeldurchmesser A3	14,5mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: Polyethylen (VPE) Mantel: Polyolefin HM4	72	
	Kabeldurchmesser B	19mm	Leiter: Kupfer Aderisolation: PVC DIV4 Mantel: PVC DMV5	912	

6.2 Wandaufbauten

Für die Großbrandversuche wurden zwei zur heutigen Zeit typische Wandaufbauten verwendet. Zum einen eine Holzrahmenwandkonstruktionen, welche aus Ständern, einer dazwischenliegenden Dämmschicht und einer beidseitigen Beplankung besteht. Zum anderen eine massive BSP-Konstruktion, welche schwerer, dafür allerdings frei von Hohlräumen ist. Weitere Details zu den Wandaufbauten im Allgemeinen sind unter Punkt 4.4.1. zu finden.

6.2.1 Holzrahmenwand

Die Konstruktion der Holzrahmenwand wurde in Anlehnung an DIN 4102-4 Tabelle 51 aus dem Jahr 1994 ausgebildet. Danach ist für die Holzrippen ein Mindestmaß von 40 mm x 80 mm gefordert, eine beidseitige Beplankung mit je zwei Holzwerkstoffplatten (Dichte = 600 kg/m³) à 19 mm und eine zwischen den Rippen liegende Dämmschicht aus Mineralfaserplatten oder – Matten in einer Dicke von mindestens 100 mm. Bei der gewählten Konstruktion wurden als Beplankung leicht abweichend OSB-Platten in der Dicke 22 mm verwendet. Es ergibt sich beidseitig eine 6 mm stärkere Beplankung, was die Feuerwiderstandsfähigkeit der Wandkonstruktion leicht erhöhen sollte. Der Aufbau der Holzrahmenwand ist in Abbildung 36 dargestellt.

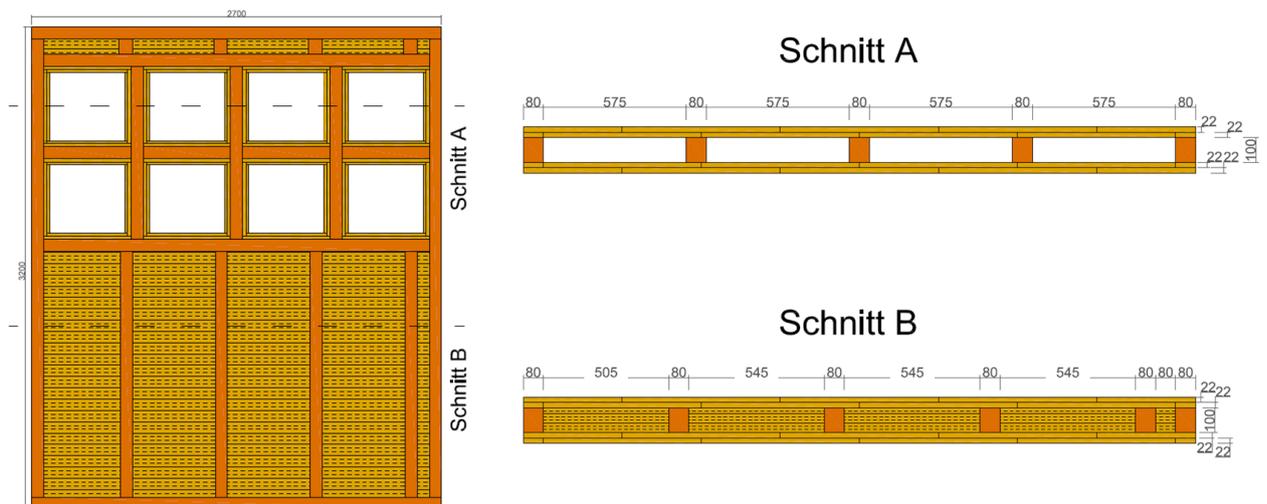


Abbildung 36: Aufbau der Holzrahmenwandkonstruktion

In der Wand wurden Öffnungen für das spätere Einsetzen der Module vorgesehen, wie in Abbildung 37 zu sehen. Hergestellt wurde die Wand von den müllerblaustein Holzbauwerken. Die Ausbildung der Öffnungsleibungen ist gesondert in Punkt 6.3.1 beschrieben.



Abbildung 37: Fertiger Aufbau Holzrahmenwand

6.2.2 Brettsperrholzwand

Die BSP-Wand besteht aus fünf Schichten (siehe Abbildung 38) mit den Stärken

- 40 mm
- 20 mm
- 40 mm

- 20 mm
- 40 mm

In Summe ergibt sich somit eine Wandstärke von 160 mm. Hergestellt wurde die Wand von der Firma Stora Enso.



Abbildung 38: Schichtaufbau BSP-Wand

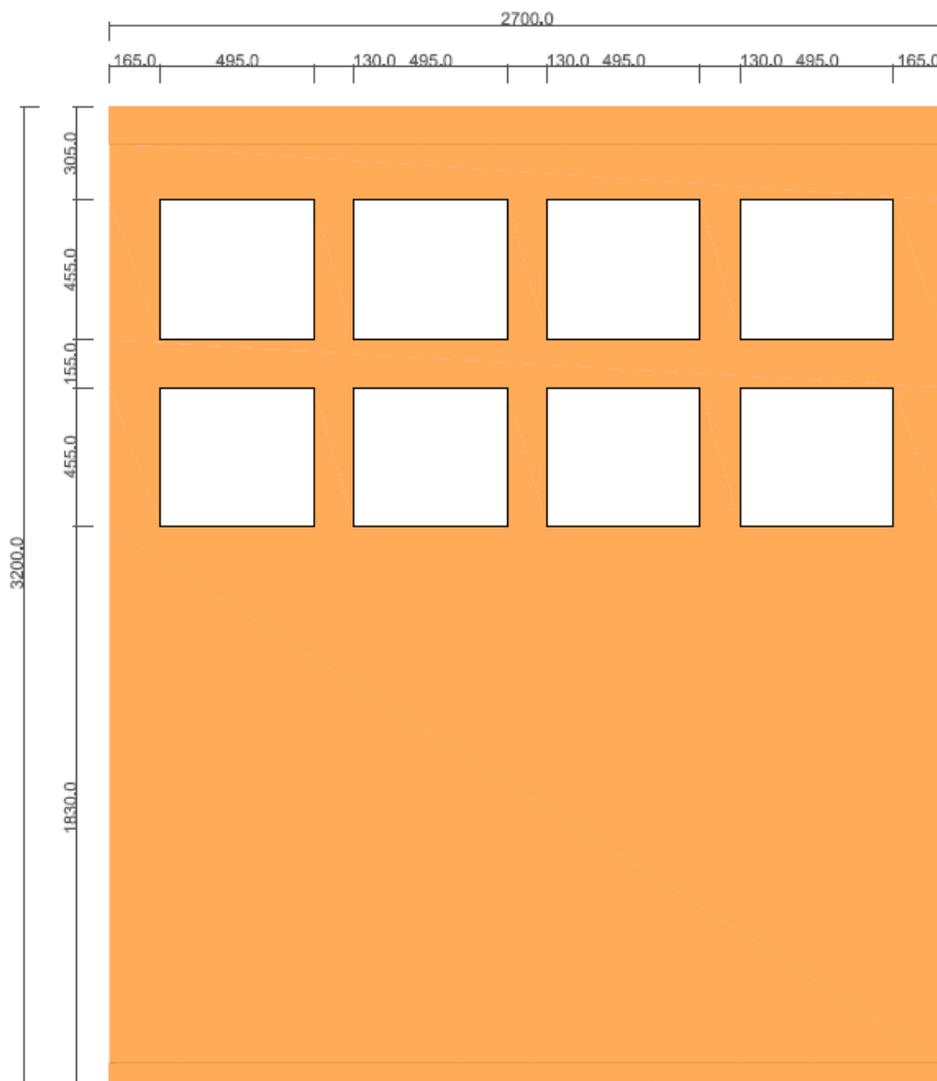


Abbildung 39: Brettsperrholz wandkonstruktion, Stärke 160mm

6.3 Aufbaudetails

6.3.1 Öffnungsleibung

Die Öffnungsleibung der Holzrahmenwand wurde mit zwei Schichten OSB-Platten ausgebildet. Die erste Schicht wies eine Stärke von 22 mm auf, die darunterliegende zweite Schicht eine Stärke von 18 mm. Die beiden Schichten wurden mit doppeltem Fugenversatz angeordnet. Insgesamt ergab sich so eine Stärke der Öffnungsleibung von 40 mm. Die Beplankung der Öffnungsleibung soll die Ständer und Riegel während eines Brandes ausreichend lange vor der Beteiligung am Brandgeschehen schützen.

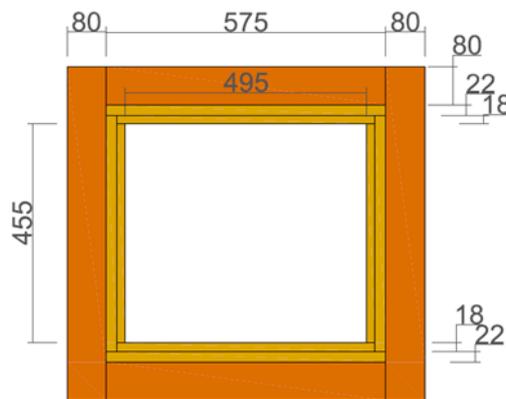


Abbildung 40: Detail Öffnungsleibung Holzrahmenwand

Nachfolgende Rechnung zeigt wie lange die OSB-Beplankung dem Feuer theoretisch Widerstand leisten kann.

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (1)$$

Mit:

$\beta_{0,\rho,t}$: Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate für andere Rohdichten als 450 kg/m³ und Werkstoffdicken kleiner als 20 mm

β_0 : Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate

→ Tabellenwert aus Tabelle 3.1 DIN EN 1995-1-2 → $\beta_0 = 0,9 \text{ mm/min}$

Umrechnung der Abbrandrate auf die Rohdichte:

Rohdichte der OSB-Platten nach Herstellerangaben: $\rho = \geq 600 \text{ kg/m}^3$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} = \sqrt{\frac{450}{600}} = 0,866$$

ρ_k charakteristische Rohdichte, in kg/m³

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} = \sqrt{\frac{20}{20}} = 1$$

h_p Werkstoffdicke, in Millimeter (an dieser Stelle wurden 20 mm angesetzt, da nach EC 5 die Formel für andere Rohdichten und kleinere Werkstoffdicken als 20 mm gilt; in diesem Fall wäre die Dicke 40 mm und damit größer als 20 mm)

$$\beta_{o,p,t} = \beta_0 k_p k_h = 0,9 * 0,866 * 1 = 0,7794 \text{ mm/min}$$

Wann ist die Öffnungsleibung rechnerisch abgebrannt?

$$d_{\text{char}} = \beta_{o,p,t} * t \tag{5}$$

Mit: $d_{\text{char}} = 40 \text{ mm}$ (Dicke Öffnungsleibung)

$$\beta_{o,p,t} = 0,7794 \text{ mm/min}$$

$$40 \text{ mm} = 0,7794 \text{ mm/min} * t$$

$$t = \frac{40 \text{ mm}}{0,7794 \text{ mm/min}} \approx \mathbf{51 \text{ min}}$$

Zusätzlich zur Öffnungsleibung waren die Ständer überdimensioniert. Nach DIN 4102-4 aus dem Jahr 1994 (nicht die aktuelle Version) sind Ständerbreiten von 40 mm ausreichend um eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten bei diesem Wandaufbau zu erreichen. Daher können beidseitig 20 mm der Ständer als Opferschicht angesehen werden. Bei einer Abbrandrate von 0,7 mm/min ergibt sich daraus eine weitere Schutzwirkung von ca. 28 Minuten. Zusammen ergibt sich somit eine Opferschicht, die der Brandbeanspruchung knapp 80 Minuten standhalten kann. Weiterhin wird die Öffnungsleibung beim Brandversuch nicht direkt beflammt, sondern befindet sich zwischen dem eingesetzten Modul und der eigentlichen Wand. Die Fuge wurde mit einem intumeszierenden Material verfüllt, welches die Fuge bzw. Öffnungsleibung selbst vor den Flammen schützt. Mit der Schutzwirkung des Intumeszenzmaterials und der vorgesehenen Opferschichten (Leibung und Ständer) sollen die wesentlichen Teile der Wand wirksam über 90 Minuten vor Brandeinwirkungen geschützt werden.

6.3.2 Modulbelegung und Anordnung

Folgender Tabelle kann entnommen werden, welche Leitungsarten und Abschottungssysteme in den einzelnen Modulen eingebaut waren.

Tabelle 16: Verwendete Leitungsarten und Abschottungssysteme

Modulnummer	Leitungsart (en)	Abschottung(en)
1,2	Kupferrohre (unisoliert, isoliert)	Brandschutzrorrschale, Brandschutzbandage
3,8	Kupferrohre (unisoliert, isoliert), Kabelbündel, Kunststoffrohr	Brandschutzrorrschale, Brandschutzbandage, Brandschutzmanschette, Brandschutzkabelmanschette
4,7	Kabelbündel	Brandschutzkabelmanschette
5,6	Kunststoffrohr	Brandschutzmanschette

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen, wie die Module in den Wandkonstruktionen angeordnet waren. Zu sehen ist die unbeflammte Seite.

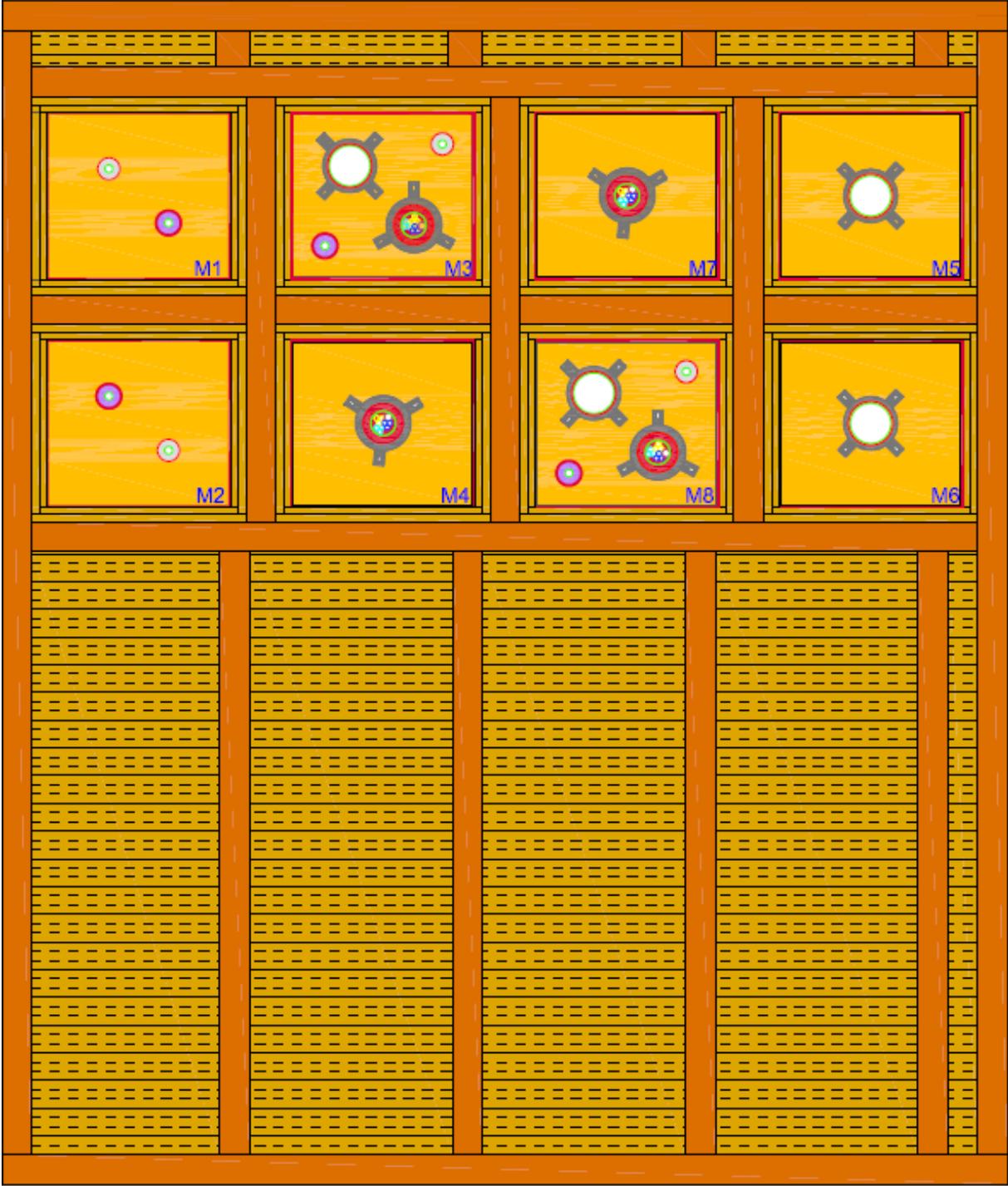


Abbildung 41: Modulanordnung Großbrandversuch B1

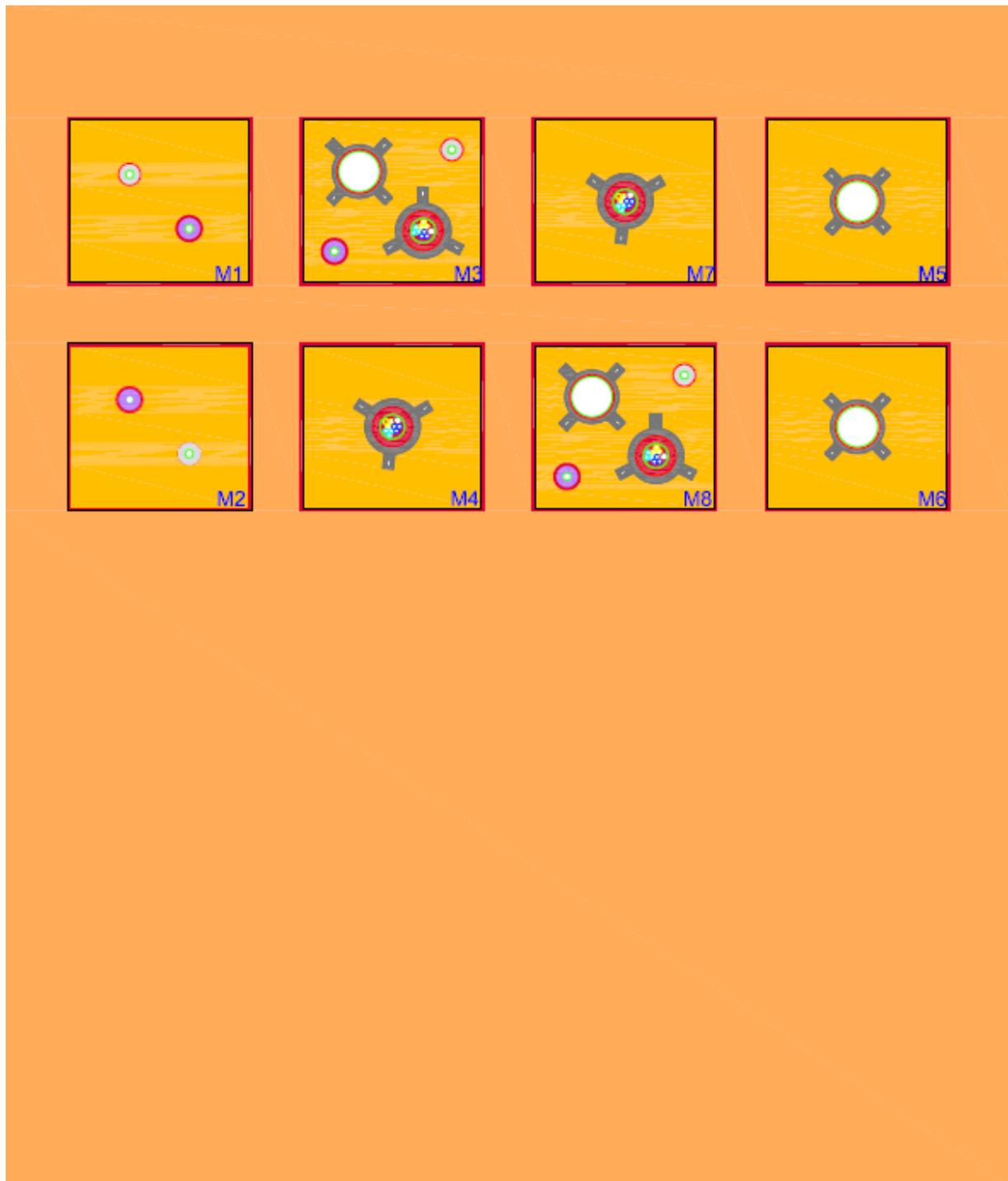


Abbildung 42: Modulanordnung Großbrandversuch B2

Abbildung 43 zeigt die fertigen Versuchsaufbauten. Zu sehen ist die später unbeflammte Seite des Versuchs B1 sowie die zu beflammende Seite der Wand für den Versuch B2. Der Wandprobekörper für den Versuch B2 ist auf dem Bild bereits in den Prüfofen eingebaut.



Abbildung 43: Versuchsaufbauten Großbrandversuche

6.3.3 Leitungsunterstützung

Die Länge der Leitungen betrug beidseitig der Durchführung 50 cm und entsprach somit der in DIN EN 1366-3 vorgegebenen Mindestlänge. Ofenseitig wurde eine Unterstützung der Leitungen in einem Abstand von 22 cm zur Moduloberfläche vorgesehen. Auf der unbeflammten Seite befanden sich Leitungsunterstützungen in Abständen von 22 cm sowie 40 cm zur Bauteiloberfläche. Für das Tragsystem auf der Brandseite wurden verzinkte Stahlbauteile verwendet.

Die Leitungsunterstützung erfolgte mithilfe eines Schienensystems sowie Gewindestangen und den Leitungsdurchmessern entsprechenden Rohrschellen (Abbildung 44).



Abbildung 44: Leitungsunterstützung

6.3.4 Fugenverschluss Öffnungsleitung

Die Fuge zwischen den Modulen und den Wandaufbauten wurde beidseitig 50 mm tief mit der Brandschutzfüllmasse CFS-FIL der Firma Hilti sowie innenliegend mit Mineralwolle dicht ausgestopft (Abbildung 45). Auf diese Weise sollte einem Versagen an dieser Stelle vorgebeugt werden. Die Untersuchung geeigneter Fugenausbildungen ist nicht Bestandteil des Forschungsprojektes, stellt aber ein kritisches, untersuchungsrelevantes Detail dar.



Abbildung 45: Fugenausbildung

6.4 Prüfofen

Für die Großbrandversuche wurde der Kombiprüfofen der TUK verwendet. Die Innenabmessungen des Prüfofens betragen 3,0 m x 3,0 m x 4,0 m. Auf jeder Ofenseite befinden sich sieben Gasbrenner (insgesamt 14), die während der Großbrandversuche alle verwendet wurden. Mithilfe der Gasbrenner können im Ofen Temperaturen entsprechend verschiedener Temperaturzeitkurven erreicht werden. Die Probekörper wurden einer Temperaturbelastung gemäß ETK ausgesetzt.

6.5 Durchführung der Versuche

Die Prüfbedingungen (u. a. Ofentemperatur und Druckbedingungen) sollten, mit Ausnahme des Einbaus in Holzmodulen statt einer Normwandkonstruktion, den Vorgaben nach DIN EN 1363-1 bzw. 1366-3 entsprechen. Diese sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Aufgrund einer technischen Störung kam es beim ersten Brandversuch zu starken Abweichungen des Ofeninnendrucks von den Vorgaben. Der Druck war zu Anfang des Versuchs deutlich zu hoch und schwankte danach stark bis zur Versuchsdauer von ca. 35 - 40 Minuten. Beim zweiten Brandversuch konnten bis auf eine Druckschwankung nach etwa 55 - 60 Minuten konstant gute Druckbedingungen erzielt werden.

6.6 Ergebnisse der Großbrandversuche

Für alle Versuche wurden die visuellen Beobachtungen dokumentiert. Weiterhin wurden bei jedem Versuch an unterschiedlichen Messstellen die Temperaturen während des Versuchs erfasst. Die Temperaturmessstellen befanden sich auf der Oberfläche der feuerabgewandten Seite, sowie auf den Leitungen und auf Teilen der Abschottungen. Die Lage der Messstellen orientierte sich an den Vorgaben aus DIN EN 1366-3. Weitere Messstellen wurden hinzugefügt. Die Versuche wurden von der unbeflammten sowie von der beflamten Seite gefilmt. Die Videos ermöglichten im Nachhinein eine genauere Auswertung und Präzisierung der visuellen Beobachtungen während des Versuchs. Das Video von der Kamera auf der Brandseite liefert nur für wenige Versuchsminuten auswertbares Bildmaterial, da sonst die Sicht durch Rauch stark beeinträchtigt wurde. Weiterhin wurden Bilder mit einer Thermografiekamera (Fluke Ti480) aufgenommen, um die Temperaturentwicklung am Probekörper global erkennen zu können und nicht nur an einzelnen Messstellen. Die Temperaturen, die durch die Thermografieaufnahmen abgebildet werden sind qualitativ zu sehen. Durch die vielen verschiedenen Oberflächen und deren unterschiedliche Emissivität kann bei der Kamera keine Einstellung vorgenommen werden, die verlässliche quantitative Messergebnisse liefert. Zur Messung der Temperatur an kritischen Stellen wurde im Großbrandversuch B2_Brettsperrholzwand ein mobiles Thermoelement verwendet.

Details zu den Großbrandversuchen B1_Holzrahmenwand (B1) und B2_Brettsperrholzwand (B2) sind den Versuchsberichten [79], [80] zu entnehmen.

6.6.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt. In den beiden folgenden Tabellen werden die in den Versuchen erreichten Feuerwiderstandsdauern für die einzelnen Holzmodule mit den jeweiligen Abschottungen dargestellt. Jedem Modul wird über die entsprechende farbliche Markierung die erreichte Feuerwiderstandsdauer zugeordnet. In der nächsten Zeile ist, falls ein vorzeitiges Versagen aufgetreten ist, der Grund für dieses genannt. Die Prüfbedingungen sind in Absatz 6.5 beschrieben. Ausschlaggebendes Kriterium war bei beiden Großbrandversuchen in allen Fällen ein Versagen des Raumabschlusses bei den Modulen mit brennbaren Rohren, welche mit Rohrmanschetten abgeschottet wurden.

Tabelle 17: Ergebnisdarstellung Großbrandversuch B1

Großbrandversuch B1_Holzrahmenwand; Versuchsdauer 92 Minuten

Feuerwiderstandsklasse*	Farbe
Keine	
EI 30	
EI 60	
EI 90	

*unter Berücksichtigung teilweise abweichender Prüfbedingungen

	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4
Feuerwiderstand				
Versagensgrund	-	-	Rohr- manschette gestopft (30 min)	-
	Modul 5	Modul 6	Modul 7	Modul 8
Feuerwiderstand				
Versagensgrund	Durchbrand Rohr- manschette < 30 min	Durchbrand Rohr- manschette < 30 min		Rohrmanschette gestopft (30 min) + Temp. Kupferrohr Conlit (50 min) + Temp. Kupferrohr Bandage (55 min)

Tabelle 18: Ergebnisdarstellung Großbrandversuch B2

Großbrandversuch B2_Brettsperrholzwand; Versuchsdauer 121 Minuten

Feuerwiderstandsklasse*	Farbe
Keine	
EI 30	
EI 60	
EI 90	
EI 120	

*unter Berücksichtigung teilw eise abw eichender Prüfbedingungen

	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4
Feuerwiderstand				
Versagensgrund	-	-	-	-

	Modul 5	Modul 6	Modul 7	Modul 8
Feuerwiderstand				
Versagensgrund	Durchbrand Rohr- manschette	Durchbrand Rohr- manschette	-	-

6.6.2 Interpretation der Versuchsergebnisse

Insgesamt lieferten beide Großbrandversuche positive Ergebnisse in Bezug auf die Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Massivholzmodulen. Im ersten Großbrandversuch (B1) kam es aufgrund eines technischen Problems zu starken Druckschwankungen (vor allem Überdruck zu Versuchsbeginn) in den ersten ca. 30 Minuten des Versuchs. Dies führte zu einer deutlich stärkeren Beanspruchung des Probekörpers gerade in den ersten Minuten des Versuchs. Die Funktion von Brandschutzrohrmanschetten ist stark vom Ofeninnendruck abhängig. Das nach dem Aufschäumen sehr poröse Intumeszenzmaterial kann durch Druckschwankungen von seinem Bestimmungsort innerhalb der Manschette abgetragen werden. Das Versagen von Modulen ist in beiden Versuchen in allen Fällen auf das Versagen eines mit einer Rohrmanschette abgeschotteten Kunststoffrohrs zurückzuführen. Im späteren Verlauf des ersten Brandversuchs wurde bei Modul 8 zusätzlich die Grenztemperatur für das Wärmedämmkriterium bei zwei Kupferrohrdurchführungen überschritten. Nach genauerer Untersuchung ist dies auf das Abbrechen der Kupferrohre innerhalb des Ofens kurz vor der Temperaturerhöhung zurückzuführen. Dies ist damit zu begründen, dass sich die Abstützvorrichtung aufgrund der Temperatureinwirkung stark verformte und die daran befestigten Kupfer-

rohre mit sich nach unten zog. Zusätzlich zu den im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Versuchen, können zum Vergleich der Ergebnisse die Daten von offiziellen Brandprüfungen herangezogen werden, die der Forschungspartner Hilti im Rahmen seiner Produktzulassungen hat durchführen lassen. Hilti konnte mit den Ergebnissen dieser Prüfungen bereits Ver- und Anwendbarkeitsnachweise für unterschiedliche der betrachteten Produkte in spezifischen Holzkonstruktionen erlangen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Großbrandversuche B1 und B2, zusammengefasst in Gruppen, erläutert und interpretiert.

6.6.2.1 Brandschutzkabelmanschetten

Die Auswertungen der Temperaturmessstellen ergibt bei beiden Versuchen ein ähnliches Bild. Als kritischste Messstelle kann das Thermoelement auf den Kabeln angesehen werden. Dort konnten nach einer Versuchsdauer von 120 Minuten in der Regel Temperaturerhöhungen von ca. 140 K beobachtet werden. Alle anderen ausgewerteten Messstellen weisen kleinere Temperaturerhöhungen von bis zu 80 K auf. Insgesamt sind die Temperaturen auf der Brandabgewandten Seite daher als unkritisch zu beurteilen. Zu Versuchsbeginn (bis ca. 10 Minuten) konnte bei den Vorversuchen und bei den Großbrandversuchen eine moderate Rauchentwicklung beobachtet werden. Anschließend war nahezu kein Rauchaustritt zu beobachten. Ab der 60. Versuchsminute war bei den Vorversuchen wiederum eine Rauchentwicklung an den Kabelmanschetten zu beobachten, die bis zum Versuchsende zunahm. Diese blieb jedoch in einem akzeptablen Bereich. Bei den Großbrandversuchen blieb diese Rauchentwicklung generell aus. Es ist zu vermuten, dass die Rauchentwicklung mit den größeren Kabeldurchmessern zusammenhängt.

Insgesamt ist eine Brandschutzkabelmanschette daher im Allgemeinen in massiven Holzbauteilen mit, einer entsprechenden Mindestdicke, ohne Einschränkungen Anwendbar. Die Länge der Schrauben muss an den zu erwartenden Abbrand angepasst sein.

6.6.2.2 Rohrmanschetten

Zur Betrachtung der Rohrmanschetten kann der Brandversuch B1_Holzrahmenwand nicht herangezogen werden. Die großen Druckschwankungen in den ersten 30-40 Minuten des Versuchs verfälschen die Versuchsergebnisse in Bezug auf die Leistung der Rohrmanschetten eindeutig.

Beim Brandversuch B2 lieferten drei der vier verbauten Rohrmanschetten bis über die 60. Minute hinweg übliche Temperaturverläufe an den Messstellen (vgl. Abbildung 46). Die Temperaturverläufe wurden mit den Ergebnissen weiterer, ähnlicher Versuche abgeglichen, die von der Firma Hilti beauftragt am Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung in

Linz durchgeführt wurden [52]. Die Versuchsaufbauten der dort durchgeführten Versuche unterschieden sich von den eigenen zum einen dadurch, dass in Linz der Einbau in eine Brettsperrholzdecke untersucht wurde, zum anderen handelte es sich bei den dort geprüften Rohrmanschetten nicht um exakt dasselbe Produkt (in Linz Hilti CFS-C EL). Der grundlegende Wirkmechanismus ist allerdings derselbe, sodass die resultierenden Temperaturverläufe verglichen werden können. Durch den Vergleich der Temperaturverläufe der eigenen Versuche mit den „fremden“ Ergebnissen, kann mir größerer Sicherheit die Aussage getroffen werden, dass es sich bei den drei üblichen Temperaturverläufen um den Regelfall handelt.

Bereits ab der 40. Minute zeigen die Temperaturverläufe der der im Modul 5 verbauten zugeordneten Thermoelemente beim Versuch B2 Auffälligkeiten (vgl. Abbildung 46). Die Temperatur an der Messstelle nimmt stetig bis zur 60. Minute zu. In Minute 64 kommt es zur Flammenbildung auf der brandabgewandten Seite von Modul 5. Ein kausaler Zusammenhang der Entzündung zu diesem Zeitpunkt könnte mit einem Druckstoß im Ofen in Minute 58 bestehen. Das brennende Rohr wurde infolge der Entzündung mit Mineralwolle verschlossen.

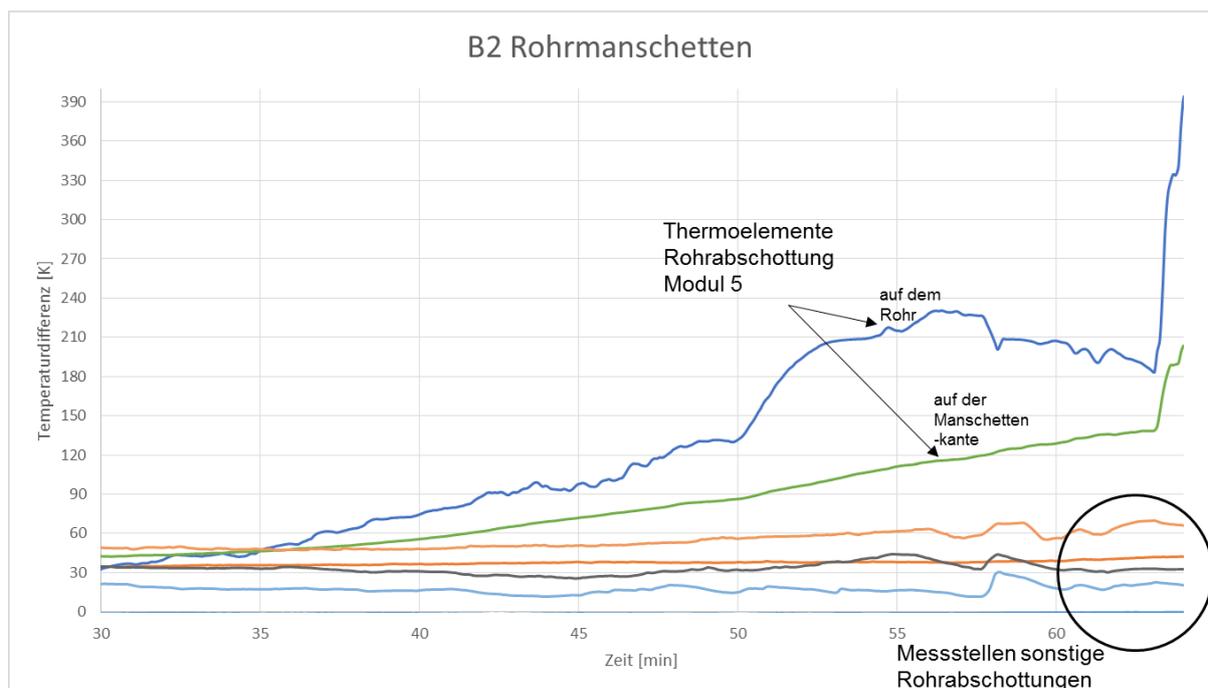


Abbildung 46: Rohrmanschetten Versuch B2 (Darstellung bis Minute 64)

Beim Stopfen der Mineralwolle in die Rohrmanschette von Modul 5 kam es zur Übertragung der Flammen auf Modul 6. Auch diese Rohrmanschette musste daher mit Mineralwolle verschlossen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt lieferte der Temperaturverlauf der Messstellen auf Modul 6 keine Anhaltspunkte, die auf ein frühzeitiges Versagen der Abschottung hindeuteten. Im Versuchsbericht [80] wird daher der Verlauf der Thermoelemente 1 – 4 und 14 – 17 nur bis zum Entzündungszeitpunkt dargestellt. Die Entzündung der Abschottung in Modul 6 wird nicht

bewertet, da sie von „Außen“ herbeigeführt wurde. Die Rohrmanschetten in den mehrfachbelegten Modulen M3 und M8 konnten die Leistungskriterien bis zum Versuchsende nach Minute 120 aufrechterhalten.

Unklar bleibt, warum eine der vier Rohrabschottungen einen abweichenden Temperaturverlauf aufzeigt und daher frühzeitig versagt. Folgende Faktoren könnten darauf Einfluss haben:

- Stärkere Beanspruchung durch Position der Abschottung im Versuchsaufbau
- Materialfehler im Kunststoffrohr
- Materialfehler bei der Brandschutzmanschette
- Fehler bei der Ringspaltverfüllung

In diesem Zusammenhang weisen die Temperaturverläufe der Plattenthermoelemente zur Ofensteuerung keine Auffälligkeiten auf, die auf eine größere Beanspruchung des Moduls 5 sprechen (Das Modul befindet sich in Zone 1 des Ofens, rechts). Materialfehler beim Rohr oder der Brandschutzmanschette sind sehr unwahrscheinlich, können allerdings nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Verfüllung des Ringspalts wurde beim Aufbau mit besonderer Sorgfalt ausgeführt und zusätzlich kurz vor dem Versuch nochmals überprüft und ausgebessert. Oberflächlich war der Ringspalt um alle Rohre voll verschlossen. Nicht zu überprüfen ist dagegen, wie tief und wie gleichmäßig die Verfüllung des Ringspalts in größerer Tiefe ist. Aufgrund einer Fehlstelle, könnte es zum Hinterbrennen der Abschottung kommen. Wenn es sich um ein Versagen aufgrund Hinterbrennens handeln sollte, ist fraglich, warum dieses Phänomen nicht auch bei den anderen Rohrmanschetten aufgetreten ist. Nach einer Versuchszeit von über 60 Minuten hat der Abbrand rechnerisch bereits die Verfülltiefe der Brandschutzfüllmasse überschritten. Die Ringspaltverfüllung sollte zu diesem Zeitpunkt im Versuch daher kein ausschlaggebendes Kriterium zum Versagen sein. Die intumeszierende Einlage der Rohrmanschetten ist zu diesem Versuchszeitpunkt schon stark expandiert und hat die Öffnung verschlossen. Die Kombination aus einer Ringspaltverfüllung, die nicht über die gesamte bauteiltiefe reicht und einer zufälligen Fehlstelle nach der Reaktion des Intumeszenzmaterials kann womöglich zum Versagen führen. Diese kann in einer weiteren Versuchsreihe untersucht werden, die folgende Konstellationen betrachtet:

1. Ringspaltverfüllung, wie in den Versuchen.
2. Ringspalt bis ca. 20-30 mm unterhalb der Moduloberfläche mit Mineralwolle verstopfen und Restverschluss mit Brandschutzacryl.
3. Ringspalt über die gesamte Bauteiltiefe mit Brandschutzacryl verfüllen.

Alternativ kann das Brandschutzacryl durch eine intumeszierende Füllmasse ersetzt werden, die etwaige Fehlstellen durch Abbrand oder Abtrag kompensieren kann.

Insgesamt konnte in den Versuchen gezeigt werden, dass eine Brandschutzrohrmanschette generell im Holz angewendet werden kann. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Dimensionierung und den Verschluss des Ringspalts zwischen Rohr und Bohrung zu legen. Die Schrauben zur Befestigung der Manschette sind entsprechend der erwarteten Abbrandtiefe zu wählen.

6.6.2.3 Brandschutzbandagen

Die Auswertung der Temperaturmessstellen zeigt im Regelfall eine Temperaturerhöhung an der kritischsten Messstelle von ca. 80-90 K nach 90 Minuten Versuchsdauer. Nach einer Versuchsdauer von 120 Minuten streuen die Ergebnisse. Die höchste gemessene Temperaturdifferenz betrug zu diesem Zeitpunkt am selben Messpunkt ca. 160 K. Die kritischste Messstelle befindet sich auf der Brandschutzbandage. Im Versuch B1 kam es an Messstelle 48 ab Minute 45 zu einem starken Temperaturanstieg. In Minute 55 wurde an dieser Messstelle die kritische Temperaturdifferenz zur mittleren Anfangstemperatur überschritten. Andere Messstellen auf demselben Rohr folgten dem Anstieg später (vgl. Abbildung 47). Beim Ausbau des Probekörpers aus dem Ofen konnte festgestellt werden, dass die Kupferrohre, welche in Modul 8 eingebaut waren ofeninnenseitig abgebrochen waren. Die Tragkonstruktion auf der Innenseite zeigte eine starke Biegung nach unten. Es ist anzunehmen, dass die Rohre in Folge der Biegung der Tragkonstruktion nach unten gezogen wurden und abgebrochen sind. Die Tragkonstruktion wurde im zweiten Versuch mehrfach unterstützt, um dem Verformung vorzubeugen. Das Abbrechen der Rohre konnte so im zweiten Versuch wirksam verhindert werden und es kam zu keinen unvorhersehbaren Temperaturerhöhungen. Das Versagen des Wärmedämmkriteriums in Versuch B1 an dieser Stelle kann daher nach Meinung der Autoren vernachlässigt werden. In der praktischen Anwendung sind die Tragsysteme entsprechend der Anwendbarkeitsnachweise verbaut, dementsprechend sind solche starken Verformungen ausgeschlossen. Die Kautschukisolierung dehnt sich im Laufe der Versuche durch die zunehmende Erwärmung aus und Platzt in den meisten Fällen auf. Der entstehende Riss befindet sich meist an der Stelle, an der das Thermoelement aufgeklebt wurde. Vermutlich behindert der Kleber die weitere Ausdehnung der Bandage und führt somit zur Rissbildung. An den gerissenen Stellen ist eine moderate Rauchentwicklung zu beobachten, die mit zunehmender Versuchsdauer zunimmt. Die entstehende Rauchmenge bleibt allerdings in einem nicht als kritisch anzusehenden Bereich.

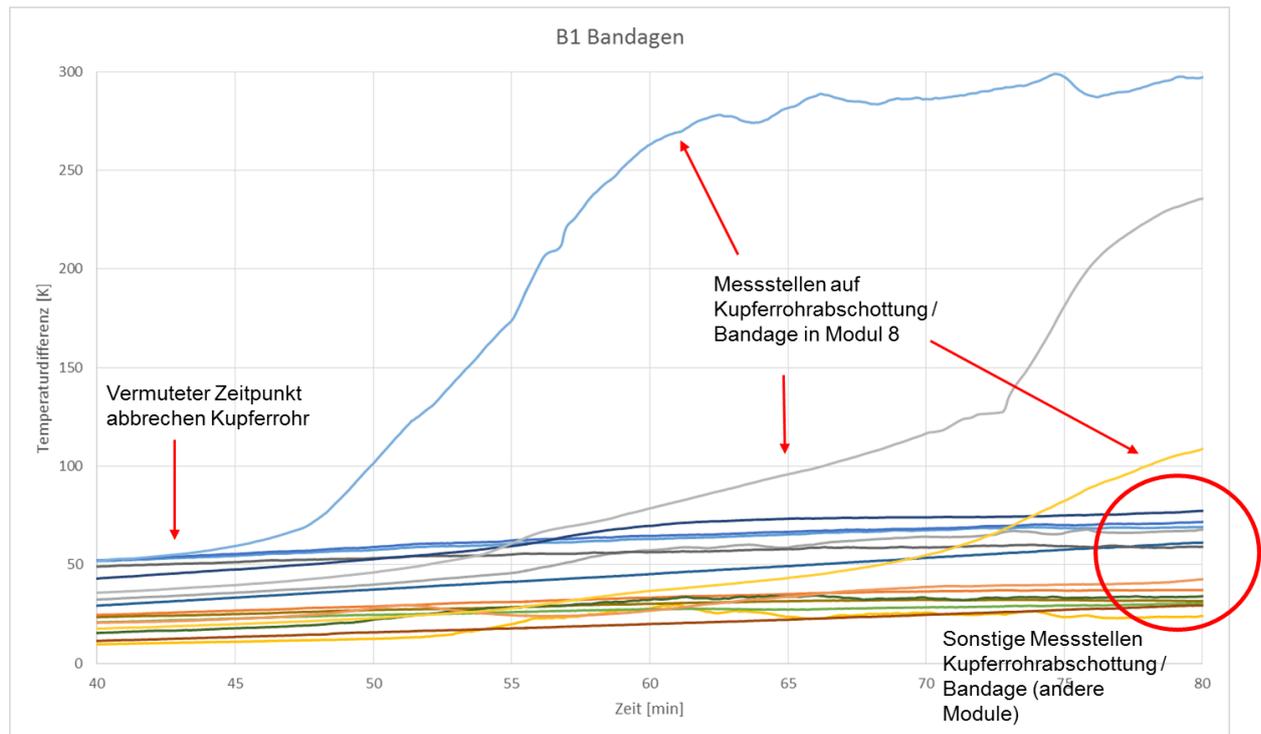


Abbildung 47: Abbruch Kupferrohr / Brandschutzbandage B1

6.6.2.4 Brandschutzrohrschalen

Die kritischen Messstellen – dies sind die Messstellen auf den Rohrschalen – lieferten bis zur 90. Versuchsminute Temperaturdifferenzen von bis zu ca. 110 K im Versuch B1 und bis zu ca. 90 K im Versuch B2. Nach 120 Minuten stiegen die Temperaturdifferenzen im Brandversuch B2 bis auf knapp 110 K an. Eine Ausnahme stellt auch hier Modul 8 dar. Wie auch bei den Brandschutzbandagen beschrieben, ist auch hier das Kupferrohr vermutlich während des Versuchs gebrochen und führte so zu einem starken Temperaturanstieg (vgl. Abbildung 48). Aus oben beschriebenen Gründen wird dieses Versagen nicht weiter betrachtet. Die gemessenen Temperaturdifferenzen sind daher insgesamt als unkritisch zu beurteilen. Mit zunehmender Versuchsdauer kann eine stärker werdende Verfärbung im Bereich des Ringspalts um und über den Brandschutzrohrschalen beobachtet werden. Im Brandversuch B1 wurde die Verfärbung bereits zwischen der 20. Und der 30. Versuchsminute festgestellt. Im Brandversuch B2 war eine Verfärbung erst nach 60 Minuten deutlich erkennbar. Fraglich ist, welchen Einfluss bzw. wie großen Einfluss die stärkere Beanspruchung durch den technischen Fehler der Ofensteuerung auf diese Verfärbung im Versuch B1 hatte.

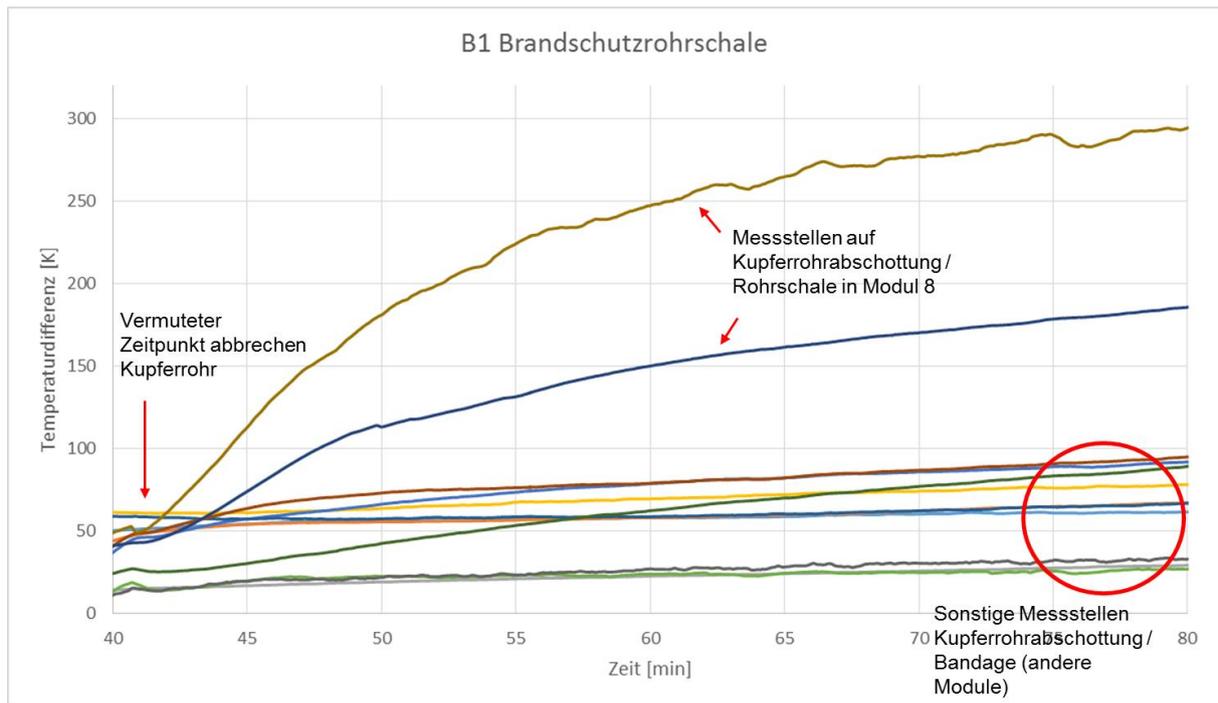


Abbildung 48: Abbruch Kupferrohr / Brandschutzrohrschale B1

6.6.2.5 Mobiles Thermoelement

Mithilfe des mobilen Thermoelements konnten zusätzlich Temperaturmessungen an interessanten Stellen vorgenommen werden, an denen sich keine Messstelle befand. Wird vermutet, dass eine Stelle des Probekörpers besonders heiß sein könnte, kann dies mit dem mobilen Thermoelement überprüft werden. Die Verwendung einer Thermografiekamera kann helfen, Stellen zu finden, an denen eine zusätzliche Messung sinnvoll ist. Die nach DIN EN 1366-3 vorgesehenen immobilen Messstellen liegen nicht in jedem Fall auf den heißesten Stellen.

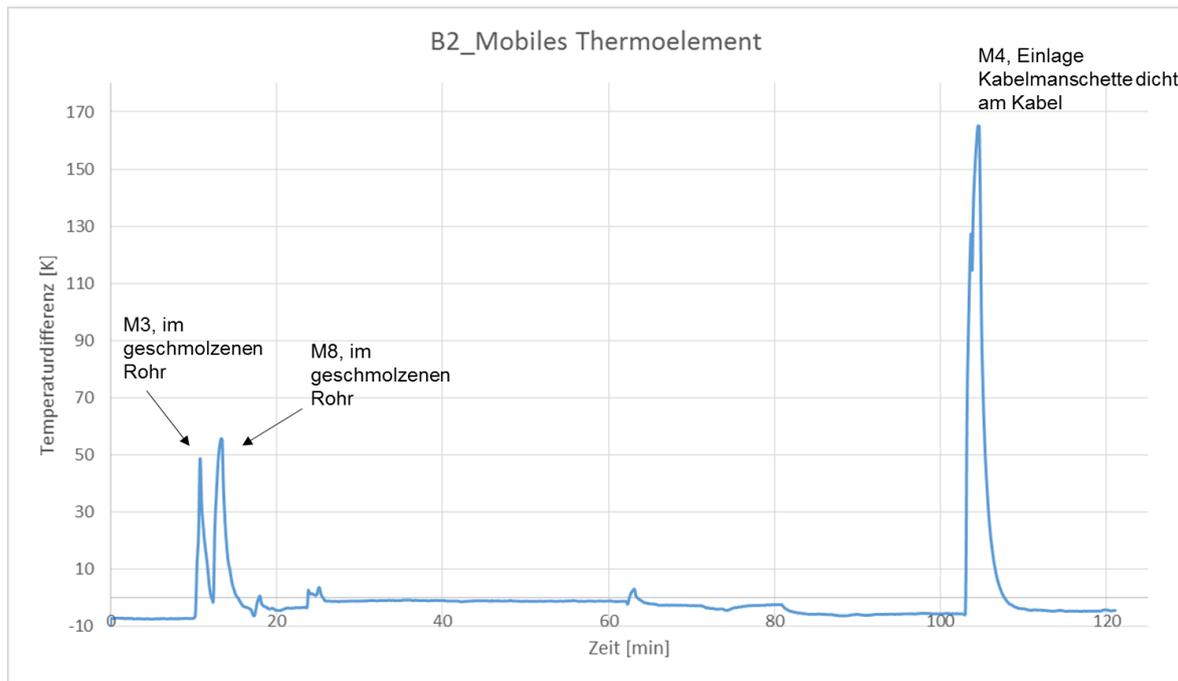


Abbildung 49: Messungen mobiles Thermoelement

Das mobile Thermoelement wurde beispielsweise verwendet, um die Temperatur in den Querschnitten der geschmolzenen Kunststoffrohre zu ermitteln. Auf der Brandschutzkabelmanschette wurde ebenfalls die Temperatur gemessen. Es gibt dort zwar eine feste Messstelle, diese liegt jedoch auf der Manschetteneinlage weiter vom Kabelbündel entfernt. Die Messungen sind in Abbildung 49 dargestellt.

6.6.2.6 Schrauben

Die Temperaturen auf den Schrauben der Manschetten wurden nur in den beiden Großbrandversuchen betrachtet. Dabei konnten nach 90 Minuten Versuchsdauer Temperaturerhöhungen um bis zu ca. 55 K und nach einer Versuchsdauer von 120 Minuten von bis zu ca. 70 K gemessen werden. Schrauben von Rohrmanschetten die bereits vor diesen Versuchsdauern versagt haben werden nicht in die Betrachtung einbezogen. Es kann festgestellt werden, dass bis zur betrachteten Versuchsdauer nicht die Erhitzung der Schrauben durch das Holzmodul ausschlaggebend ist, sondern die Übertragung der Wärme vom Metallgehäuse der Manschetten auf die Schrauben. Dies ist damit zu begründen, dass bereits nach wenigen Versuchsmi-
nuten eine deutliche Differenz der Temperaturen auf den Schrauben der Rohrmanschetten und denen der Brandschutzkabelmanschetten gemessen wurde (vgl. Abbildung 50). Für den Fall das die Erwärmung der Schrauben durch die Schrauben direkt von der Brandbeanspruchung ausgehend erfolgt, hätten die Schrauben sich gleichmäßig erwärmen müssen. Es wurden für alle Befestigungen die gleichen Schrauben verwendet. Bei einem dünneren Wandaufbau, oder bei der Verwendung längerer Schrauben könnte sich das beobachtete Verhalten ändern. Die maximale Schraubenlänge sollte in Brandversuchen betrachtet werden.

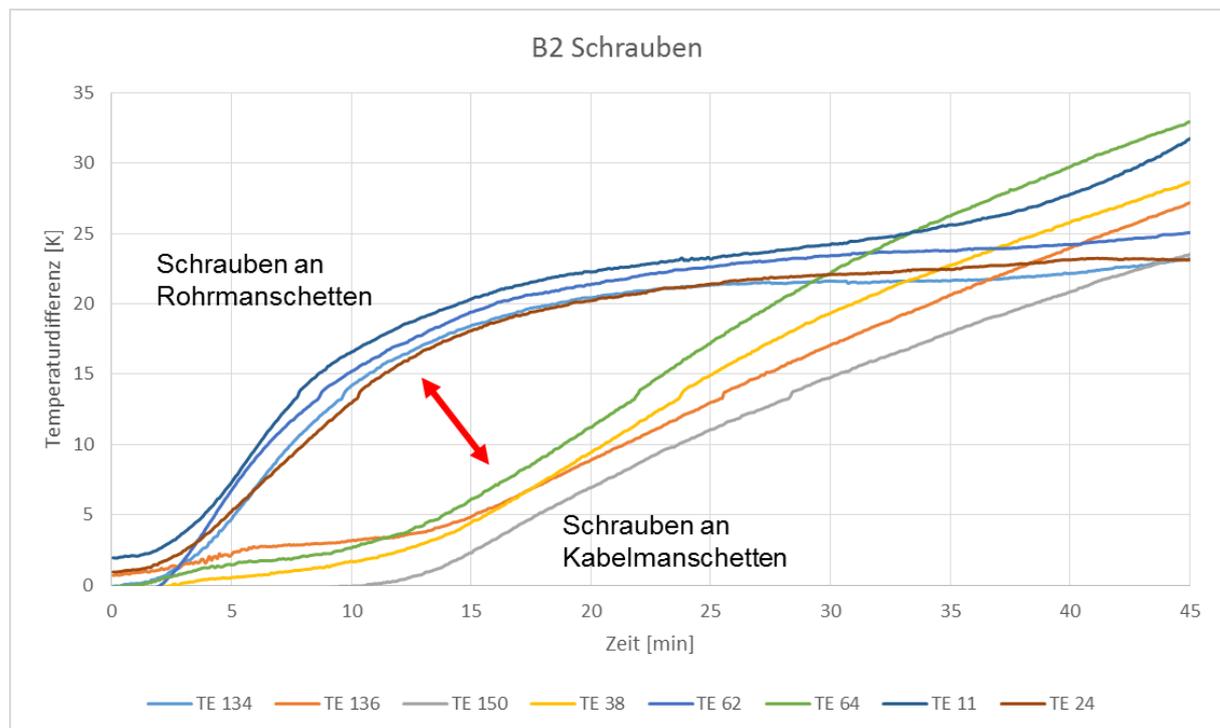


Abbildung 50: Temperaturdifferenz Schrauben

6.6.2.7 Fugen

Die auf den Fugen gemessenen Temperaturerhöhungen betragen nach 90 Minuten bis zu 20 K und nach 120 Minuten bis zu 30 K. Diese Temperaturerhöhungen sind als unbedenklich anzusehen und werden nicht weiter betrachtet. Die Ausführung der Fuge erfolgte in den beiden durchgeführten Großbrandversuchen sehr konservativ.

6.6.2.8 Temperaturen auf den Modulen

Die Temperaturerhöhungen auf der Holzoberfläche der Module liegen selbst nach einer Versuchsdauer von 120 Minuten noch im Bereich von bis zu 30 K. Die Temperaturen auf der Moduloberfläche sind daher als unkritisch zu betrachten.

6.6.2.9 Dicke / Beständigkeit der Holzkohleschicht

Im Rahmen der Untersuchungen konnte ein Unterschied zwischen BSH und BSP bezüglich der Ausbildung bzw. der Aufrechterhaltung der Holzkohleschicht festgestellt werden. Die Module aus BSH wiesen im Anschluss an die Brandversuche eine dickere Holzkohleschicht auf als der Wandaufbau aus BSP (vgl. Abbildung 51). Teilweise ist das Abfallen der Kohleschicht allerdings dem Zeitpunkt des Löschens zuzuordnen. Es kann daher keine konkreten Aussagen getroffen werden, wie groß der Unterschied der Dicke der Kohleschichten zwischen BSP und BSH direkt bei / nach der Brandbeanspruchung ist, da Messungen erst nach dem Löschen durchgeführt werden können.

Weiterhin konnte im Bereich der Leitungsdurchführungen kein negativer Effekt der Abschottungssysteme auf die Ausbildung einer Holzkohleschicht festgestellt werden. Auch kam es zu keiner verstärkten Zerstörung der Holzkohleschicht im Bereich der Durchführungen.

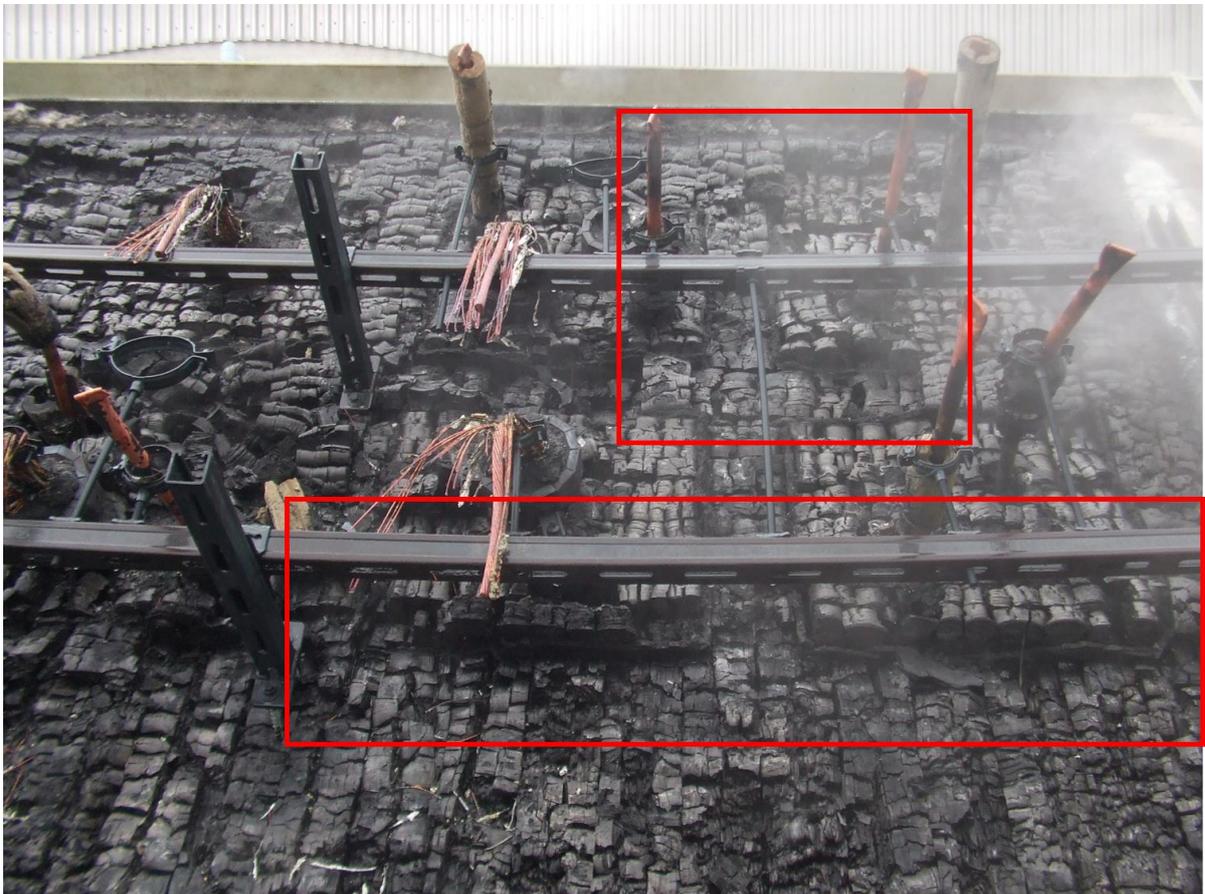


Abbildung 51: Unterschiedliche Kohleschichtdicken

6.6.2.10 Einbrand im Ringspaltbereich (Abstand zwischen Bohrungen)

Zur Auswertung der Abbrandtiefe im Ringspalt wurde bei einigen Holzmodulen ein Schnitt mittig durch die einzelnen Bohrungen hergestellt. So ist erkennbar wie tief der Abbrand in Ringspaltrichtung und senkrecht zum Ringspalt vordringt.

Bei allen Durchführungsarten ist eine trichterförmige Verkohlung im Bereich des Ringspalts zu erkennen. Der Abbrand senkrecht zu Ringspalt nimmt also mit zunehmendem Abstand zur Abbrandebene ab. Als Abbrandebene wird der Übergang zwischen unverkohltem / nicht verfärbten Holz und der Kohleschicht bezeichnet. Abbildung 52 zeigt beispielhaft einen Abbrandtrichter und stellt die verwendete Richtungsdefinition für die Messungen dar.



Abbildung 52: Abbrandtrichter des Ringspalts mit Richtungsdefinition

Unabhängig von der Art der Durchführung und Abschottung sind die größten Abbrandtiefen in der Abbrandebene gemessen worden. In den ersten 10 – 20 mm in Ringspaltrichtung, gemessen von der Abbrandebene aus, nimmt der Abbrand senkrecht zu Ringspalt am stärksten ab. Ab dieser Ringspalttiefe sind die Ausformungen der Abbrandtrichter differenziert zu betrachten.

1. Der Abbrandtrichter flacht stark ab. Die Abbrandtiefe senkrecht zum Ringspalt nimmt nur noch langsam ab. Der Abbrand in Ringspaltrichtung reicht weit. Diese Form der Trichter ist bei der Brandschutzbandage und bei der Brandschutzkabelmanschette zu beobachten.
2. Der Abbrandtrichter flacht nach den ersten ca. 2 Zentimetern deutlich ab. Der Abbrand in Ringspaltrichtung dringt dann nur noch wenige Zentimeter vor. Diese Form der Trichter ist bei der Brandschutzrohrmanschette und bei der Brandschutzrohrschale zu beobachten.

Die unterschiedlichen Ausformungen der Abbrandtrichter sind in Abbildung 53 dargestellt. Anzunehmen ist, dass sich die unterschiedlichen Abbrandtrichter der Ringspalte in Abhängigkeit der Leitungsart und des Abschottungssystems ergeben. Bei der Brandschutzbandage und der Brandschutzkabelmanschette befindet sich jeweils ein gut wärmeleitendes Material im inneren der Öffnung. Zum einen ist dies die Oberfläche der Brandschutzbandage selbst (Thermografie und Messungen auf der Bandage) sowie das Kupferrohr. Zum anderen die Kupferleiter der Kabel. Anzumerken ist, dass einige typischerweise in Brandschutzprodukten verwendete Komponenten, wie z.B. Ammoniumpolyphosphat bei Kontakt mit Holz zu einer Braunverfärbung führen können. Daher ist schwer zu differenzieren, welcher Anteil der Verfärbung der Reaktion und welcher der Verkohlung zuzuschreiben ist. Die Kabel liegen innerhalb der Bohröffnung frei, falls sie nicht von Intumeszenzmaterial umschäumt wurden. Auf diese Weise kann der Ringspalt von innen beansprucht werden und es kommt zu einer tiefgehenden Verkohlung in Ringspaltrichtung. Das Kunststoffrohr, welches mit der Rohrmanschette abgeschottet wurde, schmilzt / verbrennt zu Versuchsbeginn und leitet so keine Wärme in den Ringspalt ein. Das unisolierte Kupferrohr leitet zwar Wärme, wird allerdings von der Rohrschale dicht

umschlossen. Die Dämmwirkung der Rohrschale ist so groß, dass nahezu keine Wärme auf den Ringspalt von innen übertragen wird. Die Verkohlung ergibt sich über die heißen Gase die in den Spalt zwischen Rohrschale und Holzoberfläche der Bohrung eindringen. Weiterhin könnte die Größe der Bohrung Einfluss auf die Form des Abbrandtrichters haben. Dies kann an den vorliegenden Ergebnissen nicht untersucht werden. Es wurden jeweils gleiche Leitungsdurchmesser in Verbindung mit den unterschiedlichen Abschottungssystemen untersucht.

Abbildung 53 kann entnommen werden, dass sich in einem Abstand von 25 mm zum Ringspalt / zur ursprünglichen Bohrkante ein durch die Öffnung verursachter zusätzlicher Abbrand von maximal ca. 10 mm ergibt. Zu beachten ist, dass die Verkohlung des Holzes auch nach Ende des Versuchs und nach dem Ablöschen, bis zur vollständigen Abkühlung noch weiter fortschreiten kann. Die Messungen wurden erst durchgeführt als der Probekörper komplett abgekühlt war.

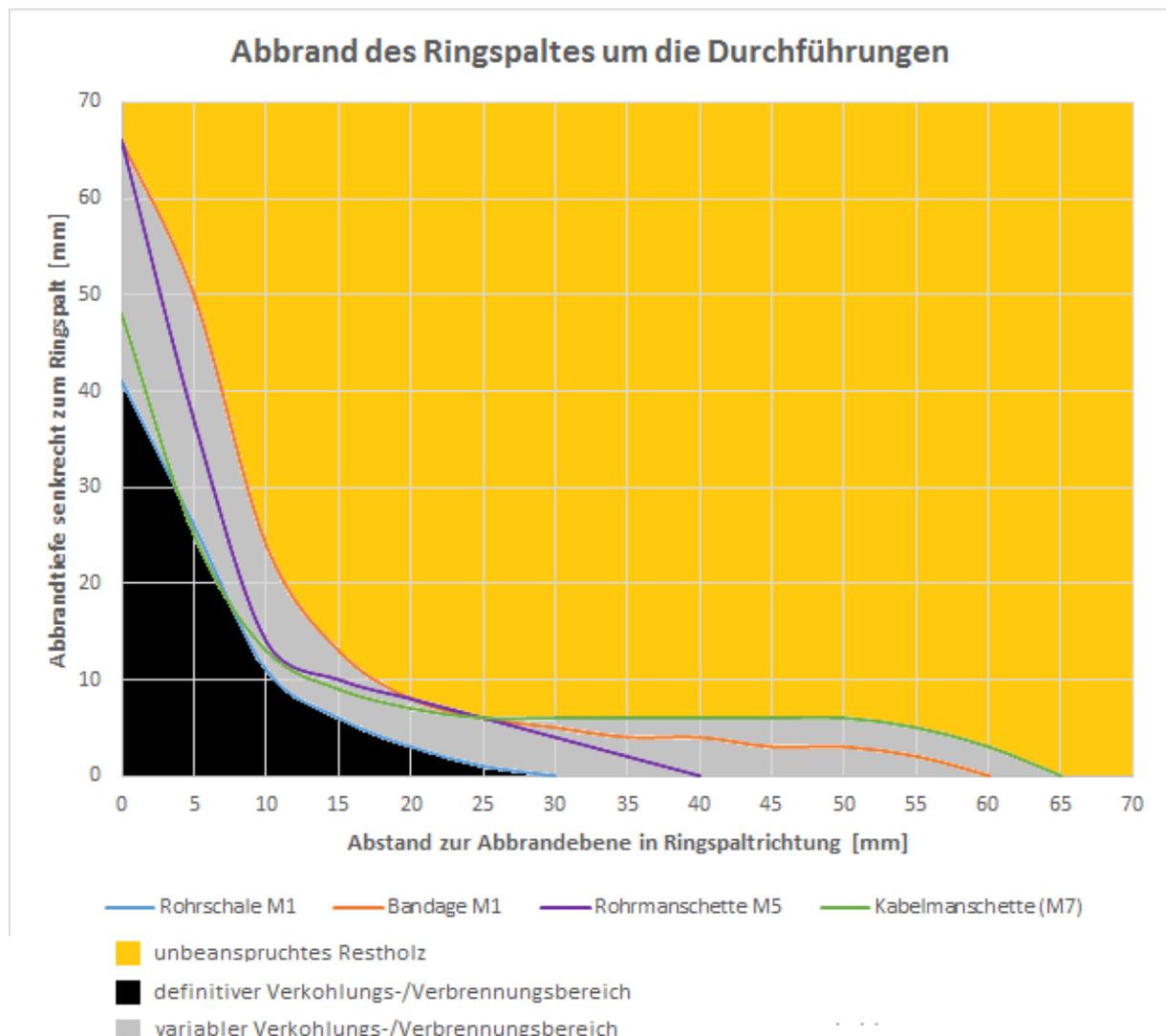


Abbildung 53: Abbrandtiefe im Ringspalt

6.6.2.11 Thermografie

Auch während der Großbrandversuche wurden Fotos mit einer Wärmebildkamera aufgenommen. Beispielhafte Bilder aller Abschottungssysteme sind in Abbildung 54 und Abbildung 55 zu sehen. Es können dieselben heißen Stellen wie auch in den Vorversuchen identifiziert werden. Siehe dazu Punkt 6.6.2.11.

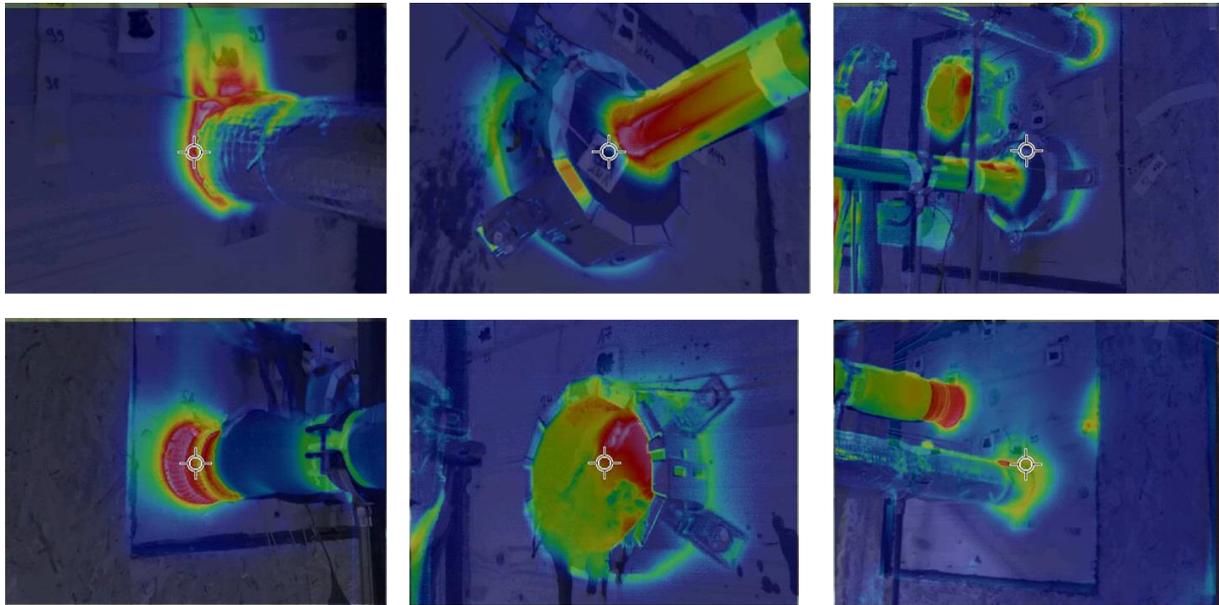


Abbildung 54: Thermografie B1

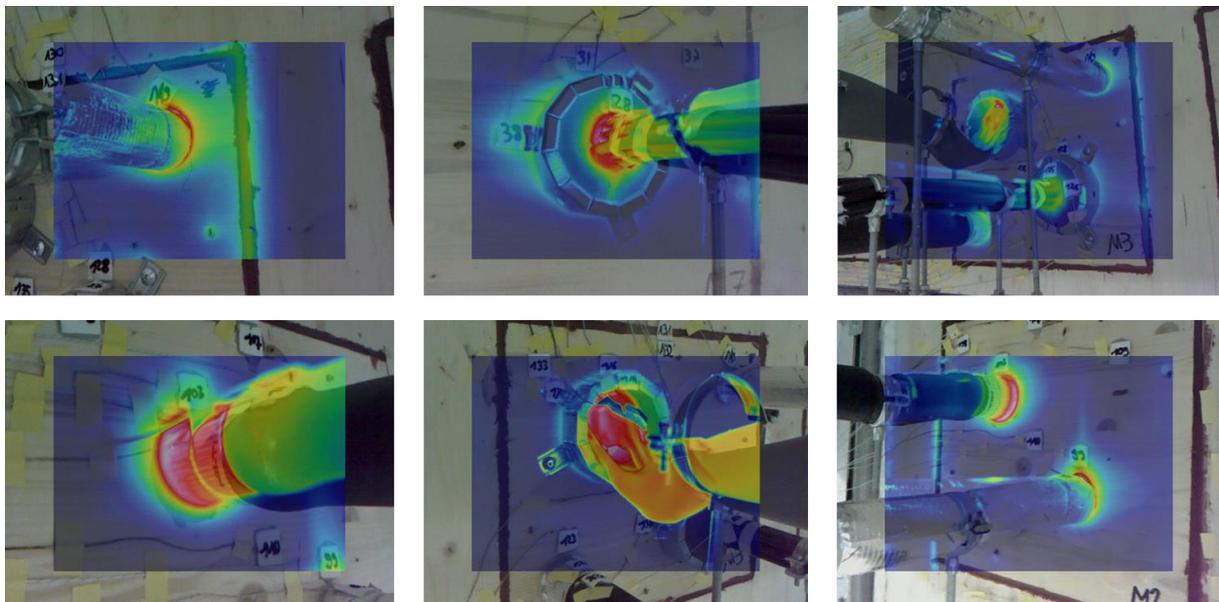


Abbildung 55: Thermografie B2

7. Analyse der Versuchsrandbedingungen

7.1 Vorteile der Methode „Holz-in-Holz“

Bei der Methode „Holz-in-Holz“ werden Module mit definierten Eigenschaften (Geometrie, Materialeigenschaften etc.), in denen die Abschottung der Leitungen stattfindet, in die jeweilige Holzkonstruktion eingesetzt. Auf eine Beplankung des Bauteils (Wand oder Decke) wird ebenso verzichtet wie auf die bisher übliche Substitution durch mineralische Baustoffe. Hieraus ergeben sich sowohl ästhetische / optische Vorzüge, als auch ökologische und ökonomische Vorteile.

7.1.1 Optische Vorteile

Der Baustoff Holz erfreut sich zunehmender Beliebtheit bei Architekten, Bauherren (öffentlich und privat) sowie Nutzern. Mehrgeschossige Leuchtturmprojekte aus Holz haben viel mediale Aufmerksamkeit erhalten und lassen hoffen, dass es im positiven Sinne Nachahmer gibt. Gemäß der MBO aus dem Jahr 2002 muss die Holzkonstruktion ab der Gebäudeklasse 4 gekapselt werden (siehe auch Punkt 4.1.6), d.h. das ästhetische Potential des Materials kann im Innenraum häufig noch gar nicht zur Geltung kommen. Vielfach wird genau das in Architektenkreisen an den mehrgeschossigen Best-Practice-Projekten kritisiert. Die bereits erwähnte Novellierung der Landesbauordnung in Baden-Württemberg zielt, unter Beachtung der Schutzziele auf die Möglichkeit ab, Holz ungekapselt in vertikalen und horizontalen Konstruktionselementen einzusetzen. Die Methode „Holz-in-Holz“ ist ein weiterer Schritt den sichtbaren Einsatz von Holz und damit die positive Auswirkung des Materials auf den Innenraum zu ermöglichen. Im Bereich der Leitungsdurchführung sind weder ein Materialwechsel noch eine Kapselung erforderlich. Das eingesetzte Modul aus Holz im Wandbauteil aus Holz lässt einen weichen Materialübergang zu. Es entsteht ein ruhiger, angenehmer Raumeindruck aus Holz. Der Handlungs- und Gestaltungsspielraum für Architekten (und Bauherren) wird erweitert.

7.1.2 Ökonomische Vorteile

Durchführungsbereiche für Leitungen im Holzbau stellen aktuell eine Störung im System, bzw. im Bauablauf dar. Im Bereich der Durchführung gibt es bis dato einen Gewerkwechsel mit zusätzlichem Koordinationsaufwand und Schnittstellenproblematik. Die Methode „Holz-in-Holz“ kann durch die Zimmerei, den Holzbaubetrieb selbst umgesetzt werden. Die Module aus Holz lassen sich, wie alle Konstruktionselemente aus Holz, hervorragend vorfertigen und können auf der Baustelle leicht eingebaut, ggf. schnell bearbeitet oder angepasst werden. Im Vergleich zur bekannten Lösung, die bspw. Beton (vor Ort gegossen oder aber als Fertigteil) vorsieht, ist von einem Zeitgewinn auszugehen. Auch gegenüber einer Modulvariante oder Be-

kleidung aus Gipskarton besitzt die Methode „Holz-in-Holz“ die Vorteile hinsichtlich Gewerke-treue und Ausführungsdauer. Insgesamt wird die Wertschöpfung für die Zimmereien mit der neuen Methode als höher eingeschätzt.

7.1.3 Ökologische Vorteile

Im Bauwesen ist die stoffliche Substitution mineralischer Baustoffe durch Holz ein dringendes Thema. Aufgrund der Herausforderungen des Klimawandels sind die Marktanteile des CO₂-neutralen Baustoffes Holz im Bauen zu steigern, unter Beachtung der besonderen Materialeigenschaften.

Vordergründig handelt es sich beim Bereich der Leitungsabschottungen nur um einen kleinen Teil des Gebäudes, bzw. um einen geringen Anteil am insgesamt eingesetzten (Bau-)Material. Dennoch lässt sich auch hier CO₂ einsparen, in dem die Methode „Holz-in-Holz“ aus Brettsperrhozelementen eingesetzt wird und die bisherigen Abschottungen mineralischer Zusammensetzung substituiert werden. Die überschaubare Modulgröße lässt die Verwendung von Reststücken aus der Brettsperrhoizproduktion zu. Verschnitte (Bauteilgrößen) und Ausschnitte (Fenster, Türen), die im Herstellungsprozess während des Abbundes entstehen, können sinnvoll verwertet und müssen nicht verheizt werden.

Neben den bekannten positiven Eigenschaften des Baustoffes Holz, bestehen eine Reihe an Herausforderungen beim Konstruieren und Bauen mit Holz (siehe Kapitel 1). Neben den besonderen Materialeigenschaften (Brennbarkeit, Anisotropie, Hygroskopie etc.) sind es v.a. allgemein gültige Regelwerke, die wenig materialspezifisch definiert, das Konstruieren und Bauen mit Holz erschweren. In der Summe erweist sich das Planen mit Holz gegenüber Stahlbeton für Architekten und Ingenieure in der Praxis als aufwendiger. Der Wegfall von Hemmnissen im Regelwerk (MBO, LBO) und erforderlichen Sonderlösungen im Detail oder aber der Verzicht auf Substitution von Holzbauteilen aus Brandschutzgründen kommt dem Holzbau und damit dem Klimaschutz insgesamt zu Gute.

7.2 Allgemeine Erkenntnisse für die Prüfungen von Abschottungssystemen in Holzbauteilen

7.2.1 Prüfbedingungen

Die Versuche in diesem Forschungsprojekt wurden in Anlehnung an die Prüfbedingungen aus DIN EN 1363-1 und DIN EN 1366-3 durchgeführt. Auf die Abweichungen wird in Absatz 6.5 eingegangen. Die Beobachtungen und Messungen während der Versuche haben gezeigt, dass sich die untersuchten Abschottungssysteme, eingebaut in Holzbauteile, sehr ähnlich verhalten wie in Massivbauteilen. Es ist daher festzuhalten, dass die Vorgaben zu Prüfungen der genannten Normen sich auch für die Beurteilung von Abschottungssystemen, die direkt in

Holzbauteile eingebaut werden, eignen. Die Norm sollte daher in Zukunft durch Normtragkonstruktionen in Holzbauweisen ergänzt werden. Erfolgt die Abschottung mithilfe von Holzmodulen, wie durch die Methode „Holz-in-Holz“ erklärt, so sind zusätzliche Messstellen anzubringen, um die Leistungsfähigkeit der Fuge zwischen Modul und Wandkonstruktionen beurteilen zu können. Kritische Parameter können großteils aus den Ergebnissen von Brandversuchen in den bisher üblichen Tragkonstruktionen abgeleitet werden. Dies gilt vor allem für Parameter, die das Zusammenwirken von Leitungen und Abschottungssystem betreffen, wie Leitungswerkstoff oder Leitungsdurchmesser.

7.2.2 Temperaturkriterium

Das Temperaturkriterium, nach dem eine Temperaturerhöhung um über 180 K unzulässig ist, kann auch bei der Prüfung von Abschottungssystemen in Holz als sinnvoll angesehen werden. Bei einer Holztemperatur von 200°C bleiben noch mehr als 20 Minuten bis zur Entzündung des Holzes (vgl. Punkt 4.3.4, insbesondere Abbildung 7). Somit kann sichergestellt werden, dass sich das Holz nicht frühzeitig aufgrund der Temperaturerhöhung (auf der dem Brand abgewandten Seite) entzündet.

7.2.3 Mindestmoduldicke

Die untersuchten Module mit Dicken von 160 mm sind für eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten ausreichend. Für geringere Feuerwiderstandsdauern sind Module mit geringeren Dicken ausreichend. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass für eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten die Moduldicke ebenfalls reduziert werden kann. Dies wurde allerdings im Rahmen dieses Projekts nicht weiterhin untersucht.

Zukünftig wäre eine einheitliche technische Regel mit Modulaufbauten und erforderlichen Moduldicken für die unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern zielführend. Für die Zulassung von Abschottungssystemen sind dann Feuerwiderstandsprüfungen in den Standardmodulen erforderlich. Der Anschluss der Module an verschiedenste Holzbauteile soll in zukünftigen Forschungsvorhaben definiert werden und standardisierte Lösungen vorgegeben werden, sodass für die Abschottungshersteller keine weiteren Prüfungen notwendig sind (siehe auch 7.2.5). Diese Vorgehensweise zeigt die großen Vorteile der Anwendung der Methode „Holz-in-Holz“. Da der Abbrand des Holzes weitestgehend linear stattfindet und ab gewissen Mindestdicken unabhängig von der Gesamtdicke ist, ist eine Vergrößerung der Moduldicke nach Meinung der Autoren auf der sicheren Seite liegend. Das heißt nach Prüfung in der Standardmoduldicke darf die Dicke des Moduls in der Praxis beliebig erhöht werden, um z. B. ästhetische Gesichtspunkte oder schallschutztechnische Anforderungen zu bedienen.

Um die erforderliche Moduldicke für andere Feuerwiderstandsdauern als 120 Minuten in etwa bestimmen zu können, wurden verschiedene Berechnungen und Simulationen durchgeführt.

Das ursprüngliche Ziel der Finite Elemente Simulationen war, ein Simulationsmodell zu erstellen, das die Ergebnisse der Versuche bestätigt. Anschließend sollten verschiedene Parameter, wie Leitungsdurchmesser, Moduldicken oder Materialkenngrößen variiert werden. Zur Simulation wurde das Programm ANSYS® verwendet. Die Ergebnisse der Finite Elemente Simulationen flossen bei den Vorschlägen zu den erforderlichen Mindestmoduldicken für die unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern ein.

Die Ergebnisse der Berechnungen nach Eurocode 5 und der Simulationen können Tabelle 19 entnommen werden. Zur Erhaltung des Raumabschlusses sind nach Eurocode 5 nach einer Branddauer von 60 Minuten 6,4 cm Bekleidungsdicke erforderlich. Die zugehörige rechnerische Abbrandtiefe beträgt nach Eurocode 5 3,9 cm. Die aus der Simulation erforderliche Moduldicke zur Einhaltung des Wärmedämmkriteriums beträgt 5 cm. Um eine sichere Leitungsabschottung zu ermöglichen, muss zusätzlich das Abbrandverhalten im Bereich der Leitungsabschottung bei der empfohlenen Moduldicke berücksichtigt werden (siehe 6.6.2.10). Dies sind bisher rein theoretische Überlegungen, die nach Einschätzung der Autoren auf der sicheren Seite liegen. Die Standardmoduldicken sollen in einem Folgeprojekt festgelegt und versuchstechnisch abgesichert werden.

Tabelle 19: Moduldicken für unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern

Dauer der Brandbeanspruchung	Erhaltung Raumabschluss nach EC5*	Rechnerische Abbrandtiefe nach EC 5	Simulation BSH-Modul mit Ansys	Empfohlene Moduldicke**
[min]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
30	3,2	1,95	2,5	6
60	6,4	3,9	5	9
90	(9,5)	5,85	6	12
120	(12,7)	7,8	-	16

* mit $t_{ins,0} = 0,95h_p$ und $k_{pos} = 1$

** die in den anderen Tabellenspalten angegebenen Werte berücksichtigen keine Leitungsdurchführung, die das Bauteil schwächt. Aus diesem Grund liegt der Wert der empfohlenen Dicke deutlich über den berechneten Werten. Mögliche geringere Moduldicken können durch Versuche nachgewiesen werden.

7.2.4 Abbrandverhalten von Leimholz

Es konnten Unterschiede im Abbrandverhalten von verschiedenen leimgebundenen Holzbauteilen erkannt werden. Bei BSH ist im Vergleich zu Brettsperrholz weniger das Abfallen von Kohle zu beobachten. Dennoch brennen beide Baustoffe mit einer vorhersehbaren, konstanten Geschwindigkeit ab. Es ist bekannt, dass auch unterschiedliche Arten von Brettsperrholz ein unterschiedliches Abbrandverhalten aufweisen können. Die Unterschiede im Abbrandverhalten sollten parameterabhängig ermittelt werden, sodass kritische Fälle festgelegt werden können. Eine Rangfolge in Bezug auf das Abbrandverhalten der unterschiedlichen massiven, leimgebundenen Holzwerkstoffe in Abhängigkeit von Parametern soll aufgestellt werden, um

die Anwendbarkeit von Abschottungen auf weitere Bereiche als eine einzelne Prüfung übertragen zu können. Parameter können beispielsweise sein: Holzart, Holzqualität, Verleimungsrichtung, Art des Leims, Schichtdicke.

7.2.5 Anschluss der Module an die Holzkonstruktion

Beim Einsetzen der Module in die Holzwandkonstruktion ergibt sich eine Fuge zwischen Bauteilöffnung und Holzmodul. Dieser Fuge ist eine große Bedeutung aus brandschutztechnischer Sicht beizumessen. Die Fuge muss in jedem Fall so ausgeführt werden, dass sie den gleichen Feuerwiderstand erreicht wie das umliegende Bauteil. Eine abschließende Lösung, wie diese Fuge auszubilden ist, kann in diesem Projekt nicht gegeben werden, da diese Untersuchung nicht Gegenstand des Forschungsprojekts war. Um Empfehlungen zur sicheren und wirtschaftlichen Fugenausbildung geben zu können, sind weitere Versuche notwendig. Im Forschungsprojekt wurde die Fuge behelfsweise mittels Mineralwollstopfung und Intumeszenzmaterial ausgeführt (für Details siehe Punkt 6.3.4). Die Lösung kann als sehr sicher gewertet werden. Die Module wurden beidseitig mit Schrauben im 45°-Winkel in der Holzkonstruktion befestigt (siehe dazu Absatz 6.1).

Im Bereich der Öffnungsleibung (Öffnung zum Einsetzen der Holzmodule) ist bei Massivholzaufbauten keine zusätzliche Maßnahme notwendig. In nicht hohlraumfreien Wandaufbauten oder Wandaufbauten mit Dämmschichten ist im Bereich der Öffnungsleibung ein umlaufendes Füllholz vorzusehen. Eine zusätzliche Bekleidung / Ertüchtigung der Leibung aus brennbaren oder nichtbrennbaren Baustoffen zum Schutz der tragenden Teile der Konstruktion von nichtmassiven Holzkonstruktionen wird empfohlen. Eine andere Möglichkeit stellt die Überdimensionierung der tragenden Teile der Konstruktion dar. Im Großbrandversuch B1_Holzrahmenwand wurde eine Öffnungsleibung aus OSB-Platten verwendet. Es wurde kein verstärkter Einbrand in die tragenden Teile der Wand im Bereich der Öffnungen festgestellt. Ist der Schutz der darunterliegenden Teile der Konstruktion gewährleistet, kann die schützende Schicht nach Meinung der Autoren auch aus brennbaren Baustoffen bestehen.

7.2.6 Kleinst- / größtmögliches Ringspaltmaß

Es ist zu beachten, dass abweichend zum Massivbau auch sehr kleine Ringspaltmaße kritisch sein können, da dadurch die mögliche Verfülltiefe eingeschränkt werden kann. Durch eine nahe Platzierung der (nichtbrennbaren) Leitung an der Bohrung / Öffnung kann die Verkohlung im Ringspaltbereich verstärkt werden.

Eine Möglichkeit verschiedene Ringspaltabmessungen in einem Versuch abzuprüfen könnte die exzentrische Anordnung von Leitungen in der Bohrung / Öffnung sein. Die Leitung könnte in der maximalen im Anwendbarkeitsnachweis angestrebten Bohröffnung außermittig platziert

werden, sodass sich einerseits die minimale, andererseits die maximale Ringspaltabmessung ergibt.

7.2.7 Abstände zwischen Bohrungen und zwischen Leitungen

Bei der Anwendung von Abschottungssystemen in Holzbauteilen ist der Abstand zwischen den Bohrungen sowie der Abstand zwischen den Leitungen als relevant anzusehen. Durch die entstehenden Einbrandtrichter ergeben sich erhöhte Abbrandtiefen in der Nähe der Durchdringungen. Werden zwei Bohrungen zu nah nebeneinander ausgeführt kann dies dazu führen, dass der komplette dazwischenliegende Holzquerschnitt verkohlt. Dies kann im Extremfall zum Versagen des Raumabschlusses führen. Die Beurteilung der Schnitte durch die Module ergab, dass bereits in einem Abstand von 25 mm zum Ringspalt nur noch ein um ca. 10 mm erhöhter Abbrand ergibt. Das Risiko dieses zusätzlichen Abbrands ist akzeptabel. Daher wird ein Mindestabstand von 50 mm zwischen zwei Bohrungen / Öffnungen empfohlen. In einem Vortrag auf der World Conference on Timber Engineering [81] wurde ein Abstand von 102 mm zwischen metallischen Durchführungen empfohlen. Bei deren Versuchen betrug die Ringspaltbreite ca. 25 mm. Es trat eine Verkohlung des kompletten Holzes zwischen den Durchführungen auf, der Raumabschluss wurde gewahrt. Damit entspricht die Empfehlung den eigenen Ergebnissen. Mithilfe von Schnitten durch die Bohrungen im Anschluss an einen Versuch können zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden, im Vergleich zu der reinen Auswertung der Ergebnisse nach DIN EN 1366-3.

7.2.8 Schrauben / Befestigungen von Abschottungssystemen

In den Versuchen wurde die Länge der Schrauben an die erwartete Abbrandtiefe angepasst. Die Schraubenlänge wurde so gewählt, dass sie auch nach der Brandbeanspruchung noch im unverbrannten Holz verankert waren. Mit dieser Vorgehensweise konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Die Länge der Schrauben kann so gewählt werden, dass die Schraubenlänge 10 mm größer ist als der maximal zu erwartende Abbrand. Dies ergibt sich in Anlehnung an die Verankerungslänge für Holzbekleidungen nach DIN EN 1995-1-2 Punkt 7.1.2, Bild 7.1. Die Schraubenlänge kann mithilfe der ideellen Abbrandrate und der sich dadurch ergebenden Abbrandtiefe nach Eurocode 5 ermittelt werden. Allerdings sollten die Schrauben nach Möglichkeit nicht überdimensioniert werden und so kurz gewählt werden, dass die Schrauben der Kaltseite auch nach Berücksichtigung des maximalen Abbrandes nicht in den Brandraum ragen. Nicht untersucht wurden durch das Modul hindurchgehende Befestigungsmittel. Es kann allerdings vermutet werden, dass diese einen negativen Einfluss haben. Wichtig ist eine an die angestrebte Feuerwiderstandsdauer angepasste Länge der Befestigungsmittel. Die Schrauben sollten lange genug, aber nicht unnötig lang sein. Weiterhin ist das Materialverhalten der Schrauben bei hohen Temperaturen zu berücksichtigen. Im Projekt wurden für den

Brandfall geeignete Schrauben verwendet. Bei ausreichender Länge und Beschaffenheit der verwendeten Schrauben ist nicht mit einem Abfallen von Abschottungen zu rechnen.

7.2.9 Oberflächentemperaturen

Die Oberflächentemperaturen auf den Holzmodulen (160 mm BSH) waren durchgängig als unkritisch zu beurteilen. Holz besitzt gute wärmedämmende Eigenschaften, sodass nur wenig Wärme vom Brandraum auf die unbeflammte Oberfläche der Module übertragen wird. Auch nimmt die Temperatur um den penetrierten Bereich, mit größer werdendem Abstand schnell ab. Es sind daher keine Messstellen auf der Moduloberfläche, zusätzlich zu den von DIN EN 1366-3 geforderten notwendig. Fugen um Holzmodule werden nicht als Modulfläche betrachtet.

7.2.10 Lokalisierung heißer Stellen mit Thermografiekamera, Validierung mit beweglichem TE

Die Verwendung der Thermografiekamera während der Versuche hat gezeigt, dass sich damit Schwachstellen identifizieren lassen. Während des Versuchs können die Temperaturen an auffallend heißen Stellen mit einem beweglichen Thermoelement überprüft werden. Die Messwerte, welche die Kamera ausgibt, sollten nur für die Materialien verwendet werden, für die der entsprechende Emissionsgrad in den Kameraeinstellungen ausgewählt wurde. In den durchgeführten Versuchen zeigten sich heiße Stellen in Ringspaltbereichen, auf Metallgehäusen von Manschetten und auf Intumeszenzmaterialien.

7.3 Beanspruchung der Proben in Abhängigkeit vom Prüfofen

Generell legt DIN EN 1366-3 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 einen Toleranzbereich für viele Versuchsparameter fest, der eingehalten werden muss. Dennoch sind Brandversuche teilweise individuell und Ergebnisse nicht eins zu eins reproduzierbar. Dies kann auf kleine Abweichungen von Versuchsaufbauten, der Eigenart des Brandes (Turbulenzen) im Ofen – gerade bei brennbaren Proben – sowie der Eigenart des Ofens an sich zurückgeführt werden. Unterschiede in den Ergebnissen können sich auch zwischen Versuchen mit gleichen Aufbauten in genormten Klein- und Großbrandöfen ergeben. Aufgrund der unterschiedlichen Größe des Brandraums sowie der Strömungsrichtung der Gase im Ofen kann der Probekörper unterschiedlich stark beansprucht werden. Im Großbrandofen der TUK erfolgt die Beflammung von beiden Seiten der Wand. Beim Kleinbrandofen der TUK findet die Beflammung von einer Seite statt, auf der anderen Seite werden die Rauchgase abgezogen. Auf diese Weise entsteht im Kleinbrandofen eine Strömung, welche parallel zum Probekörper ausgerichtet ist. Stehen einzelne Bauteile, wie Leitungen, aus dem flächigen Wandbauteil heraus, ragen sie direkt in diese Strömung bzw. werden direkt von der Gasflamme getroffen.

Vergleiche der Versuchsergebnisse aus dem Großbrandversuch B2 (Module 1,2, 3, 8) mit den Ergebnissen der Kleinbrandversuche BSH_Kupfer_01 und BSH_Kupfer_02 zeigen, dass die Beanspruchung bei einem Kleinbrandversuch größer ist. An den vergleichbaren Messstellen, welche sich auf der Oberfläche der Brandschutzrohrschale und der Brandschutzbandage befinden, sind die gemessenen Temperaturen in den Kleinbrandversuchen nach einer Versuchszeit von 90 Minuten durchweg höher als beim Großbrandversuch B2. Zusätzlich war die Leitungslänge innerhalb des Ofens beim Großbrandversuch um ca. 20 cm größer als beim Kleinbrandversuch. Weitere Messstellen können aufgrund von Unterschieden in den Versuchsaufbauten zwischen den Klein- und Großbrandversuchen nicht verglichen werden. Da die Ergebnisse aus Kleinbrandversuchen als konservativer im Vergleich zu den Versuchen in Großbrandöfen zu betrachten sind, ist eine Übertragung der Ergebnisse aus Kleinbrandversuchen auf Großbrandversuche möglich.

7.4 Erkenntnisse im Hinblick auf die untersuchten Abschottungssysteme

Generell ist die Verwendung von Abschottungssystemen deren Funktionalität auf Basis intumeszierender Baustoffe beruht zu empfehlen. Auch Abschottungssysteme, die ihre Leistung auf anderer Basis erbringen, können gut geeignet sein (siehe dazu Punkt 7.4.4). Durch die Wirkung intumeszierender Stoffe kann der Abbrand des Holzes kompensiert werden. Dies ist vor allem innerhalb der Öffnung / Bohrung relevant. Auch zu beachten ist eine intumeszierende Wirkung in Richtung der Abbrandebene bei vorgesetzten Produkten. Auf diese Weise kann ein Hinterbrennen der Abschottung verhindert werden. Bei Abschottungssystemen, die auf Basis stark wärmedämmender Materialien beruhen, kann der Eintrag von Hitze in den Ringspaltbereich behindert werden.

7.4.1 Rohrmanschetten

Die Verfüllung des Ringspalts sollte mindestens in der rechnerisch zu erwartenden Abbrandtiefe erfolgen (nach DIN EN 1995-1-2). Um dies gewährleisten zu können, muss ein gewisser Mindestspalt vorhanden sein (Möglichkeit Material einzubringen). Dieser sollte umlaufend mindestens 5 mm breit sein. Eine Begrenzung der maximalen Ringspaltbreite wurde in diesem Projekt nicht untersucht, kann allerdings aus [8], [48] und [77] abgeleitet werden. Die Verfüllung des Ringspalts muss umlaufend erfolgen, das Rohr darf an keiner Stelle direkt an der Öffnungsleibung anliegen. Es werden Abstandshalter (in der Art von Fliesenverleghilfen) zur Zentrierung des Rohres in der Öffnungsleibung empfohlen, die verhindern, dass das Rohr die Leibung berühren kann und der Mindestabstand eingehalten wird. Die Keile müssen, sofern sie sich stofflich von der Füllmasse des Ringspalts unterscheiden, am Ende wieder entfernt werden und die Fehlstellen im Füllmaterial ausgebessert werden. Das Füllmaterial muss die Verfüllung des Ringspalts ohne Fehlstellen ermöglichen. Auch vorgefertigte Passteile, die die o. g. Verfülltiefe sicherstellen, könnten eine sinnvolle Lösung darstellen. Das Füllmaterial muss

so beschaffen sein, dass sich auch während eines eventuellen Trocknungsprozesses, bei intumeszierenden Materialien zumindest oberflächlich, kein Spalt zwischen Dichtmasse und Holz bzw. Dichtmasse und Rohr ergibt. Essenziell ist in jedem Fall der Einbau der Systeme entsprechend des gültigen Anwendbarkeitsnachweises. Nur so kann sichergestellt werden, dass das System seine Leistung im Brandfall erbringen kann.

7.4.2 Weichschotts

Platten-Weichschottsysteme, mit inneren Hohlräumen sind nach Meinung der Autoren für die direkte Anwendung – wie sie nach aktuellen Anwendbarkeitsnachweisen herzustellen sind – in Holzbauteilen nicht geeignet. Durch den Abbrand des Holzes in den Randbereichen kann eine ausreichende Stabilität des Bauteils nicht gewährleistet werden. Infolge des Abbrands ist ein Eindringen von Feuer und Rauch in den Bereich zwischen den Steinwollplatten möglich. Es kommt zu starkem Rauchdurchtritt und zu einer starken Erhitzung der Leitungen und der Abschottungsoberfläche. Durch den Einbau einer (klassifizierten) Öffnungsleitung kann die Funktionsfähigkeit gegeben sein ([8], [77]). Weiterhin ist durch die Fehleranfälligkeit des Einbaus die richtige Anwendung der Bauart in der Praxis nicht sichergestellt. Beobachtungen der Autoren aus der Praxis bestätigen dies. Vor allem infolge einer Nachbelegung, welche bei Abschottungssystemen dieser Art in der Regel möglich ist, ist die Konformität mit dem Anwendbarkeitsnachweis nur noch in seltenen Fällen gewährleistet. Insgesamt ist es daher, unter Beachtung des angestrebten Sicherheitsniveaus, nicht zielführend Platten-Weichschotts (mit inneren Hohlräumen) in Holzbauteilen anzuwenden. Zu untersuchen ist, wie sich ein Platten-Weichschott verhält, das die Öffnung über die gesamte Bauteiltiefe verschließt. Auf diese Weise wäre ein Hinterbrennen der Weichschottplatte nicht möglich. Andere Arten „weicher“ Abschottungssysteme, wie z. B. Brandschutzsteine /-Blöcke, Brandschutzkissen oder Schaumabschottungen wurden nicht untersucht. Es kann angenommen werden, dass Abschottungssysteme, die intumeszierende Stoffe beinhalten in Holzbauteilen besser angewendet werden können, da Intumeszierende Stoffe den Abbrand des Holzes kompensieren können

7.4.3 Brandschutzkabelmanschetten

Die untersuchte Brandschutzkabelmanschette wurde in Übereinstimmung mit den Einbaubedingungen für massive Betonbauteile nach geltendem Anwendbarkeitsnachweis eingebaut. Die betrachteten Leistungskriterien konnten bis zu Versuchsende nach 120 Minuten aufrechterhalten werden. Bei der Montage der Brandschutzkabelmanschette in Holzbauteilen muss die Länge der verwendeten Schrauben größer sein als die rechnerische Abbrandtiefe (siehe dazu Punkt 7.2.8). Daneben sind zur Verwendung von Brandschutzkabelmanschetten in Holzbauteilen keine weiteren Einbaudetails zu beachten.

7.4.4 Brandschutzrohrschalen

Die untersuchten Brandschutzrohrschalen wurden entsprechend dem Anwendbarkeitsnachweis des Herstellers für massive Betonbauteile eingebaut. Das Abschottungssystem für nichtbrennbare Rohre konnte die Leistungskriterien nach DIN EN 1363-1 auch im Holzbauteil gleichermaßen erbringen. Im Laufe der Brandversuche ergab sich eine Verfärbung im Bereich des Ringspalts, welche allerdings keines der geforderten Leistungskriterien beeinträchtigt. Weiterhin ist ein geringfügiger Rauchdurchtritt am Ringspalt festzustellen. Dieser kann wahrscheinlich durch zusätzliches Abdichten des Ringspalts mit einem Brandschutzacrylat eingeschränkt werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es sich bei der Brandschutzrohrschale um eine passiv wirkende Abschottung handelt, die keinerlei intumeszierende Materialien beinhaltet. Auch diese Variante kann also funktionieren. Zu beachten ist, dass die Bohrung im Versuchsaufbau passend (nach Anwendbarkeitsnachweis) gewählt wurde, sodass sich kein, bzw. nur ein minimaler Ringspalt ergab.

7.4.5 Brandschutzbandagen

Die untersuchte Brandschutzbandage wurde nach den Vorgaben des Anwendbarkeitsnachweises für Betonbauteile eingebaut. Generell kann die Brandschutzbandage zur Abschottung nichtbrennbarer Rohre mit brennbarer Rohrisolierung ihre Leistung auch in Holzbauteilen erbringen. In massiven Holzbauteilen mit gewissen Mindestdicken kann die Anwendung ohne Einschränkung empfohlen werden. Auf einen Mindestabstand zwischen den beiden Teilen der Bandage ist zu achten.

8. Handlungsempfehlung

8.1 Leitungsabschottung in Holzbauteilen

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass die Führung der Leitungen durch Holzmodule mit diversen Abschottungssystemen möglich ist. Die Holzmodule sollen an der Stelle der vorgesehenen Leitungsdurchführung in das Holzbauteil eingesetzt werden. Die Holzmodule müssen definierte Eigenschaften aufweisen. Dabei soll / sollen

- das Modul eine Mindestdicke je nach geforderter Feuerwiderstandsdauer aufweisen (siehe Punkt 7.2.3),
- Mindestabstände zwischen den einzelnen Bohrungen in den Holzmodulen für die Leitungsdurchführungen eingehalten werden (siehe Punkt 7.2.7),
- Mindest- und Höchstmaße für Ringspalte beachtet werden (siehe Punkt 7.2.6),
- Befestigungsmittel die mindestens notwendige Verankerungstiefe erreichen (siehe Punkt 7.2.8),
- die grundsätzliche Eignung der Abschottungssysteme für die jeweiligen Feuerwiderstandsdauern in den Standardmodulen durch Feuerwiderstandsprüfungen nachgewiesen werden,
- auf Standardlösungen für die Ausbildung der Fugen zwischen Modul und Holzbauteil zurückgegriffen werden können. Eine Lösung wird in Punkt 7.2.5 genannt. Weitere Anschlussmöglichkeiten sollen in einem Folgeprojekt untersucht werden.

8.2 Prüfung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen

Zur Prüfung von Abschottungssystemen in Holzbauteilen können die Prüfbedingungen nach DIN EN 1366-3 in Verbindung mit 1363-1 herangezogen werden. Die Leistungskriterien zur Prüfung der Bauarten sind auch zur Beurteilung des Erreichens der Schutzziele bei der Anwendung in Holzbauteilen angemessen. In DIN EN 1366-3 sollten Holznormtragkonstruktionen zur Prüfung von Abschottungen aufgenommen werden. In den Versuchen wurden zusätzliche Messpunkte zur Messung der Temperaturen auf der Bauteiloberfläche und zur Messung der Temperaturen im Bauteilinneren angebracht. Die zusätzlich gemessenen Temperaturen waren nicht als kritisch zu beurteilen.

9. Kritische Systembetrachtung

Durch die Verwendung von Holz im Bereich der Durchführung müssen einige Schwierigkeiten bewältigt werden, die sich durch die Brennbarkeit des Baustoffs ergeben. Bei der Verwendung nichtbrennbarer Baustoffe im Bereich der Durchführung, müssten diese Themen nicht beleuchtet werden. Ein Modul aus nichtbrennbaren Baustoffen zur Abschottung würde dieselben Vorteile in Bezug auf die geringere Anzahl an erforderlichen Prüfungen mit sich bringen und gleichzeitig alle Schwierigkeiten, die bei der Abschottung durch die Brennbarkeit entstehen beseitigen. Prüfergebnisse aus dem Trockenbau würden teilweise als auf der sicheren Seite liegend beurteilt werden können und könnten auf die Module übertragen werden. An dieser Stelle ist allerdings auf Absatz 7.1 zu verweisen. Durch die Verwendung von Holzmodulen ergeben sich deutlich mehr Vorteile. Weiterhin kann das Einsetzen von Modulen, die teilweise nahezu dieselben Eigenschaften aufweisen wie das umgebende Bauteil, als unnötig erachtet werden. Teilweise wird es dies in der Realität auch sein. Allerdings besteht durch die Module die Sicherheit, da diese ein geprüftes System darstellen und somit einen entsprechenden Feuerwiderstand gewährleisten. Aufgrund der vielen Einflussparameter, die die Leistungsfähigkeit einer Abschottung in einem Bauteil beeinflussen, ist es schwer eine Grenze zu ziehen, welche Bauteile als auf der sicheren Seite liegend oder als kritischer zu einem vergleichbaren Bauteil zu beurteilen sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Sebastian Simon, *Hilti BU Fire Protection | R&D Expert*, 2017-2019.
- [2] Julia Förster, *Hilti BU Fire Protection | CEA Approval Engineering*, 2017-2018.
- [3] Dr. Frans Paap, *Hilti CEA Approval Engineer Fire Stop*, 2018-2019.
- [4] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Stephan Birk, *Architekt BDA*, 2017-2019.
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik, *DIBt-Newsletter 1/2018*, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2018.
- [6] Deutsches Institut für Normung, *DIN 4102-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, 2016.
- [7] B. Dr. Kampmeier, *Aktuelle Lösungen für den Brandschutz im Mehrgeschossigen Holzbau*, 2012.
- [8] B. Östman, E. Mikkola, R. Stein, A. Frangi, J. König, D. Dhima, T. Hakkarainen und J. Bregulla, *Fire safety in timber buildings*, 2010.
- [9] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung (MBO)*, 1997.
- [10] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung (MBO)*, 2002, zuletzt geändert 13.05.2016.
- [11] Bauministerkonferenz, *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise - Musterholzbaurichtlinie - (M-HFHolzR)*, 2004.
- [12] H. Kaufmann, S. Krötsch und S. Winter, *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*, 1 Hrsg., München: Detail Business Information GmbH, 2017.
- [13] D. Millich, „Neue Landesbauordnung für Hessen –Auswirkung auf das Baugenehmigungsverfahren und den baulichen Brandschutz,“ *Bundes Bau Blatt*, p. 23, 6 2002.
- [14] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung (MBO) - Begründung der Fassung November 2002 -*, 2002.
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik, *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)*, 2018.

-
- [16] Dr.-Ing. Mandy Peter; Institut des Zimmerer- und Holzbaugewerbes e.V., „Hoch hinaus - Mehrgeschossiger Holzbau,“ Berlin.
- [17] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, „lignum,“ 2017. [Online]. Available: http://www.lignum.ch/weitere_themen_teaser/mehrgeschossiger_holzbau/. [Zugriff am 14.07.2017].
- [18] A. Isopp, „Im Ländervergleich So hoch darf man mit Holz bauen,“ *Zuschnitt*, Nr. 33, p. 19, März 2009.
- [19] Confederation of Timber Industries, „A Glimpse into the Future: Mass Timber Projects“.
- [20] T. Salthammer und R. Marutzky, Bauen und Leben mit Holz, Berlin: DHWR Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V., 2013.
- [21] proHolz Austria, „pro:Holz,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.proholz.at/>. [Zugriff am 11. Mai 2017].
- [22] Deutsches Institut für Normung, *DIN 1052 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, 2004, p. 189.
- [23] J. Sell, Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Zürich: Lignum, 1997.
- [24] SDW/NRW, „Schutzgemeinschaft Deutscher Wald Landesverband NRW e.V.,“ 21.11.2017. [Online]. Available: <http://www.sdw-nrw.de/waldwissen/oekosystem-wald/kleines-waldlexikon/>.
- [25] proHolz Steiermark – Verband der steirischen Forst- und Holzwirtschaft, „waldspiele-stmk.at,“ 21.11.2017. [Online]. Available: <http://www.waldspiele-stmk.at/wissenswertes-ueber-holz/was-ist-holz/>.
- [26] proHolz Austria, „proHolz,“ 01.06.2017. [Online]. Available: <http://www.proholz.at/bauphysik/>.
- [27] F. Kollmann, „Zur Frage des Auftretens exothermer Reaktionen bei Holz,“ *Holz, Als Roh- und Werkstoff*, pp. 193 - 200, Juni 1960.
- [28] A. Lingens, „Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau,“ München, 2003.
- [29] M. u. N. B.-W. Landesanstalt für Umwelt, „Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg,“ 24.05.2018. [Online]. Available:

<https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/erneuerbare-energien/grundlagen>. [Zugriff am 24.05.2018].

- [30] R. H. White und M. A. Dienerberger, „Fire Safety of wood Construction,“ in *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, 2010, p. Chapter 18.
- [31] A. Golger, *Einfluss von schützenden Materialien auf das Abbrandverhalten von Brettsperrholz*, Kaiserslautern, Rheinland-Pfalz, 2014.
- [32] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN 1995-1-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall,“ 2010.
- [33] N. Fischer und S. Treml, „Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Rohdichte, der Spangröße und der Ausrichtung der Späne,“ Springer-Verlag, 2011.
- [34] P. Haller und J. Wehsener, „Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz,“ Springer-Verlag, 2004.
- [35] A. Gilka-Bötzow, A. Heiduschke und P. Haller, *Zur Abbrandrate von Holz in Abhängigkeit der Rohdichte*, Springer-Verlag, 2010.
- [36] Holzbau Deutschland, Bund Deutscher Zimmermeister, „Lagebericht 2017,“ 2017.
- [37] S. Krötsch und W. Huß, „inspiration.detail.de,“ 2016. [Online]. Available: <https://inspiration.detail.de/Download/document-download/id/58b58b09f0072>.
- [38] Interessengemeinschaft Stahl - Brandschutzbeschichtung (IGSB), „Brandschutzbeschichtungen im Stahlbau,“ 40237 Düsseldorf, 2014.
- [39] Hilti Deutschland AG, „Technisches Handbuch Brandschutzsysteme Hilti,“ 86916 Kaufering, 2017.
- [40] M. Schütt, „Thermoplastische Zwischenlagen zur Verbesserung der Brandbeständigkeit von carbonfaserverstärkten Epoxidharzsystemen,“ Cottbus, 2015.
- [41] European Organisation for Technical Assessment (EOTA), *ETAG 026 - Teil 2: Abschottungen*, 2008.
- [42] armacell, *Korrosionsrisiko unter der Dämmung*, 2018.

-
- [43] Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, „rockwool.de,“ 06 2018. [Online]. Available: <https://cdn01.rockwool.de/siteassets/rw-d/datenblatter/schragdach/db-klemmrock-035-rockwool.pdf?f=20180703033234>.
- [44] Doyma GmbH & Co, „Praxishandbuch Brandschutzsysteme,“ 28876 Oyten, 2016.
- [45] FST Feuer Schutz Technik R+D GmbH, „FST-Kombibox - Die Abschottung Ihrer kompletten Haustechnik,“ 64807 Dieburg.
- [46] Promat GmbH, „Montagerichtlinie Promastop-IM CBox 125 Brandschutzkabelbox,“ 40878 Ratingen.
- [47] M. Lippe, K. Czepuk, F. Möller und J. Reintsema, Kommentar zur Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR): Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispiele zu MLAR, MSysBör und EltBauVO, Winnenden: Heizungs-Journal Verlags-GmbH, 2018.
- [48] Bauministerkonferenz, *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen - Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR)*, 2015.
- [49] M. Lippe, J. Prof. Dr. Ing. Wesche, D. Rosenwirth und J. Dr. Reintsema, Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der MLAR, MSysBör, MEltBauVO, 4 Hrsg., Winnenden: Heizungs-Journal Verlags GmbH, 2011.
- [50] HBT Hochbau-Brandschutz-Technik GmbH, „www.hbt-brandschutz.de,“ 06 06 2018. [Online]. Available: <https://www.hbt-brandschutz.de/systeme/kombiabschottungen/brandschott-holzbalkendecke.html>.
- [51] Hilti, „freiburger-brandschutztag.de,“ 8 10 2016. [Online]. Available: https://www.freiburger-brandschutztag.de/wordpress/wp-content/uploads/2016/10/8_Waldner_Hilti-Brandschutz-Holzbau_FBT-2016-10-13.pdf. [Zugriff am 04 2019].
- [52] IBS Linz, „Prüfbericht Hilti, Holzdecke mit Abschottungen, Bericht Nr.: 318092507-1,“ 2019.
- [53] MPA Braunschweig, „Prüfbericht Hilti, Prüfung von diversen Abschottungssystemen [...] Holzwandkonstruktion aus Brettsperrholz [...] Holzrahmenwandkonstruktion [...] zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer, Prüfbericht (2401/086/16) - Wsp vom 13.11.2017,“ 2016.
- [54] MFPA Leipzig GmbH, „Prüfbericht Hilti, Fire-resistance rest on pipe bulkheads in a vertically installed state in a cross laminated timber element [...], Test Report No. PB 3.2/16-135-2,“ 2016.

-
- [55] Hilti, *Darstellung Abschottungssysteme in Holzbauteilen*, 2019.
- [56] H. Heermann, Interviewee, *Deutsche Rockwool Produktmanager*. [Interview]. 10 04 2019.
- [57] Rockwool, „www.rockwool.de,“ 20 02 2018. [Online]. Available: <https://www.rockwool.de/unternehmen/presse/abschottung-holzdecken/>.
- [58] Rockwool, „rockwool.com,“ 20 02 2018. [Online]. Available: <https://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-de/unternehmen/presse/02202018-abschottung-holzdecken/presse-abschottung-holzdecke-bilder1-2.zip>.
- [59] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 1366-3 Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen*, 2009.
- [60] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, 2012.
- [61] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht_OSB_Kabelmanschette_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [62] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Kabelmanschette_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [63] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Kabelmanschette_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [64] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Kupfer_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [65] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Kupfer_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [66] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Rohrmanschette_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [67] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Rohrmanschette_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [68] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Weichschott_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [69] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht BSH_Weichschott_02,“ Kaiserslautern, 2018.

-
- [70] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Kabelmanschette_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [71] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Kupfer_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [72] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Kupfer_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [73] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Rohrmanschette_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [74] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Rohrmanschette_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [75] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Weichschott_01,“ Kaiserslautern, 2018.
- [76] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht OSB_Weichschott_02,“ Kaiserslautern, 2018.
- [77] M. Teibinger und I. Matzinger, Brandabschottung im Holzbau - Planungsbroschüre, Wien: Holzforschung Austria, 2013.
- [78] Deutsches Institut für Normung, *DIN 4102-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, 1994.
- [79] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht B1_Holzrahmenwand,“ TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2019.
- [80] C. Dr.-Ing. Thiele, D. Prof. Dr.-Ing. Lorenz und T. Scherer, „Versuchsbericht B2_Brettsperrholzwand,“ TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2019.
- [81] L. Ranger, C. Dagenais, C. Lum und T. Thomas, „Fire performance of firestops, penetrations, and fire doors in mass timber assemblies,“ in *World Conference on Timber Engineering*, Seoul, 2018.
- [82] Deutsches Institut für Normung, „DIN 4102-9 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Kabelabschottungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen,“ 1990.
- [83] Deutsches Institut für Normung, *DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, 1998.

- [84] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 13501-1 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*, 2010.
- [85] Deutsches Institut für Normung, *DIN 4102-2 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*, 1977.
- [86] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 13501-2 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsleitungen*, 2016.
- [87] C.-D. Erchinger, *Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall*, Diss., Zürich: ETH Library, 2009.
- [88] National Research Council Canada, *Thermal Properties of Wood, Gypsum and Insulation at Elevated Temperatures*, 2001.
- [89] B. Banerjee, *An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high-temperature and high-strain-rate deformation of metals*, Utah: University of Utah, 2005.