

Thomas Scherer



Untersuchungen zu Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile im Brandfall

Schriftenreihe des Fachgebiets Baulicher Brandschutz | Band 03
Herausgegeben von Prof. Dr. Oliver Kornadt

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnd.ddb.de>.

Herausgeber: Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Baulicher Brandschutz
Prof. Dr. Oliver Kornadt

Postfach 3049
Technische Universität Kaiserslautern
67653 Kaiserslautern

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
Hauptabteilung 5 | Bau-Technik-Energie
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Der Herausgeber, Thomas Scherer, Kaiserslautern 2021

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN: 2509-4742
ISBN: 978-3-95974-148-4

Untersuchungen zu Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile im Brandfall

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität
Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

Thomas Scherer

06. Januar 2021



Dekan:

1. Gutachten:

2. Gutachten:

Tag der mündlichen Prüfung:

Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar

Prof. Dr.-Ing. Dirk Lorenz

apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele

18. Februar 2021

Vorwort

Diese Arbeit entstand in der Zeit meiner Tätigkeit an der TU Kaiserslautern, die durch die jeweils hälftige Anstellung bei den Fachgebieten Baulicher Brandschutz und Massivbau- und Baukonstruktion geprägt wurde.

Herzlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Lorenz für die Ermöglichung meiner Promotion und die Betreuung derselben. Ebenfalls herzlicher Dank geht an die zweite Berichterstatterin Frau apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele, die mich bei verschiedensten Fragestellungen unterstützte.

Weiterhin möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Oliver Kornadt herzlich für die gute Zeit als Mitarbeiter und außerdem für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission bedanken.

Meinen ehemaligen und derzeitigen Kollegen aus den Gebäuden 67, 60, 57, 29 sowie 14, die vor allem den Fachgebieten Baulicher Brandschutz, Massivbau- und Baukonstruktion, Stahlbau, Bauphysik sowie dem DISC angehören, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und Gespräche bedanken. Besonders erfreue ich mich an den Freundschaften, die durch die Zusammenarbeit entstanden sind und die ich nicht missen möchte.

Ein großer Dank gebührt zudem allen Studierenden, die mich im Rahmen ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskräfte oder aber in Form wissenschaftlicher Arbeiten bei meinen Aufgaben und meiner Forschungstätigkeit unterstützt haben.

Besonderer Dank geht außerdem an die Herren Philipp Peifer, Dr.-Ing. Philipp Diewald und Dr.-Ing. Wolfgang Lüder, mit denen ich oft fachliche Aspekte diskutieren durfte und die sich die Mühe machten, meine Arbeit zu kommentieren und mir Ratschläge zu geben.

Auch möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau bedanken, die mich bei der Durchführung von Versuchen immer tatkräftig unterstützt haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich auf meinem gesamten Bildungsweg begleitet und unterstützt hat. Auch meinen Freunden gebührt Dank für viele tolle Momente, die mein Leben bereichern und den nötigen Ausgleich zur Arbeit sichern.

*"[...]
Wohltätig ist des Feuers Macht,
Wenn sie der Mensch bezähmt, bewacht,
Und was er bildet, was er schafft,
Das dankt er dieser Himmelskraft,
Doch furchtbar wird die Himmelskraft,
Wenn sie der Fessel sich entrafft,
Einhertritt auf der eignen Spur
Die freie Tochter der Natur
Wehe, wenn sie losgelassen
Wachsend ohne Widerstand
Durch die volkbelebten Gassen
Wälzt den ungeheuren Brand!
[...]"*

*Das Lied von der Glocke
Friedrich Schiller*

Kurzzusammenfassung

Leistungsabschottungen im Holzbau werden derzeit mit einer Behelfslösung ausgeführt. Eine auf den Holzbau angepasste Lösung ist erforderlich. In dieser Arbeit wird ein neuartiger Lösungsansatz zur Ausführung dieser Schnittstelle zwischen Konstruktion und technischer Gebäudeausrüstung, die Methode Holz-in-Holz, vorgestellt. Dabei wird im Bereich von Leitungsdurchführungen ein massives Holzbauteil mit definierten Eigenschaften in Holzbauteile eingesetzt. Die Leistungsabschottung erfolgt in diesem massiven Holzbauteil. Vorteilhaft dabei ist die Versteifung der entstehenden Schnittstelle sowie der entfallende Werkstoffwechsel. Untersucht wird zunächst die Anwendung klassifizierter Abschottungen in Holzbauteilen. Weiterführende Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Dichtmaterialien für Einzelleitungsdurchführungen folgen. Aufbauend auf Brandversuchen an einzelnen metallischen Leitungen in passgenauen Bohrungen werden mithilfe von Finite Element Simulationen angepasste Querschnitte massiver Holzbauteile für unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern sowie Mindestabstände zwischen Bohrungen für Leitungsdurchführungen ermittelt. Möglichkeiten zum Anschluss und zur Befestigung der Module an unterschiedliche Holzwand- und Deckenkonstruktionen werden erarbeitet. Die Arbeit schließt mit einem Vorschlag zur Implementierung der Herangehensweise in gültige Technische Baubestimmungen ab.

Abstract

Penetration seals in timber construction are currently implemented with a workaround solution. A solution adapted to timber construction is required. This thesis presents a new approach to the implementation of this interface between construction and technical building equipment, the wood-in-wood method. In this method, a solid timber component with defined properties is inserted into timber components in the area of cable penetrations. The penetration seal is installed in this solid wood component. The advantage of this is the steadying of the created interface and the elimination of the need to change materials. First of all, the application of classified penetration seals in wooden components is investigated. This will be followed by further investigations concerning suitable sealing materials for single conduit penetrations. Based on fire tests on individual metallic pipes in precisely fitting holes, finite element simulations will be used to determine adapted cross-sections of solid wood components for different fire resistance durations as well as minimum distances between holes for pipe penetrations. Options for connecting and attaching the modules to different timber wall and ceiling structures are developed. The work concludes with a proposal for implementing the approach in existing technical building regulations.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Herangehensweise	2
2	Grundlagen des Brandschutzes in Deutschland	5
2.1	Bauordnungsrechtliche Anforderungen - ausgewählte Inhalte	5
2.1.1	Brandschutztechnische Schutzziele	5
2.1.2	Gebäudeklassen	6
2.1.3	Feuerwiderstand und Brandverhalten	7
2.1.4	Führung von Leitungen durch raumabschließende Bauteile mit Anforderungen an den Feuerwiderstand	10
2.2	Grundlagen zur Leitungsführung durch Holzbauteile - Technische Baubestimmungen	10
2.2.1	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen - MVV TB	10
2.2.2	Muster-Leitungsanlagenrichtlinie - MLAR	11
2.2.3	Muster-Lüftungsanlagenrichtlinie - M-LüAR	15
2.2.4	Muster-Holzbaurichtlinie - M-HFH HolzR	17
2.3	Zwischenfazit	19
3	Grundlagen zum Holzbau und Baustoff Holz	20
3.1	Grundlagen zum Holzbau	20
3.1.1	Mehrgeschossiger Holzbau	20
3.1.2	Konstruktionsmethoden im Holzbau	21
3.1.3	Holzwerkstoffe	22
3.1.4	Ausbildung von Öffnungen in Holzbauteilen	24
3.1.5	Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall	28
3.2	Brandschutztechnisch relevante Eigenschaften von Holz	31
3.2.1	Chemischer Aufbau	31
3.2.2	Holz als Baustoff - Materialeigenschaften	32
3.2.3	Verbrennung von Holz	33
3.2.4	Einflussfaktoren auf die Abbrandrate	35
3.2.5	Temperatur an der Abbrandgrenze	37
3.2.6	Thermische Eigenschaften von Holz	40
3.3	Zwischenfazit	47
4	Grundlagen zu Leitungsabschottungen	48
4.1	Grundlagen zu klassifizierten Leitungsabschottungen	48
4.1.1	Allgemeines	48
4.1.2	Wirkungsweise von Abschottungen	49
4.1.3	Arten von Leitungsabschottungen und Abschottungssystemen	50
4.1.4	Prüfung und Klassifizierung von Leitungsabschottungen	53
4.1.5	Rauchdurchtritt durch Leitungsabschottungen	57
4.1.6	Verwendung und Anwendung von Leitungsabschottungen	58

4.2	Leitungsabschottungen in Holzbauteilen	59
4.2.1	Gegenwärtige Vorgehensweise zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen in Deutschland	59
4.2.2	Internationale Untersuchungen zu Abschottungen im Holzbau	61
4.3	Zwischenfazit	68
5	Alternativer Ansatz zur Anwendung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen	69
5.1	Mögliche alternative Ansätze	69
5.2	Die Methode „Holz-in-Holz“	71
5.2.1	Vorteile der Methode	71
5.2.2	Limitationen	72
5.2.3	Notwendige Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Methode „Holz-in- Holz“	73
5.3	Zwischenfazit	74
6	Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Holzmodulen	75
6.1	Modulaufbau	75
6.2	Identifikation von Versagensmechanismen	78
6.2.1	Untersuchte Abschottungssysteme	79
6.2.2	Versuchsdurchführung	81
6.2.3	Versuchsergebnisse	81
6.3	Untersuchungen zur Bestätigung der Anwendbarkeit der Methode „Holz-in-Holz“	86
6.3.1	Versuchsaufbauten	86
6.3.2	Versuchsdurchführung	89
6.3.3	Ergebnisse der Großbrandversuche	89
6.4	Zwischenfazit	91
7	Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile	93
7.1	Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dicht- materialien	93
7.1.1	Versuchsaufbauten	93
7.1.2	Versuchsdurchführung	100
7.1.3	Versuchsergebnisse	101
7.2	Zwischenfazit	112
7.3	Versuchsreihe an metallischen Leitungen in passgenauen Bohrungen	113
7.3.1	Versuchsaufbau	113
7.3.2	Versuchsdurchführung	114
7.3.3	Versuchsergebnisse	115
7.4	FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen	122
7.4.1	FE-Analyse für thermisch transiente Berechnungen	122
7.4.2	Nachsimulation und Extrapolation der Versuchsergebnisse	123
7.5	Zwischenfazit	149
8	Untersuchungen zum Anschluss der Holzmodule an Holzbauteile	150
8.1	Versuchsreihe „Anschlussfuge Modul an Holzbauteil“	150
8.1.1	Versuchsaufbauten	151
8.1.2	Versuchsdurchführung	153
8.1.3	Versuchsergebnisse	154
8.2	Anschlussbedingungen und Fugenausführung	158
8.2.1	Öffnungsbildung	158
8.2.2	Fugenausführung	161

8.2.3	Befestigung der Module	161
8.3	Zwischenfazit	162
9	Empfehlungen hinsichtlich Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile	163
9.1	Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Leitungsdurchführung durch Holzbauteile	163
9.1.1	Anwendung klassifizierter Abschottungssysteme im Holzbau	165
9.1.2	Durchführungen einzelner Leitungen ohne klassifizierte Abschottungssysteme	165
9.1.3	Unterschiede zu Abschottungen in Bauteilen aus herkömmlichen Baustoffen	170
9.2	Implementierung der Methode Holz-in-Holz in Technische Baubestimmungen	171
9.2.1	Ergänzung der Leitungsanlagenrichtlinie	171
9.2.2	Ergänzung der MHolzBauRL	173
10	Schluss	174
10.1	Zusammenfassung	174
10.2	Limitationen	175
10.3	Ausblick	175
11	Anlagen	192

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	4
2.1	Gebäudeklassen nach Musterbauordnung (MBO)	7
2.2	Vorgaben des (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)) zu Abständen zwischen Abschottungen und Öffnungen [24]	12
2.3	Öffnung mit Öffnungsleibung nach Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR)	18
2.4	Schnitt Öffnungsleibung nach M-HFHHolzR	19
3.1	Anteil der genehmigten Gebäude in Holzbauweise 2004 bis 2019 [30]	21
3.2	Vertikale und horizontale Komponenten unterschiedlicher Konstruktionsmethoden im Holzbau, modifiziert entnommen aus [32]	22
3.3	Unterteilung von Werkstoffen aus Holz, eigene Darstellung in Anlehnung an [34]	23
3.4	Darstellung des Aufbaus von Brettschichtholz (links) und Brettsperrholz (rechts), entnommen aus [6]	23
3.5	Darstellung des doppelten (links) und einfachen (rechts) Versatzes zur Ausführung von Eckfugen bei Brandschutzbekleidungen [35]	24
3.6	Darstellung eines Weichschottsystems, innerhalb einer Öffnung mit Leibungsbekleidung und einfachem Fugenversatz in einem Deckenbauteil [35]	25
3.7	Darstellung eines Weichschottsystems, innerhalb einer Öffnung mit Leibungsbekleidung in einem massiven Holzdeckenbauteil [35]	25
3.8	Ausbildung der Öffnungsleibung bei Oberflächen mit nichtbrennbarer Bekleidung in der Schweiz, entnommen aus [38]	26
3.9	Ausbildung der Öffnungsleibung bei brennbaren Bauteiloberflächen in der Schweiz, entnommen aus [38]	27
3.10	Ausbildung der Öffnungsleibung bei brennbaren Bauteiloberflächen ohne Fugenversatz in der Schweiz, entnommen aus [38]	27
3.11	links: Ablauf und Phasen eines natürlichen Brandes [47]; rechts: Verlauf der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) sowie beispielhafte Darstellung eines berechneten Naturbrandes nach [48], dessen Verlauf die ETK zeitweise übersteigt	28
3.12	Prozesse im Holz in Abhängigkeit der Temperatur, [60–62]	34
3.13	Zeit bis zur Entzündung von Holz in Abhängigkeit der Temperatur, entnommen aus [69], Primärquelle [70]	34
3.14	Darstellung der Abbrandgrenze	38
3.15	Temperaturen im Holz bei Brandbeanspruchung (ETK) eines 160 mm dicken Vollholzquerschnittes (Brettschichtholz) über 120 Minuten [98, 99]	39
3.16	Temperaturabhängige Rohdichte von Holz nach Eurocode 5 [39]	41
3.17	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Holz und Holzkohleschicht [39]	44
3.18	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität für Holz und Holzkohle nach Eurocode 5 [39]	46
4.1	Unterschiedliche Abschottungssysteme im Einbauzustand [132]	51
4.2	Positionen der Thermolemente, modifiziert übernommen aus [131]	56
4.3	Abschottung von Einzelleitungen nach Vorgaben der Lignum Dokumentation, entnommen aus [38]	66

5.1	Darstellung der Vorgehensweise bei der Methode „Holz-in-Holz“	71
6.1	Aufbau des BSH-Moduls	76
6.2	Aufbau des OSB-Moduls	76
6.3	Darstellung der im Projekt LeitHolz untersuchten Abschottungssysteme	79
6.4	Weichschottsystem vor, während und nach dem Brandversuch	82
6.5	Verhalten des Weichschotts während des Brandversuchs	83
6.6	Rohrmanschette vor, während und nach dem Brandversuch	85
6.7	Darstellung des Versagenszeitpunkt einer Rohrmanschette im Brandofen	85
6.8	Aufbau der Holzrahmenwand, oberer Bildteil: Bereich ohne Öffnungen, unterer Bildteil: Bereich mit Öffnungen für Module	87
6.9	Aufbau der Brettspertholz wand	87
6.10	Wandprobekörper Brettspertholz wand mit Holzmodulen mit Abschottungen	88
6.11	Unterschiede in der verbleibenden Kohleschichtdicke bei BSH und BSP	90
6.12	Links: Beispielhafte Darstellung des Abbrandtrichters einer Brandschutzrohrschale, rechts: Darstellung der unterschiedlichen Abbrandtrichter von verschiedenen Durchführungen [98]	91
7.1	Untersuchte Probekörper der Versuchsreihe	95
7.2	Einzelne Leitungen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf und oberhalb der Leitungen	100
7.3	Beispielhafte Darstellung eines Schnittes nach dem Brandversuch durch Bohrungen eines Probekörpers	103
7.4	Darstellung eines Moduls mit Temperaturmessstellen (rot).	114
7.5	Metallische Leitungen in passgenauen Bohrungen: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf und oberhalb der Leitungen	115
7.6	Vergleich der Temperaturverläufe des Versuchs H60CuV an der Messstelle 25mm von der Moduloberfläche entfernt (Mittelwerte aus Messstelle 3 und 5) der Rohrleitungen $\varnothing 12$, $\varnothing 22$, $\varnothing 42$ [196]	118
7.7	Temperaturen auf der Rohroberfläche (Rohr $\varnothing 22$ mm) an der Messstelle 3/4 und 5/6 (25 mm und 125 mm) im Versuch H160CuV und der Messstelle 5/6 und 7/8 (125 mm und 225 mm) im Versuch H60CuV [196]	119
7.8	Darstellung des Abbrands um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm im Modul mit der Dicke 160 mm nach 90 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK [196]	120
7.9	Darstellung des Abbrands um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm im Modul mit der Dicke 60 mm nach 30 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK	121
7.10	Darstellung der angenommenen Luftströmung im Rohrquerschnitt	123
7.11	Temperaturabhängige Rohdichte von Kupfer nach [200]	124
7.12	Temperaturabhängige Wärmeleitzahl von Kupfer nach [200]	125
7.13	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Kupfer nach [200]	125
7.14	Simulation $\varnothing 12$ H60CuV bei Eingabe einer spez. Wärmekapazität von $400 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ und einer Wärmeleitzahl von $300 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	126
7.15	Simulation von $\varnothing 42$ H60CuV bei Eingabe einer spez. Wärmekapazität von $400 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ und einer Wärmeleitzahl von $300 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	126
7.16	Ansicht des Kleinbrandofens mit Positionen von Brenner, Temperaturmessstellen und Probekörper, Maße in Millimeter	127
7.17	Darstellung der geometrischen Eigenschaften der verwendeten Kupferrohrleitungen	128

7.18	Verhältnis des Anteils der Querschnittsfläche des Rohrwerkstoffs zum luftgefüllten Querschnitt in Abhängigkeit des Rohrradius, bei gleichbleibender Rohrwandstärke	129
7.19	Wärmeleitzahl zur Simulation in Abhängigkeit des Verhältniswertes V	130
7.20	Wärmeleitzahl zur Simulation in Abhängigkeit vom Rohrradius bei gleichbleibender Rohrwandstärke	131
7.21	Ofentemperatur an den Ofenthermometern A und B sowie deren Mittelwert über den Versuchsverlauf	132
7.22	Simulation des Rohrs mit dem $\varnothing 12$ des Versuchs H60CuV unter Temperaturbeanspruchung entsprechend des Messwerts des Ofenthermometers A	133
7.23	Fotografische Darstellung des Abbrandes um ein Kupferrohr mit dem Durchmesser 22 mm sowie daraus ermittelte Messwerte des Abbrandes um die Leitung	134
7.24	Mittelung des oberseitigen und unterseitigen Abbrandes an Probekörperschnitten	135
7.25	Beispielhafte Darstellung der Verschiebung des simulierten Abbrands um das Rohr $\varnothing 12$ mm im 160 mm dicken Modul um 15 mm in Richtung unbeflammter Seite, um konservative Ergebnisse hinsichtlich der Abbrandtiefe zu erhalten	136
7.26	Vergleich der Temperaturen auf einer Kupferrohrleitung mit dem Durchmesser 42 mm in 90 mm dicken Modulen über 30 Minuten (90_30), 120 mm dicken Modulen über 60 Minuten (120_60) sowie 160 mm dicken Modulen über 90 Minuten (160_90)	138
7.27	Darstellung der Abbrandgrenze um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm in Modulen mit den Dicken 90 mm, 120 mm und 160 mm bei entsprechenden Beanspruchungsdauern nach ETK	139
7.28	Darstellung der Abbrandgrenze um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm in Modulen mit den Dicken 60 mm und 90 mm nach 30 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK	140
7.29	Erwärmung zwischen den Rohrleitungen bei benachbarten Leitungen; Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm, Abstand entspricht Rohrdurchmesser	141
7.30	Erwärmung zwischen den Rohrleitung bei Anordnung von vier Leitungen im Quadrat; Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm, Abstand entspricht Rohrdurchmesser	142
7.31	Kritische Anordnungen von Bohrungen	143
7.32	Erwärmung zwischen den Rohrleitungen bei Anordnung von vier Leitungen; Abstand D (vgl. Abb. 7.31); Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm	144
7.33	Verlauf der Temperatur im Holzquerschnitt mittig zwischen den Rohren 1 und 2 (mit Eingabeparametern wie in Abb. 7.32)	145
7.34	Darstellung der Lage und der Temperaturverläufe der kritischen Pfade für die ermittelten Mindestabstände zwischen den Rohrleitungen und entsprechenden Rohrdurchmessern	146
7.35	Darstellung der Abstände und Moduldicken aus Tab. 7.15	148
7.36	Temperaturen auf der Rohrleitung $\varnothing 42$ mm und auf der Holzoberfläche bei Anordnung im ermittelten Mindestabstand nach 30 Minuten Beanspruchung nach ETK	148
8.1	Allgemeiner Aufbau der Probekörper: Anschlussfuge Modul/Bauteil	152
8.2	Unterschiedliche untersuchte Arten der Fugenausbildung	152
8.3	Darstellung der unterschiedlichen untersuchten Fugenausbildungen	153
8.4	Anschlussfuge Holz an Holz: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf der unbeflammten Seite	154
8.5	Ansicht des Kleinbrandofens mit Positionen von Brenner und Probekörper, Maße in Millimeter	156

8.6	Darstellung des Temperaturverlaufs der Messstellen in einer Tiefe von 24 mm am Beispiel einer intumeszierenden Fugenschnur 24 mm und einer Fugenbreite von 21 mm	157
8.7	Darstellung des Temperaturverlaufs der Messstellen in einer Tiefe von 54 mm am Beispiel einer intumeszierenden Fugenschnur 24 mm und einer Fugenbreite von 21 mm	157
8.8	Vorschläge zum Anschluss der Module an unterschiedliche Arten von Wandbauteilen	159
8.9	Vorschläge zum Anschluss der Module an unterschiedliche Arten von Deckenbauteilen	160
8.10	Befestigung der Module an Wand- und Deckenbauteilen	162
9.1	Vorgehensweise zur Abschottungen von Leitungen in Holzbauteilen mit der Methode Holz-in-Holz	164
9.2	Darstellung einzuhaltender Abstände und Moduldicken (Wiederholung von Abb. 7.35)	169

Tabellenverzeichnis

2.1	Baustoffklassen nach DIN 4102 [17] und DIN EN 13501 [4]	9
2.2	Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2 [19] und DIN EN 13501-2 [18]	10
2.3	Erleichterungen nach Muster-Leitungsanlagenrichtlinie Stand 05.04.2016	13
3.1	Temperatur an der Abbrandgrenze	38
4.1	Bauaufsichtliche Anforderung und Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-9 bzw. DIN 4102-11 [137]	54
4.2	Bauaufsichtliche Anforderung und Zuordnung der Klassifizierungen nach DIN EN 13501-2:2010-02 [137]	55
4.3	Passende Dichtmaterialien für Leitungsdurchführungen gemäß [36]	62
4.4	Eignung von Abschottungen für die Anwendung in Holz gemäß [36]	63
7.1	Bohrloch- und Leitungsdurchmesser der Versuchsaufbauten	96
7.3	Überschreitung des Temperaturkriteriums auf den Leitungen in den Modulen drei bis acht	102
7.4	Bewertung des Abbrandes in der Bohröffnung	104
7.5	Zusammenfassung der Empfehlungen hinsichtlich der Verwendung von Dichtmaterialien bei den untersuchten Leitungen	109
7.6	Zusammenfassung der Empfehlungen hinsichtlich Ringspaltabmessungen bei den untersuchten Leitungen	111
7.7	Versuchskonfigurationen	114
7.8	Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 25 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 3 und 4	116
7.9	Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 125 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 5 und 6	116
7.10	Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 225 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 7 und 8	116
7.11	Prozentualer Anteil der jeweiligen Temperatur (zu Versuchsende) an der Messstelle 225 mm entfernt von der Moduloberfläche an der Temperatur an der Messstelle 25 mm entfernt von der Moduloberfläche, siehe Tabellen 7.10 und 7.8	118
7.12	Rohdichte von Kupfer nach [200]	124
7.13	Wärmeleitzahl von Kupfer nach [200]	125
7.14	Wärmekapazität von Kupfer nach [200]	125
7.15	Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung aus Abschnitt 7.3 und Abschnitt 7.4	147
8.1	Unverkohelter Restquerschnitt im Fugenbereich	155
9.1	Zusammenfassung der erforderlichen Mindestmoduldicken, einzuhaltende Abständen zum Modulrand sowie Abständen zwischen klassifizierten Abschottungen	164
9.2	Vorgaben hinsichtlich zu verwendender Dichtmaterialien bei Einzelleitungsdurchführungen	167
9.3	Zusammenfassung der Vorgaben hinsichtlich der Ringspaltabmessungen	168

9.4 Zusammenfassung der Vorgaben hinsichtlich Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsfähigkeit bzw. der Moduldicke	169
--	-----

Abkürzungsverzeichnis

aBG	allgemeine Bauartgenehmigung
abP	allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
b. B.	brennbare Baustoffe
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
CLT	Cross Laminated Timber
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CNC	Computerized Numerical Control
EAD	European Assessment Document/Europäisches Bewertungsdokument
EOTA	European Organisation for Technical Assessment/Europäische Organisation für Technische Bewertung
ETA	European Technical Assessment/Europäische Technische Bewertung (ETB)
ETAG	European Technical Assessment Guideline
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
ETZ	Europäisch technische Zulassung; European Technical Approval (ETA)
Eurocode	DIN EN 199X-y-z
fb	feuerbeständig
fh	feuerhemmend
GK	Gebäudeklasse
hEN	harmonisierte europäische Norm
hfh	hochfeuerhemmend
MBO	Musterbauordnung
M-HFHHolzR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
MLAR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen, kurz: Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie

M-LüAR	Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie
MUF	Melamin-Urea-Formaldehyd
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
n. b.	nichtbrennbar
n. b. B.	nichtbrennbare Baustoffe
OSB	oriented strand board
PEX	Vernetztes Polyethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
TE	Thermoelement
vBG	vorhabenbezogene Bauartgenehmigung
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
ZiE	Zulassung im Einzelfall

Definitionen

Abbrandebene Als Abbrandebene wird in dieser Arbeit der Übergang zwischen der Kohleschicht (schwarz) und dem unverbrannten Restholz (ursprüngliche Holzfarbe) eines teilweise verkohlten Holzquerschnitts bezeichnet.

Abbrandtrichter Trichterförmiger Einbrand der sich innerhalb eines Holzbauteils beidseits einer Bohrung mit einer durchgeführten Leitung einstellt.

Abschottung Eine Abschottung ist eine Bauart zur Ertüchtigung des Bereichs von Leitungsdurchdringungen durch Bauteile mit Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit, die dazu dient Sekundärbrände zu verhindern. Eine Abschottung hat konkrete Abmessungen und eine konkrete Belegung, ihr kann genau eine Feuerwiderstandsklasse zugewiesen werden (in Anlehnung an [1]).

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 [1]).

Bauart § 2 (11) MBO: „*Bauart ist das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen*“ [2].

Bauprodukt Artikel 2 Bauproduktenverordnung: „*Jedes Produkt oder jeden Bausatz, das beziehungsweise der hergestellt und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerks im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt*“ [3].

Bausatz Artikel 2 Bauproduktenverordnung: „*Ein Bauprodukt, das von einem einzigen Hersteller als Satz von mindestens zwei getrennten Komponenten, die zusammengefügt werden müssen, um ins Bauwerk eingefügt zu werden, in Verkehr gebracht wird*“ [3].

Baustoff „*Material, das aus einem einzigen Stoff oder aus einem fein verteilten Gemisch besteht, z. B. Metall, Stein, Holz, Beton, Mineralwolle mit gleichmäßig verteiltem Bindemittel, Polymere*“ [4].

Bauteil „*Ein bestimmtes Teil eines Bauwerks, z. B. Wand, Trennwand, Türelement, Decke, Dach, Balken oder Stützen*“ [5].

Einzelabschottung Abschottungssysteme für einzelne Leitungen in eigenen Öffnungen [1].

Brettschichtholz DIN EN 14080 [6] definiert Brettschichtholz als ein „Bauteil aus Bauholz für tragende Zwecke aus mindestens zwei im Wesentlichen parallelen Lamellen, das aus einem Brett oder zwei nebeneinanderliegenden Brettern bestehen kann, wobei die endgültige Dicke zwischen 6 mm und einschließlich 45 mm liegt.“ Brettschichtholz wird häufig mit BSH abgekürzt. In englischsprachiger Literatur wird Brettschichtholz als Glued Laminated Timber (glulam) bezeichnet.

Brettspertholz Nach DIN EN 16351 [7] ist Brettspertholz definiert als ein „tragendes Holzprodukt, das aus mindestens drei rechtwinklig verleblten Lagen besteht und stets Brettlagen und möglicherweise auch Lagen aus Holzwerkstoffen enthält.“ Brettspertholz wird häufig mit BSP abgekürzt. Geläufiger ist die englische Bezeichnung Cross Laminated Timber (CLT) oder auch X-Lam.

Carbonisierend Die Bildung einer harten Kruste bei Hitzeeinwirkung/im Brandfall.

Einzelabschottung Abschottungen, die an einzelnen Leitungen in eigenen Öffnungen angeordnet werden [1].

Mehrfachabschottung Abschottungssysteme für mehrere Leitungen einer Leitungsgruppe (z.B. Kabel, brennbare Rohre, nichtbrennbare Rohre). Mehrfachabschottungen und Kombiabschottungen werden auch als große oder flächige Abschottungen bezeichnet [1].

Kombiabschottung Abschottungssysteme zur Abschottung unterschiedlicher Leitungsarten in einer gemeinsamen Öffnung [1].

klassifizierte Abschottung Eine Abschottung für deren Verwendung bzw. Anwendung ein Verwendbarkeitsnachweis (abZ, abP, ZiE) bzw. ein CE-gekennzeichnetes Bauprodukt und ein Anwendbarkeitsnachweis (abP, aBG, vBG) notwendig ist.

EOTA Englisch: European Organisation for Technical Assessment, deutsch: Organisation der Technischen Bewertungsstellen. Verantwortlich für die Erstellung von EADs und für die Koordination der Ausstellung von ETAs [8].

ETA Ein European Technical Assessment (ETA) nach Bauproduktenverordnung (Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates Text von Bedeutung für den EWR) ist ein Dokument zum Nachweis der Verwendbarkeit von Bauprodukten und Bausätzen. Der entsprechende deutsche Begriff lautet Europäische Technische Bewertung (ETB). Die ETA ist Grundlage für die CE-Kennzeichnung von Bauprodukten. Sie enthält Angaben zu Leistungen von Bauprodukten, welche nicht vollständig von einer harmonisierten Norm erfasst sind [8]. Die Bauproduktenverordnung trat am 01.07.2013 in Kraft.

EAD Ein European Assessment Document (EAD) Eine harmonisierte technische Spezifikation, die als Grundlage zur Erstellung von ETAs dient [8]. Zu deutsch: Europäisches Bewertungsdokument (vgl. Abs. 2 Verordnung (EU) Nr. 305/2011 [3]). Die EADs werden von der European Organisation for Technical Assessment/Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA) erarbeitet.

ETZ Die Europäische Technische Zulassung ist ein Dokument zum Nachweis der Brauchbarkeit nach Bauproduktenrichtlinie (vgl. Kapitel 3, Artikel 8) (Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte [9]), die bis 30.06.2013 in Kraft war. Der entsprechende englische Begriff lautet European Technical Approval (ETA).

ETAG Die Leitlinien für europäische technische Zulassungen stellen die Grundlagendokumente zur Erstellung einer ETZ nach Bauproduktenrichtlinie dar (Kapitel 3, Artikel 11) [9]. Der entsprechende englische Begriff lautet European Technical Assessment Guideline (ETAG).

harmonisierte technische Spezifikationen Der Begriff fasst harmonisierte Normen und Europäische Bewertungsdokumente zusammen, vgl. Abs. 2 Bauproduktenverordnung.

Hinterbrennen In dieser Arbeit beschreibt „Hinterbrennen“ 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 Abschottungsbauteilen vorbei, in das Innere des von den Leitungen durchdrungenen Bauteils in die Öffnung vordringen. Es verbleibt somit nur noch der feuerabgewandte Teil der Abschottung zum Aufrechterhalten der Leistungskriterien.

Intumeszierendes Material Beschreibt ein Material, das sich, der Hitze eines Feuers ausgesetzt, ausdehnt und einen Schaum oder eine Kohleschicht bildet, um den Durchgang von Hitze, Rauch, Flammen oder eine Kombination aus diesen zu verhindern. Übersetzt von: *„Describes a material which expands, creating a foam or char, when exposed to heat in the conditions of fire to restrict the passage of heat, smoke, flames or any combination of them“* [10].

(Holz-)Modul (Holz-)Bauteil mit definierten Eigenschaften. Wird in Wand- oder Deckenbauteile eingesetzt.

OSB Eine OSB-Platte ist nach DIN EN 300 [11] eine *„aus langen, flachen Holzspänen (Strands) und mit einem Bindemittel gefertigte Mehrschichtplatte. Die Strands in den Außenschichten sind parallel zur Plattenlänge oder -breite ausgerichtet. Die Strands in der Mittelschicht bzw. in den Mittelschichten können zufällig angeordnet sein oder sind im Allgemeinen rechtwinklig zu den Strands der Außenschichten ausgerichtet.“* Die Abkürzung OSB steht für den englischen Begriff Oriented Strand Board. Eine treffende deutsche Bezeichnung ist nicht bekannt. Die Platten werden als „Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen“ bezeichnet.

Raumabschluss *„Die Fähigkeit des Probekörpers eines raumabschließenden Bauteils, bei Brandflamme von einer Seite den Durchtritt von Flammen und heißen Gasen durch diesen Probekörper und entsprechend eine Flammenbildung auf der unbeflammten Seite zu verhindern“*[5].

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 einseitig vom Brand beansprucht. Als raumabschließende Wände gelten ferner Außenwandscheiben mit einer Breite > 1,0 m. Raumabschließende Wände können tragende oder nichttragende Wände sein“* [12].

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Nachhaltiges Bauen ist derzeit und wird in Zukunft eine wichtige Maßnahme zur Verhinderung des Fortschreitens des Klimawandels, respektive dessen Folgen, sein. Der nachwachsende Rohstoff Holz, der während seines Wachstums Kohlenstoffdioxid (CO_2) speichert, nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Wird Holz für den Bau von Gebäuden verwendet, bleibt das CO_2 für die Dauer des Lebenszyklus der Gebäude in diesen eingelagert. So wird nicht nur CO_2 aus der Atmosphäre aufgrund des Holzwachstums entnommen, sondern es werden gleichzeitig andere Materialien, vor allem mineralische Baustoffe, deren Herstellung CO_2 freisetzt, durch den Baustoff Holz substituiert. Die Zementproduktion ist beispielsweise für 8 % der globalen CO_2 -Emissionen verantwortlich [13]. Durch Bauen mit Holz kann die Freisetzung dieses CO_2 -Anteils reduziert werden. In Zielsetzungen der deutschen Bundesregierung zur Einschränkung des Klimawandels ist vermehrtes Bauen in Holzbauweise verankert. Die Charta für Holz 2.0 [14] präzisiert die Ziele und sieht unter anderem die Steigerung der Holzbauquoten sowie den Abbau der Diskriminierung des Holzbaus in Vorschriften und Richtlinien vor.

In diesem Zuge wurden in den letzten Jahren und werden in der Zukunft vermutlich vermehrt mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise errichtet werden. Zudem eignet sich der Holzbau aufgrund seines vergleichsweise geringen Eigengewichts zur Nachverdichtung des Gebäudebestands in urbanen Bereichen. Da moderne Gebäude hoch technisiert sind, werden vermehrt Leitungsdurchführungen erforderlich. Aus brandschutztechnischer Sicht führt dies in Verbindung mit zunehmender Gebäudehöhe bzw. Gebäudeklasse zu einem zunehmenden Bedarf an Leitungsabschottungen, welche bei der Durchdringung von raumabschließenden Bauteilen mit Leitungen vorgesehen werden müssen. Da zur Verhinderung der Ausbreitung eines Brandes in den Regelungen in Deutschland das Abschottungsprinzip verankert ist, ist der Aufrechterhaltung des Feuerwiderstands bzw. des Raumabschlusses brandschutztechnisch separierender Bauteile eine besondere Bedeutung beizumessen. Daher sind Leitungsdurchführungen durch solche Bauteile so zu verschließen, dass das Bauteil an dieser Stelle nicht maßgeblich geschwächt wird. Dies geschieht typischerweise mit Hilfe von klassifizierten Leitungsabschottungen. Derzeit sind auf dem Markt keine beziehungsweise nur sehr wenige, für definierte Einbausituationen anwendbare, Produkte zur Leitungsabschottung erhältlich, welche im Holzbau angewendet werden dürfen. *„In der Forschung stand die Untersuchung von Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile bisher nicht im Fokus. [...] Klassifizierungsprüfungen [wurden] ausschließlich für leichte Trennwände und herkömmliche Massivbauteile durchgeführt [...]. Deshalb gibt es [...] derzeit keine ausreichenden Erkenntnisse zur Installationsführung im Holzbau [...]“* [15]. Leitungsabschottungen im Holzbau werden aus diesem Grund meist ausgeführt, indem ein konstruktiver Wechsel im Holzbauteil vorgesehen wird. Innerhalb dieser Öffnung werden die Leitungen durch ein Betonbauteil geführt und darin mit für den Werkstoff Beton zugelassenen Produkten abgeschottet. Dieser Werkstoffwechsel führt dazu, dass ein zunächst feuchter Baustoff, der eine gewisse Zeit abbinden muss, in das Holzbauwerk eingebracht wird. Die notwendigen Arbeitsschritte werden von unterschiedlichen am Bau tätigen Gewerken ausgeführt, was zu zusätzlichem Koordinationsaufwand führt. Die Bauzeit und die Baukosten nehmen zu. Zudem stellt diese Vorgehensweise eine Abweichung dar, deren Konformität mit dem jeweiligen Anwendbarkeitsnachweis der Anwender bestätigen muss. Dieser zusätzliche Aufwand, den die nicht auf den Holzbau zugeschnittene Lösung mit sich bringt, trägt zum Hemmnis der Motivation zum Bauen mit Holz

bei, was den Zielen der Bundesregierung diametral entgegensteht. Aus diesem Grund ist eine auf den Holzbau angepasste Lösung zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen zu finden und zu beschreiben, um die Bauweise in der Zukunft nicht nur aus ökologischen, sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten attraktiver werden zu lassen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die wissenschaftliche Untersuchung von Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile als Grundlage zur Formulierung von Regeln zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen. Es gilt die Frage zu beantworten, wie die Herangehensweise zur Leitungsdurchführung durch Holzbauteile angepasst werden kann, sodass der Holzbau in Bezug auf dieses Konstruktionsdetail keine Benachteiligung erfährt. Der Bauablauf soll durch die Ausführung von Leitungsdurchführungen nicht unverhältnismäßig stark gestört werden und der Baustoff Holz soll sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus optischen und ökologischen Gründen auch an der Stelle der Leitungsdurchführung verwendet werden. Auf Grundlage des aktuellen Stands der Wissenschaft soll eine neue Herangehensweise zur Leitungsführung durch Holzbauteile erarbeitet werden. Die Anwendbarkeit der zu entwickelnden Methode in unterschiedlichen Holzkonstruktionen soll mit Brandversuchen nachgewiesen werden. Nach Beleg der generellen Anwendbarkeit der Methode sollen weitere notwendige Details zur Anwendung der Methode in der Praxis untersucht werden. Die Eignung unterschiedlicher Dichtmaterialien zum feuerwiderstandsfähigen Verschluss des Raums um einzelne durchgeführte Leitungen durch Holzbauteile soll untersucht werden. Zudem sollen grundlegende Untersuchungen hinsichtlich Leitungen in Holzbauteilen durchgeführt werden, um die Unterschiede im Zusammenwirken der Leitungen mit dem Baustoff Holz im Vergleich zu traditionellen Baustoffen beschreiben zu können. Aufbauend darauf sollen notwendige Abstände zwischen Leitungsdurchführungen quantifiziert werden, da in diesem Detail abweichende Anforderungen zu traditionellen Bauweisen mit nichtbrennbaren Baustoffen zu erwarten sind. Empfehlungen hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Leitungsdurchführung durch Holzbauteile sowie Ausführungshinweise sollen erarbeitet werden.

1.3 Herangehensweise

Nachdem die Relevanz des Themas verdeutlicht wurde und Bearbeitungsziele der Arbeit gesetzt wurden, werden zunächst die Grundlagen mittels einer Literaturrecherche ermittelt. Relevant sind zunächst die grundlegenden bauordnungsrechtlichen Regelungen des Brandschutzes in Deutschland. Darauf aufbauend werden die Inhalte Technischer Baubestimmungen, die aufgrund des Bauordnungsrechts eingeführt sind und einen Beitrag zur Regelung von Leitungsdurchführungen im Allgemeinen bzw. Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile leisten, beschrieben. Weiterhin werden Grundlagen allgemein zu Leitungsabschottungen, zu brandschutztechnisch relevanten Eigenschaften von Holz sowie des mehrgeschossigen Holzbaus erarbeitet. Der internationale Stand der Wissenschaft in Bezug auf Leitungsabschottungen in Holzbauteilen wird zum Abschluss des Grundlagenteils dargestellt.

Folgend wird zunächst theoretisch ein alternativer Lösungsansatz zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen, die Methode Holz-in-Holz, erarbeitet und deren Anwendbarkeit in Brandversuchen nachgewiesen. Bei der Methode Holz-in-Holz wird an der Stelle der Leitungsdurchführung ein massives Holzbauteil mit definierten Eigenschaften - im Verlauf der Arbeit „Holzmodul“ genannt - eingesetzt. Die Abschottung der Leitungen erfolgt innerhalb des Holzmoduls. Der Nachweis der Methode erfolgt zu Beginn mit Versuchen an klassifizierten Abschottungen. Dabei werden weitere notwendige, untersuchungswürdige Details identifiziert. Diese beziehen sich zum einen auf den Anschluss der Holzmodule an umgebende Holzbauteile, wozu unterschiedliche Materialien in Brandversuchen probiert und weitere theoretische Überlegungen zur Anschluss-

ausbildung angestellt werden. Zum anderen beschäftigen sich die weiteren Untersuchungen auf das Verhalten einzelner Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile, welche zunächst ebenfalls mit Brandversuchen, zudem erweiternd mittels Finite-Element-Simulationen untersucht werden. Anhand dieser Ergebnisse können notwendige Abstände zwischen Leitungsdurchführungen festgelegt werden. Die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen liefern Erkenntnisse, welche nicht nur für die Anwendung der Methode Holz-in-Holz relevant sind, sondern einen generellen Fortschritt im Verständnis des Verhaltens des Baustoffs Holz im direkten Einwirkungsbereich von Leitungsdurchführungen bzw. das Verhalten von Leitungsdurchführungen verschiedenartiger Leitungen in Holz darstellen. Abgeschlossen wird die Arbeit durch eine Zusammenfassung der Inhalte, einem Fazit und Ausblick. Abbildung 1.1 stellt den Ablauf der Arbeit dar. Die im ersten Abschnitt der Arbeit formulierte Problemstellung bezieht sich großteils auf die derzeit in Deutschland vorherrschende, bauordnungsrechtlich gegebene Situation. Die in der Arbeit beschriebene Methode Holz-in-Holz ist demnach vor allem in Deutschland relevant. Ergebnisse, die weltweite Relevanz haben, wären wünschenswert, jedoch herrschen weltweit deutliche Unterschiede in brandschutztechnischen Anforderungen an Gebäude und darin enthaltene Bauprodukte vor. Dies ist zum Beispiel mit geographischen Gegebenheiten des jeweiligen Landes, mit der taktischen Vorgehensweise der dort zuständigen Feuerwehr oder auch mit der Betrachtungsweise des Risikos bzw. den Sicherheitskonzepten zu begründen. Ein Lösungsansatz der für ein Land geeignet ist, kann aufgrund der in einem anderen Land vorherrschenden Rahmenbedingungen dort undenkbar sein. Die Ergebnisse der Arbeit, die Bezug zu Einbausituationen bzw. dem Materialverhalten im Brandfall haben, können dagegen weltweit hilfreich sein. Zu nennen sind dabei vor allem Ergebnisse und Aussagen über die Eignung von Dichtmaterialien zum feuerwiderstandsfähigen Restöffnungsverschluss um einzelne Leitungsdurchführungen in Holzbauteilen sowie die Ergebnisse, welche grundlegend das Abbrandverhalten von Holzbauteilen, durch die metallische Rohrleitungen hindurchgeführt werden, im Durchführungsbereich beschreiben.

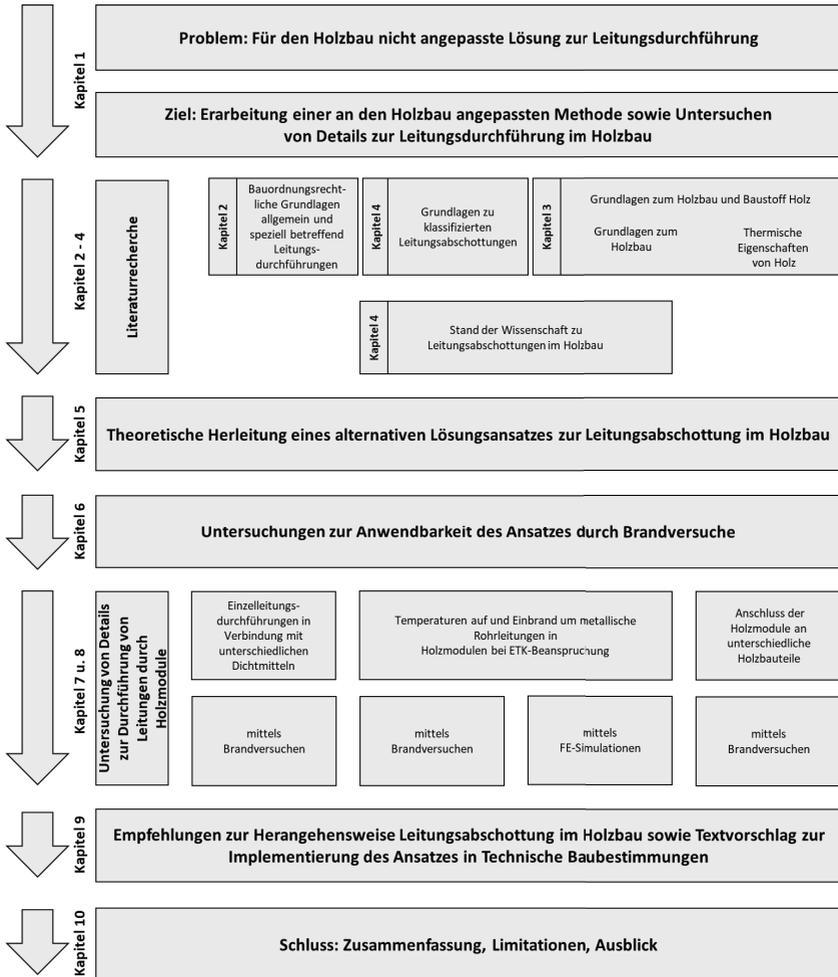


Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen des Brandschutzes in Deutschland

In den Landesbauordnungen der Bundesländer sind die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Gebäude geregelt, welche mitunter brandschutztechnische Vorgaben enthalten. Allgemein werden die brandschutzrelevanten Vorgaben in den Bauordnungen über Schutzziele definiert. Aufgrund der föderalen Struktur Deutschlands hat jedes Bundesland seine eigene Bauordnung, wodurch sich unterschiedliche bauordnungsrechtliche Anforderungen von Bundesland zu Bundesland ergeben können. Meist finden sich diese Unterschiede nur auf Detailebene, es gibt jedoch auch einige Unterschiede mit weitreichenden Konsequenzen. So wird beispielsweise aktuell nur in wenigen Bundesländern die sichtbare Verwendung von Holzbauteilen, abweichend von bauordnungsrechtlichen Vorgaben, ermöglicht. Stellvertretend für die Landesbauordnungen wird in dieser Arbeit die MBO [2] herangezogen. Diese wird von der Bauministerkonferenz verabschiedet. Sie dient als Grundlage zur Erstellung der einzelnen Landesbauordnungen der Länder. Zu beachten ist, dass die MBO selbst keinen Gesetzescharakter besitzt. Gleichermaßen wird mit anderen Mustererlassen der Bauministerkonferenz umgegangen, für die es entsprechende, als Technische Baubestimmungen eingeführte, Richtlinien bzw. Verordnungen in den Bundesländern gibt. Im Anwendungsfall sind die jeweils entsprechenden Paragraphen der im Bundesland gültigen Landesbauordnung zu berücksichtigen.

2.1 Bauordnungsrechtliche Anforderungen - ausgewählte Inhalte

2.1.1 Brandschutztechnische Schutzziele

Für den Brandschutz von besonderer Relevanz ist der zweite Abschnitt des dritten Teils der MBO [2]. Dort werden in § 14 die grundlegenden brandschutztechnischen Schutzziele definiert. Diese sind:

- Der Entstehung eines Brandes vorbeugen
- Der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brand) vorbeugen
- Ermöglichung der Rettung von Menschen und Tieren
- Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten

In den weiteren Abschnitten des dritten Teils werden konkrete Anforderungen an Bauteile sowie zum Teil an die darin verwendeten Baustoffe gestellt. Der dritte Teil der Bauordnung ist somit für die brandschutztechnische Betrachtung eines Gebäudes der maßgebende Teil der Bauordnung. Um die brandschutztechnischen Belange eines Bauwerks zu planen und die Bauausführung zu begleiten, werden weitere Regelungen der MBO relevant, die in Verbindung zu den Paragraphen aus Teil drei der MBO stehen.

Den Schutzziele der Bauordnung muss in jedem Fall Rechnung getragen werden. Für Regelausbauten sind die brandschutztechnischen Anforderungen abschließend in der jeweiligen Landesbauordnung geregelt. Sie stellt in diesem Sinne ein Standardbrandschutzkonzept dar. Zur brandschutztechnischen Betrachtung von Gebäuden besonderer Art und Nutzung - Sonderbauten - gibt es je nach Bundesland verschiedene, als Technische Baubestimmungen eingeführte, Sonderbauverordnungen oder Richtlinien. Wird eine Forderung der Landesbauordnungen oder von

einer Sonderbauverordnung nicht erfüllt, kann sie durch eine entsprechende Kompensationsmaßnahme ausgeglichen werden, sofern diese das gleiche Schutzziel verfolgt und somit mindestens das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird. Im Falle dieser sogenannten Abweichungen (nach §67 MBO [2]), ist die Zustimmung der Bauaufsichtsbehörde erforderlich. Für diese Arbeit von besonderer Relevanz ist das Schutzziel, welches besagt, dass der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt werden soll. Dieses Schutzziel wird im Allgemeinen durch raumabschließende Bauteile sichergestellt. Raumabschließende Bauteile müssen Anforderungen hinsichtlich der geforderten Feuerwiderstandsfähigkeit und teilweise bzgl. des Brandverhaltens der verwendeten Baustoffe erfüllen. Werden diese Bauteile durch Öffnungen geschwächt, müssen diese Öffnungen im Normalfall so verschlossen werden, dass die Qualität des Öffnungsverschlusses der des durchdrungenen Bauteils entspricht. Ausnahmen ergeben sich beispielsweise bei Türen oder bei Leitungsdurchführungen in Gebäuden der Gebäudeklasse eins und zwei. Durch die Bildung von Brandabschnitten soll die Brandausbreitung auf einen gewissen Bereich eingeschränkt werden. Dieser soll nur so groß sein, dass der Brand bei Eintreffen der Feuerwehr von dieser noch beherrschbar ist und die Rettung von Menschen und Tieren möglich ist. Die Brandausbreitung auf einen angrenzenden Brandabschnitt soll verhindert werden. Dieses Prinzip der Ausbildung von Brandabschnitten, auf dem der bauliche Brandschutz in Deutschland großteils fußt, wird als „Abschottungsprinzip“ bezeichnet.

2.1.2 Gebäudeklassen

Die MBO ordnet jedem Gebäude eine von fünf Gebäudeklassen zu. Die Einteilung in eine Gebäudeklasse hängt maßgeblich von der Höhe eines Gebäudes, dessen Ausdehnung sowie der Anzahl und Größe der Nutzungseinheiten ab. Als Höhe ist dabei das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel zu verstehen. Die Gebäudeklasse ihrerseits ist maßgebend für die brandschutztechnischen Anforderungen an Bauteile, Baustoffe, Rettungswege, Abschlüsse, usw. Gebäude können gemäß MBO den Klassen wie folgt zugeordnet werden:

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.

Die Einteilung der Gebäudeklassen, wie sie in Abb. 2.1 zu sehen ist, besteht seit der Novellierung der MBO im Jahre 2002. Vor Einführung dieser „neuen“ MBO wurden die Gebäude nach ihrer Höhe in Gebäude geringer, mittlerer Höhe und Hochhäuser unterteilt. Auch neu eingeführt wurde im Jahr 2002 die bauordnungsrechtliche Anforderung „hochfeuerhemmend“. Zuvor wurde

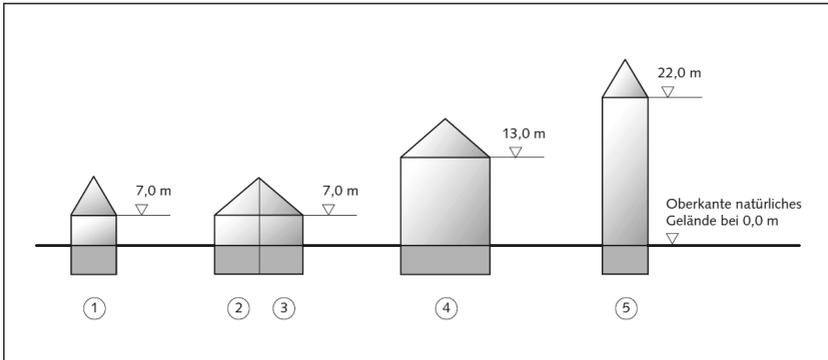


Abb. 2.1: Gebäudeklassen nach MBO

lediglich zwischen Bauteilen mit den Anforderungen feuerhemmend (fh) und feuerbeständig (fb) unterschieden. Die Feuerwiderstandsanforderung hochfeuerhemmend (hfh) stellte bis zur letzten Novelle der MBO die Grundlage für die konstruktive Verwendung von Holz in Gebäuden bis zur Gebäudeklasse 4 dar, was im Allgemeinen gleichzusetzen ist mit Gebäuden von bis zu fünf Geschossen oberhalb der Geländeoberfläche [16]. Mit dem in der MBO 2019 eingeführten Zusatz des § 26 können hochfeuerhemmende und feuerbeständige Bauteile abweichend auch aus brennbaren Baustoffen hergestellt werden. Sie müssen dann den Vorgaben der durch § 85a MBO eingeführten Technischen Baubestimmungen entsprechen. Dies gilt nicht für Wände anstelle von Brandwänden in Gebäudeklasse vier und Wände notwendiger Treppenträume. Auch einige Bundesländer haben ihre Bauordnungen diesbezüglich bereits weiterentwickelt. Zu nennen sind Bremen, Baden-Württemberg, Hamburg, Berlin, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein (Stand 11/2020).

2.1.3 Feuerwiderstand und Brandverhalten

Die Begriffe Feuerwiderstand und Brandverhalten beschreiben brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Baustoffe. Das Brandverhalten von Baustoffen gibt Auskunft darüber, wie ein Baustoff brennt. Genauer gesagt, wie leicht oder schwer entflammbar dieser ist und wie sich Rauch und Wärme beim Abbrand entwickeln. Das Brandverhalten von Baustoffen wird auf europäischer Ebene nach DIN EN 13501-1 [4] (Euroklassen) bzw. auf nationaler Ebene in DIN 4102-1 [17] klassifiziert.

Die Feuerwiderstandsklasse eines Bauteils gibt an, wie lange das Bauteil während eines genormten Brandes die Eigenschaften Tragfähigkeit und/oder Raumabschluss sowie Wärmedämmung aufrechterhalten kann. Die Feuerwiderstandsklassen werden analog der Regelungen beim Brandverhalten in DIN EN 13501-2 [18] und in DIN 4102-2 [19] eingeteilt. In Deutschland besteht zurzeit eine Gleichberechtigung der Anwendung beider Klassifizierungssysteme. Auf europäischer Ebene haben nur Klassifizierungen nach DIN EN 13501-2 [18] Gültigkeit. Auf Bauprodukten darf gemäß § 87 MBO nicht gleichzeitig das Ü-Zeichen und das CE-Zeichen angebracht werden. Ein Baustoff/Bauteil kann daher immer nur nach DIN EN 13501 [4] oder DIN 4102 [19] bezüglich seines Brandverhaltens oder seines Feuerwiderstands beurteilt werden.

Die MBO stellt je nach Gebäudeklasse, Gebäudeart, Bauteil und Höhenlage der Geschosse unterschiedliche Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und den Feuerwiderstand von Bauteilen. In der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) werden den Anforderungen der MBO die Klassifizierungen der Normen zugeordnet. Die Zuord-

nung, wie in Tab. 2.1 und Tab. 2.2 dargestellt, ist in Anhang 4 der MVV TB [20] zu finden. Die Tabellen zeigen die Kurzbezeichnungen der Klassifizierungen für tragende, raumabschließende Bauteile. Für andere Bauteilgruppen sieht vor allem DIN 4102 [19] unterschiedliche Kurzbezeichnungen vor, z. B. T für Öffnungverschlüsse oder R für Rohrabschottung etc.. DIN EN 13501 [18] gibt über die Kurzbezeichnungen R, E und I (frz. Resistance, Etanchéité, Isolation) Auskunft über die Leistungskriterien „Tragfähigkeit“, „Raumabschluss“ und „Wärmedämmung“ des jeweiligen Bauteils. Weiterhin kann die Bezeichnung beispielsweise Angaben zu Prüfbedingungen enthalten. Für Kabel- und Rohrabschottungen wird auf diese Bezeichnungen in Unterabschnitt 4.1.4 genauer eingegangen.

Das Brandverhalten und der Feuerwiderstand haben offensichtlich einen gewissen Zusammenhang, sind aber auf keinen Fall gleichbedeutend. So haben Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen (n. b. B.) nicht in jedem Fall eine längere Feuerwiderstandsdauer als Bauteile aus brennbaren Baustoffen (b. B.). Das Prüfkriterium des Feuerwiderstandes ist nicht die Brennbarkeit der verwendeten Baustoffe, sondern der Wärmedurchgang durch das Bauteil und die Fähigkeit des Bauteils, seine separierende und tragende Funktion aufrechtzuerhalten. Werden Bauteile aus b. B. unter Berücksichtigung des Abbrandes entsprechend dimensioniert, können theoretisch beliebige Feuerwiderstandsdauern erreicht werden. Die Bauteile werden in diesen Fällen zwar am Brandgeschehen teilnehmen, was an anderer Stelle zu berücksichtigen ist (Brandlasten/Bemessungsbrand), allerdings hat dies keinen Einfluss auf die Kriterien, die zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei der Prüfung nach z. B. DIN 4102 [19] herangezogen werden. Ein Zusammenhang der Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile mit dem Brandverhalten der in diesen enthaltenen Baustoffen ergibt sich über die bauordnungsrechtlichen Anforderungen der Musterbauordnung. Dort werden für feuerbeständige und hochfeuerhemmende Bauteile Anforderungen an die darin enthaltenen Baustoffe bezüglich ihres Brandverhaltens gestellt. So dürfen zwar die tragenden und aussteifenden Teile hochfeuerhemmender Bauteile aus brennbaren Baustoffen bestehen, sie müssen allerdings eine allseitige Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen aufweisen und die verwendeten Dämmstoffe müssen nichtbrennbar sein. Bei feuerbeständigen Bauteilen müssen die tragenden und aussteifenden Teile nichtbrennbar sein und falls sie eine raumabschließende Funktion haben, müssen sie zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen aufweisen. Andere Ausführungen sind abweichend möglich (siehe Unterabschnitt 2.1.2). Feuerhemmende Bauteile dürfen gänzlich aus brennbaren Baustoffen bestehen.

2.1 Bauordnungsrechtliche Anforderungen - ausgewählte Inhalte

Tab. 2.1: Baustoffklassen nach DIN 4102 [17] und DIN EN 13501 [4]

Bauaufsichtliche Anforderung	Mindestens geeignete Baustoffklassen nach DIN 4102-1:1998-05 und weitere Angaben	Mindestens geeignete Klassen nach DIN EN 13501-1:2019-05		
		Bauprodukte, ausgenommen lineare Rohrdämmstoffe und Bodenbeläge	lineare Rohrdämmstoffe	Bodenbeläge
nichtbrennbar	A2	A2 - s1,d0*	A2 _L - s1,d0*	A2 _{fl} - s1
schwerentflammbar	B 1 und begrenzte Rauchentwicklung ($I \leq 400 \% \times \text{Min.}$ bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C - s2,d2*	CL - s2,d2*	C _{fl} - s1
schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	B 1 und nicht brennend abfallend oder abtropfend sowie begrenzte Rauchentwicklung ($I \leq 400 \% \times \text{Min.}$ bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C - s2,d0*	C _L - s2,d0*	-
schwerentflammbar und geringe Rauchentwicklung	B 1 und geringe Rauchentwicklung ($I \leq 400 \% \times \text{Min.}$ 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 ($I \leq 400 \% \times \text{Min.}$ bei Prüfung nach DIN 4102-15:1990-05)	C - s1,d0*	C _L - s1,d0*	-
normalentflammbar, nicht brennend abfallend oder abtropfend	B2	E	E _L	-
normalentflammbar	B 2 (auch brennend abfallend oder abtropfend)	E - d2	E _L - d2	E _{fl}
ggf. zusätzlich Schmelzpunkt > 1000 °C	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000 °C DIN 4102-17:1900-12	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000 °C	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000 °C	-
*soweit erforderlich Glimmverhalten		siehe 1.3 MVV TB	siehe 1.3 MVV TB	
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		

Tab. 2.2: Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2 [19] und DIN EN 13501-2 [18]

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile mit Raumabschluss	
	DIN EN 13501-2:2016-12	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	-

2.1.4 Führung von Leitungen durch raumabschließende Bauteile mit Anforderungen an den Feuerwiderstand

Die MBO besagt in § 40, dass Leitungen „durch raumabschließende Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit vorgeschrieben ist, nur hindurchgeführt werden [dürfen], wenn eine Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten ist oder Vorkehrungen hiergegen getroffen sind“. Dies muss

- in Gebäuden der Gebäudeklasse 1 und 2,
- in Wohnungen,
- innerhalb von Wohnungen und innerhalb von Nutzungseinheiten, die kleiner als 400m² sind und sich über nicht mehr als zwei Geschosse erstrecken,

nicht beachtet werden.

Diese Regelungen sind auch für Installationsschächte und -kanäle gültig. In welchen Fällen eine Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten ist, ist in der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen, kurz: Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR), beschrieben. Weiterhin sind Leitungsanlagen in notwendigen Treppenträumen, in Räumen zwischen notwendigen Treppenträumen und dem Ausgang ins Freie sowie in notwendigen Fluren nur zulässig, wenn die Nutzung dieser Bestandteile des Rettungswegs im Brandfall ausreichend lang möglich bleibt.

2.2 Grundlagen zur Leitungsführung durch Holzbauteile - Technische Baubestimmungen

2.2.1 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen - MVV TB

Die MBO enthält in § 85a die Ermächtigungsgrundlage zur Einführung einer Verwaltungsvorschrift. In dieser sind die somit eingeführten Technischen Baubestimmungen enthalten bzw. wird auf diese verwiesen. Die Technischen Baubestimmungen konkretisieren die allgemeinen

Anforderungen an bauliche Anlagen, Bauprodukte sowie andere Anlagen und Einrichtungen. Von diesen eingeführten Technischen Baubestimmungen kann gemäß § 85a abgewichen werden, wenn die Planungs-, Bemessungs- und Ausführungsregelungen mit einer anderen Lösung gleichwohl erfüllt werden. In der MVV TB wird diese Art der Abweichung jedoch für einige eingeführte Technische Baubestimmungen verneint.

Gegliedert nach den Grundanforderungen der Bauproduktenverordnung¹ enthält Teil A der MVV TB Konkretisierungen die bei der Erfüllung derselben zu beachten sind. Teil A2 bezieht sich auf den Brandschutz. Dort werden unter anderem die Begriffe Raumabschluss, Trennwand, Brandwand (und Wände anstelle von Brandwänden) sowie Decken genauer beschrieben. Die genannten Bauteile können als raumabschließende Bauteile zusammengefasst werden. Hinsichtlich dieser enthält die MVV TB die Vorgabe, dass der Raumabschluss sowie bei tragenden Bauteilen die Standsicherheit nicht durch Durchdringungen beeinträchtigt werden darf.

Die in Unterabschnitt 2.2.2, Unterabschnitt 2.2.3 und Unterabschnitt 2.2.4 beschriebenen Richtlinien sind durch die MVV TB als Technische Baubestimmungen eingeführt. Auf die in der MVV TB enthaltenen Anforderungen hinsichtlich Bauprodukten bzw. Bauarten zur Leitungsabschotung wird in Unterabschnitt 4.1.4 eingegangen.

2.2.2 Muster-Leitungsanlagenrichtlinie - MLAR

In der MLAR [21] werden Anforderungen an das Verlegen von Leitungen in Gebäuden gestellt. Bislang enthält die MLAR keine besonderen Bestimmungen, wie mit Leitungsanlagen in Verbindung mit Holzbauteilen umgegangen werden kann. Hierbei ergibt sich eine Schnittstelle zur Muster-Holzbaurichtlinie (siehe Unterabschnitt 2.2.4) im Bezug auf das Herstellen von Öffnungen. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Inhalte der MLAR sinngemäß wiedergegeben.

Die MLAR gilt für

- Leitungsanlagen in notwendigen Treppenträumen, in Räumen zwischen notwendigen Treppenträumen und Ausgängen ins Freie, sowie in notwendigen Fluren (nicht in offenen Gängen vor Außenwänden)
- die Führung von Leitungen durch raumabschließende Bauteile
- den Funktionserhalt von elektrischen Leitungsanlagen im Brandfall

Die Richtlinie gilt auch für bauordnungsrechtlich vorgeschriebene Vorräume und Sicherheitsschleusen². Klar aus dem Geltungsbereich der MLAR ausgenommen sind Leitungen von Lüftungs- und Warmluftheizungsanlagen. Diese werden in der Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie (M-LüAR) abgedeckt. Deren Inhalte werden zur Abgrenzung in Unterabschnitt 2.2.3 zusammengefasst.

Leitungsanlagen sind so zu verwenden, dass die Feuerwiderstandsfähigkeit von tragenden, aussteifenden oder raumabschließenden Bauteilen sowie die von Installationsschächten oder -kanälen erhalten bleibt.

Als Leitungsanlagen bezeichnet die MLAR *„Anlagen aus Leitungen, insbesondere aus elektrischen Leitungen oder Rohrleitungen, sowie aus den zugehörigen Armaturen, Hausanschlusseinrichtungen, Messeinrichtungen, Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen, Netzgeräten, Verteilern und Dämmstoffen für die Leitungen. Zu den Leitungen gehören deren Befestigungen und Beschichtungen. Lichtwellenleiter-Kabel und elektrische Kabel gelten als*

¹ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates

² siehe Muster-Garagenverordnung [22]

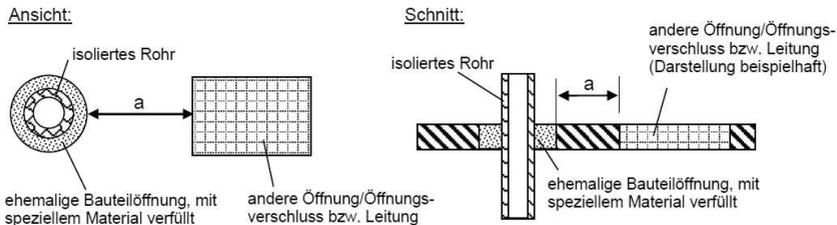


Abb. 2.2: Vorgaben des (DIBt) zu Abständen zwischen Abschottungen und Öffnungen [24]

elektrische Leitungen.“

Für diese Arbeit sind vor allem die Teile der MLAR relevant, die Regelungen zur Führung von Leitungen durch Bauteile enthalten; auf andere Inhalte wird hier daher nicht weiter eingegangen. Fallen Leitungsdurchführungen nicht in den Anwendungsbereich der Erleichterungen nach MLAR (siehe unten), so müssen sie durch Abschottungen geführt werden, die mindestens die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen wie die raumabschließenden Bauteile, die durchdrungen werden (klassifizierte Abschottungen). Eine andere Möglichkeit ist das Führen der Leitungen innerhalb von Installationsschächten oder Installationskanälen. In diesem Fall müssen diese Schächte oder Kanäle sowie deren Abschlüsse von Öffnungen die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit wie die durchdrungenen Bauteile aufweisen und aus n. b. B. bestehen. Werden Leitungen durch Bauteile in Holzbauweise geführt, so sind die Anforderungen der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR) [23] zusätzlich zu beachten (siehe dazu Unterabschnitt 2.2.4). Festlegungen zu Mindestabständen zwischen Abschottungen, Installationsschächten oder -kanälen oder zu anderen Durchführungen oder Öffnungsverschlüssen sind den jeweiligen Anwendbarkeitsnachweisen der Abschottungssysteme zu entnehmen. Sollten darin Regelungen zu Abständen fehlen, ist nach MLAR ein Mindestabstand von 50 mm einzuhalten.

In einer Veröffentlichung des DIBt [24] werden von dieser Vorgabe abweichende Abstandsregelungen beschrieben. Diese finden in der Praxis Einzug in die Anwendbarkeitsnachweise von Abschottungssystemen, falls Abstände nicht explizit geprüft werden. Vorgegeben werden folgende Abstände:

- Abstand a zwischen einer durch eine Abschottung zu verschließenden und einer anderen Öffnung in Bauteil ≥ 200 mm.
- Für (sehr kleine) Öffnungen (≤ 200 mm \cdot 200 mm) ist ein Abstand von 100 mm ausreichend
- auch bei nebeneinander liegenden Abschottungen bis ≤ 400 mm \cdot 400 mm ist ein Abstand von 100 mm ausreichend (Grund hierfür sind gleichartige Prüfungen und Anforderungen).

Der Abstand ist zwischen den Übergangsstellen vom Füllmaterial der Öffnung und dem eigentlichen Bauteil der Öffnungen zu messen (siehe dazu Abb. 2.2). Ist die eingebaute Abschottung größer als die für die Durchführung hergestellte Öffnung, so ist der Abstand ab dem äußeren Rand der Abschottung zu bestimmen. Auch Kabeltragkonstruktionen (Pritschen) können das für den Abstand maßgebende Bauteil sein.

Für Kombiaberschottungen wird ein Abstand von 100 mm zwischen den Leitungen unterschiedlicher Art vorgeschrieben, außer es liegt ein brandschutztechnischer Nachweis vor, der einen kleineren Abstand zulässt. In den entsprechenden Anwendbarkeitsnachweisen sind die Abstände meist genau geregelt. Nach [24] konnte früher davon ausgegangen werden, dass ein Mindestabstand von 200 mm, der in der Prüfung angenommen wurde, der Realität entsprach. Durch die in

2.2 Grundlagen zur Leitungsführung durch Holzbauteile - Technische Baubestimmungen

Tab. 2.3: Erleichterungen nach Muster-Leitungsanlagenrichtlinie Stand 05.04.2016

Konfiguration	Leitungsart	Maßnahme
Erleichterungen für die Durchführung durch feuerhemmende Wände		
-	<ul style="list-style-type: none"> - einzelne elektrische Leitungen - dicht gepacktes Kabelbündel ≤ 50 mm - nichtbrennbare Rohrleitungen (mit brennbarer Beschichtung ≤ 2 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Verschließen des Raumes zwischen Leitung und dem (n. b.)Bauteil mit - n. b. Baustoffen (auch Mineralfasern) oder - intumeszierenden Baustoffen bei Intumeszenzmaterial Abstand Leitung/Bauteil ≤ 50 mm.
Erleichterungen für die Durchführung einzelner Leitungen durch Wände oder Decken		
ohne Dämmung + in gemeinsamen Durchbrüchen	<ul style="list-style-type: none"> - elektrische Leitungen - n. b. Rohrleitungen ≤ 160 mm, außer aus Aluminium und Glas - brennbare Rohrleitungen ≤ 32 mm und Aluminium und Glas für nichtbrennbare Medien 	<ul style="list-style-type: none"> - Abstand zw. el. Leitungen und n. b. Rohrleitungen untereinander \geq größerer Leitungsdurchmesser - Abstand brennbarer Rohre untereinander \geq 5-facher Durchmesser - Abstand bei Mischung \rightarrow Worst case - Mindestbauteildicke fb = 80 mm, hfh = 70 mm, fh = 60 mm - Verfüllung Raum zw. Leitung und Bauteil mit Zementmörtel oder Beton in Mindestbauteildicke
ohne Dämmung + in eigenen Durchbrüchen	Wie in gemeinsamen Durchbrüchen	Verfüllung des Raumes zwischen Leitung und Bauteil mit n. b. B., Mineralfasern oder Intumeszenzmaterial. Maximaler Abstand Leitung/Bauteil bei Intemeszenzmaterial = 15 mm, sonst 50 mm
mit Dämmung + in eigenen oder gemeinsamen Durchbrüchen	<ul style="list-style-type: none"> - n. b. Rohrleitungen ≤ 160 mm, außer aus Aluminium und Glas - brennbare Rohrleitungen ≤ 32 mm und Aluminium und Glas für nichtbrennbare Medien 	<ul style="list-style-type: none"> - Mindestdicke fb = 80 mm, hfh = 70 mm, fh = 60 mm - Verfüllung des Raumes wie ohne Dämmung - n. b. Dämmung im Bereich der Durchführung - Abstand (Dämmschichtoberfläche) ≥ 50 mm - Außerhalb der Durchführung ist bei Rohrleitungen mit brennbarer Dämmung eine Umhüllung aus Stahlblech anzuordnen oder beidseitig der Durchführung auf einer Länge von 500 mm Dämmung aus n. b. B. anzuordnen.
Erleichterungen für die Durchführung einzelner Leitungen durch Decken		
Mit oder ohne Dämmung in Wandschlitzten	<ul style="list-style-type: none"> Rohrleitungen ≤ 110 mm - aus n. b. B., ausgenommen Aluminium und Glas - aus b. B. (Aluminium und Glas) für nichtbrennbare Medien) 	<ul style="list-style-type: none"> a) wenn sie innerhalb der Geschosse durchgehend in Schlitzten massiver Wände verlegt werden. Verschluss mit - 15 mm mineralischem Putz und - 10 mm n. b. Dämmung oder - mehrlagig mit insgesamt mindestens 25 mm Platten aus n. b. mineralischen Baustoffen b) In Wandecken verlegt, sodass sie von zwei Seiten von der Wand und von den anderen Seiten wie zuvor umschlossen sind.

den letzten Jahrzehnten zunehmende Installationsdichte bzw. Nachverdichtung der Installationen in Gebäuden wurde es erforderlich, diesen Abstand konkret in den Zulassungen anzugeben. Die MLAR sieht für die Führung von Leitungen durch Bauteile Erleichterungen vor, wenn bestimmte Bedingungen eingehalten werden. Die Erleichterung ist im Sinne einer erleichterten brandschutztechnischen Nachweisführung zu verstehen, nicht als eine Erleichterung des Aufwands oder der Sorgfaltspflicht [25]. Für diese Situationen sind also keine klassifizierten Abschottungssysteme notwendig, deren Prüfung und Zulassung zeit- und kostenintensiv ist. Der Anwender kann nach der Ausführung die Übereinstimmung der Ausführung mit der Technischen Baubestimmung erklären. Eine Übereinstimmungsbestätigung mit einem Anwendbarkeitsnachweis entfällt. Ein Typenschild, welches neben klassifizierten Abschottungen anzubringen ist, ist ebenfalls nicht notwendig. Die Erleichterungen sind ein wichtiges Werkzeug zur Herstellung einfacher Durchführungen mit wenigen Leitungen. Bei einem kleinen potentiellen Risiko werden die Baukosten nicht unnötig in die Höhe getrieben. Sind viele abzuschottende Leitungen vorhanden, scheidet die Anwendung der Erleichterungen der MLAR jedoch häufig aufgrund des großen Platzbedarfs, wegen einzuhaltender Mindestabstände, aus. Ebenfalls sind nicht alle Leitungen, wie z. B. brennbare Rohre mit einem Durchmesser > 32 mm von den Erleichterungen erfasst.

In Tab. 2.3 sind die Details der Erleichterungen nach MLAR zusammenfassend dargestellt. Im Folgenden werden diese detaillierter beschrieben.

Erleichterungen für Leitungsführungen durch feuerhemmende Wände

Elektrische Leitungen (einzelne Leitungen sowie dicht gepackte Kabelbündel mit einem Durchmesser ≤ 50 mm) und nichtbrennbare Rohrleitungen (auch mit einer brennbaren Rohrbeschichtung von bis zu 2 mm Dicke) dürfen durch feuerhemmende Wände geführt werden, wenn der verbleibende Raum (≤ 50 mm) zwischen Leitung und dem nichtbrennbaren Bauteil mit n. b. B. oder intumeszierenden Stoffen ausgefüllt wird. Mineralfasern, die dazu verwendet werden, müssen eine Schmelztemperatur > 1000 °C aufweisen. Die aktuelle Formulierung in der MLAR schließt durch die geforderte Nichtbrennbarkeit des umliegenden Bauteils eine Anwendung dieser Erleichterung in Holzbauteilen aus (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2).

Erleichterungen für einzelne Leitungen - Führung durch Wände oder Decken

Weiterhin werden in der MLAR Erleichterungen für einzelne Leitungen ohne Dämmung für die Durchführung durch Wände und Decken gestattet. Diese gelten insbesondere für:

- elektrische Leitungen (gemeint sind Einzelleitungen; Kabelbündel und Elektroerrohre $\varnothing \leq 32$ mm) können nach [26] als Einzelleitung gewertet werden,
- nichtbrennbare Rohrleitungen mit einem Durchmesser von bis zu 160 mm, auch mit Beschichtungen von bis zu 2 mm Dicke
- brennbare Rohrleitungen bis zu einem Durchmesser von 32 mm

Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die MLAR Rohrleitungen aus Aluminium und Glas zu den brennbaren Rohren zählt, da diese im Brandfall schmelzen bzw. zerbrechen können.

Die Erleichterungen unterscheiden zwischen Leitungen, die in eigenen Durchbrüchen durch die Bauteile geführt werden und Leitungen, die in gemeinsamen Durchbrüchen verlegt sind. Bei der Verlegung in gemeinsamen Durchbrüchen ist der Abstand zwischen den einzelnen Leitungen ein wichtiges Kriterium. Zwischen Kabeln und nichtbrennbaren Rohrleitungen ist ein Abstand einzuhalten, der mindestens dem Einfachen des größeren Leitungsdurchmessers entspricht. Zwischen einer Leitung und einer brennbaren Rohrleitung ist ein Mindestabstand einzuhalten, der dem Fünffachen des größeren Leitungsdurchmessers entspricht, einzuhalten. Außerdem muss das Bauteil eine Mindestdicke, von 60 mm für feuerhemmende, 70 mm für hochfeuerhemmende und 80 mm für feuerbeständige Bauteile aufweisen und die Restöffnung muss mit Mörtel oder Beton verschlossen werden.

Bei der Verlegung in eigenen Durchbrüchen muss ebenso der Restquerschnitt, zwischen Leitung und Bauteil oder Leitung und dem sie umgebenden nichtbrennbaren Hüllrohr, verschlossen werden. In diesem Fall können dazu auch intumeszierende Materialien (Abstand zwischen Rohr und umgebenden Bauteil oder Hüllrohr max. 15 mm) oder Mineralfasern (Abstand zwischen Rohr und umgebenden Bauteil oder Hüllrohr max. 50 mm) verwendet werden. Die Mineralfasern müssen einen Schmelzpunkt > 1000 °C aufweisen.

Auch für Rohrleitungen mit Dämmung werden Erleichterungen gestattet, dabei spielt die Verlegung in eigenen oder gemeinsamen Durchbrüchen keine Rolle. Beim Verschluss der Restöffnung muss dabei äquivalent zu Leitungen ohne Dämmung vorgegangen werden (Mörtel, Beton, Mineralfasern, Intumeszenzmaterial). Die vorgenannten Mindestbauteildicken gelten entsprechend. Wichtig ist, dass im Bereich der Durchführung eine Mineralfaserdämmung aus n. b. B., Schmelzpunkt > 1000 °C, angeordnet werden muss. Eine Umhüllung bis zu einer Dicke von 0,5 mm aus brennbaren Baustoffen ist gestattet. Der Abstand zwischen den Dämmschichtoberflächen zueinander und zu elektrischen Leitungen im Durchführungsbereich muss mindestens 50 mm betragen. Bei Rohren mit brennbarer Dämmung ist außerhalb der Durchführung auf einer Länge von 500 mm beidseitig der Durchführung eine Umhüllung aus Stahlblech oder ebenfalls eine Dämmung aus n. b. B. anzuordnen.

Erleichterungen für einzelne Leitungen - Führung durch Decken

Gedämmte oder ungedämmte Rohrleitungen bis zu einem Durchmesser von 110 mm aus b. B. oder n. b. B. dürfen durch Decken geführt werden, wenn sie entweder

- innerhalb von Wandschlitzten massiver Wände verlegt werden und mit Putz oder nicht-brennbarer Dämmung überdeckt oder mit Platten aus n. b. B. bedeckt sind, oder
- in Wandecken verlegt werden, sodass sie von zwei Seiten von der Wand und von den anderen Seiten äquivalent zur Verlegung in Schlitzten verschlossen sind.

Anwendbarkeit der Erleichterungen im Holzbau

Die Fassung der MLAR, Stand 05.04.2016 enthält Erleichterungen für die Führung von Leitungen durch feuerhemmende Wände sowie für die Führung von einzelnen Leitungen durch Bauteile. Die Erleichterungen wurden im Detail in weiter oben beschrieben. Für die Anwendung der Erleichterungen für die Führung von Leitungen durch feuerhemmende Wände wird die Nichtbrennbarkeit der Baustoffe des umgebenden Bauteils vorausgesetzt (siehe MLAR 4.2), sie können daher im Holzbau nicht angewendet werden.

Die Erleichterungen für einzelne Leitungen gemäß Abschnitt 4.3.1 MLAR schließen die Anwendung in Holzbauteilen nicht aus. Bei der Durchdringung feuerhemmender Holzbauteile können diese Erleichterungen direkt angewendet werden. Die M-HFHHolzR fordert allerdings eine klassifizierte Bekleidung der Öffnungsleibung bei der Ausbildung von Öffnungen in Holzbauteilen. Innerhalb dieser Öffnungsleibung können die Erleichterungen der MLAR angewendet werden. Die Restöffnung ist entsprechend den Regelungen mit Mineralwolle, Intumeszenzmaterial, Mörtel oder Beton zu verschließen. Die Lösung unterscheidet sich damit für Holzbauteile nur wenig von der gängigen Herangehensweise zur Abschottung von Leitungen mit klassifizierten Abschottungen in Holzbauteilen, ohne Anwendung der Erleichterungen (siehe Unterabschnitt 4.2.1). Nach [26] ist die Anwendung der Erleichterungen nach Abschnitt 4.3 für feuerbeständige Bauteile auch auf Holzkonstruktionen mit einem Feuerwiderstand von 90 Minuten übertragbar, sofern äquivalent zu hochfeuerhemmenden Holzbauteilen verfahren wird. Die Leibungsbekleidung muss entsprechend auf eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten angepasst werden. Zu bedenken ist an dieser Stelle, dass die Anforderung feuerbeständig im Normalfall nichtbrennbare Baustoffe fordert. Nur falls davon bereits abgewichen wurde, kann diese Lösung zum Tragen kommen. Die Anwendung der Erleichterungen im Holzbau ist durch die geforderte Leibungsbekleidung der Öffnungen in Holzbauteilen mit einem erhöhten Aufwand verbunden, der gerade für kleine Durchführungen, die mit den Erleichterungen abgedeckt werden können, enorm ist. Die Erleichterungen für feuerhemmende Wände können generell nicht angewendet werden, da die MLAR umgebende nichtbrennbare Baustoffe fordert. Angepasste Lösungen für Erleichterungen wären an dieser Stelle allerdings denkbar und sinnvoll, da bei feuerhemmenden Bauteilen eine nichtbrennbare Bekleidung der Bauteile sowie der Öffnungsleibung nicht gefordert ist. Auch für hochfeuerhemmende und feuerbeständige Bauteile in Holzbauweise wären Erleichterungen sinnvoll, wenn die Durchführung direkt durch Bohrungen in Holz ermöglicht wird. So könnte auf die Leibungsbekleidung und den Restöffnungsverschluss der großen Öffnung verzichtet werden.

2.2.3 Muster-Lüftungsanlagenrichtlinie - M-LüAR

Die M-LüAR [27] regelt den Brandschutz von Lüftungsanlagen (dazu zählen auch Klimaanlage, raumluftheizungstechnische Anlagen und Warmluftheizungen), an die Anforderungen nach § 41 MBO gestellt werden. Die Inhalte haben lediglich einen indirekten Zusammenhang mit dem Themengebiet dieser Arbeit, dennoch werden die grundlegenden Anforderungen an Lüftungsanlagen an dieser Stelle beschrieben, vor allem, um Lüftungsanlagen und die Anforderungen an

diese von Leitungsanlagen abzugrenzen. An einigen Stellen können Parallelen bzw. Berührungspunkte bei den Anforderungen an die brandschutztechnische Betrachtung von Leitungsanlagen und Lüftungsanlagen erkannt werden.

Grundsätzlich ist die Anforderung an Baustoffe für Lüftungsleitungen und deren Bekleidungen, dass sie nicht brennbar sind. Ist kein Beitrag zur Brandentstehung oder Brandweiterleitung zu befürchten, darf auch auf brennbare Baustoffe zurückgegriffen werden.

Schwerentflammbare Baustoffe dürfen verwendet werden für:

- Lüftungsleitungen durch Bauteile, deren Feuerwiderstandsanforderung nicht durch deren raumabschließende Funktion zustande kommt.
- Lüftungsleitungen durch raumabschließende Bauteile, wenn Brandschutzklappen an der Durchtrittsstelle vorgesehen werden. Für Brandschutzklappen wird mindestens die Feuerwiderstandsfähigkeit feuerhemmend gefordert. Höhere Anforderungen sind möglich.
- Mindestens feuerhemmende Lüftungsleitungen oder wenn die Lüftungsleitungen in mindestens feuerhemmenden Schächten verlegt sind. (Höhere Anforderungen können gestellt werden.)

Die Verwendung schwerentflammbarer Baustoffe ist dabei sowohl für Lüftungsleitungen über Unterdecken, die tragende Bauteile brandschutztechnisch schützen müssen, als auch in notwendigen Treppenträumen, notwendigen Fluren sowie in Räumen zwischen notwendigen Treppenträumen und den Ausgängen ins Freie nicht gestattet, außer die Leitungen in den genannten Räumen sind feuerhemmend. Brennbare Baustoffe dürfen generell keine Anwendung finden, wenn heiße Luft (über 85 °C) gefördert wird oder sich in den Leitungen brennbare Stoffe in besonderem Maße ablagern können.

Eine weitere Möglichkeit der Verwendung von b. B. können sich für Beschichtungen, Bekleidungen, Dämmschichten sowie bei (lokal begrenzten) kleinen Bauteilen von Lüftungsanlagen ergeben. Werden die Abschnitte 5 bis 8 der M-LüAR eingehalten, kann von einer Erfüllung der Anforderungen des § 41 Abs. 2 MBO ausgegangen 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 frei von Öffnungen und mit Stahlabhängern befestigt sind. Weiterhin stellt die M-LüAR Anforderungen an

- die Installation von Lüftungsleitungen,
- die Einrichtungen zur Luftaufbereitung und Lüftungszentralen,
- Lüftungsanlagen für besondere Nutzungen
- die Abführung von Küchenluft
- die gemeinsame Abführung von Abgasen aus Feuerstätten und Küchenabluft,
- und an Lüftungsanlagen in Sonderbauten.

Für die Durchführung von Lüftungsleitungen durch raumabschließende Bauteile, an die Anforderungen den Feuerwiderstand betreffend gestellt werden, bietet die M-LüAR schematische Darstellungen verschiedener Ausführungsmöglichkeiten.

2.2.4 Muster-Holzbaurichtlinie - M-HFH HolzR

Für Gebäude in Holzbauweisen wie

- Holztafelbauweise
- Holzrahmenbauweise
- Fachwerkbauweise

ist die M-HFH HolzR³ [23] anzuwenden. Sie gilt ausdrücklich nicht für Holz-Massivbauweisen wie

- Brettstapelbauweise, ausgenommen Brettstapeldecken
- Blockbauweise

Die M-HFH HolzR betrifft Gebäude, deren tragende, aussteifende oder raumabschließende Teile aus Holz oder Holzwerkstoffen bestehen und diese die bauordnungsrechtliche Anforderung „hochfeuerhemmend“ erfüllen müssen. Dies schließt die Forderung nach einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus n. b. B. und die Nichtbrennbarkeit von verwendeten Dämmstoffen ein (vgl. § 26 Abs. 2 Satz 2 Nr. 3 MBO). Mit den in der M-HFH HolzR geforderten Maßnahmen soll ein Brennen der tragenden, aussteifenden Holzkonstruktion für einen definierten Zeitraum während eines Brandes verhindert werden. Zudem soll die Einleitung von Feuer und Rauch in raumabschließende Bauteile über Fugen, Installationen und Einbauten sowie eine Brandausbreitung innerhalb der Bauteile verhindert werden. Weiterhin soll die Übertragung eines Brandes über Anschlussfugen raumabschließender Bauteile in benachbarte Nutzungseinheiten/Räume verhindert werden. Besonders relevant für diese Arbeit sind vor allem die brandschutztechnischen Anforderungen, die die M-HFH HolzR an die Ausbildung von Öffnungen für sonstige Einbauten, konkret Abschottungen von Leitungsdurchführungen, stellt. Außerdem relevant sind Anforderungen, die an die Produkte zum Öffnungsverschluss gestellt werden. Folgend werden die für diese Arbeit relevanten Inhalte der M-HFH HolzR zusammenfassend dargestellt.

An Baustoffe stellt die M-HFH HolzR folgende Anforderungen:

- Bauschnittholz muss mindestens der Sortierklasse *S* 10 nach DIN 4047-1:2001-05 entsprechen. Die Holzfeuchte muss zwischen 12% und 15% liegen. Die Maßhaltigkeit der Querschnitte darf eine Abweichung von ± 1 mm bei der Messbezugsfeuchte von 15% nicht überschreiten.
- Die Dämmstoffe müssen nichtbrennbar sein und einen Schmelzpunkt $\geq 1000^\circ\text{C}$ gemäß DIN 4102-17:1990-12 aufweisen. Einlagig stumpf gestoßene Fugen müssen dicht sein, bei zweilagigen Dämmschichten müssen die Stöße versetzt werden.
- Die Brandschutzbekleidung *K*₂60, die nach DIN EN 13501-2 [18] zu klassifizieren ist, soll eine Entzündung der tragenden und aussteifenden Bauteile aus Holz(-werkstoffen) während eines Zeitraums von 60 Minuten verhindern. Die Brandschutzbekleidung ist allseitig und durchgängig anzuordnen und muss aus nichtbrennbaren Baustoffen (n. b. B.) bestehen. Stoßstellen sind mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindung herzustellen.

Wandbauteile müssen eine allseitige Brandschutzbekleidung (s. o.) haben. Sie sind mit umlaufenden Rahmenhölzern und einer formschlüssigen, hohlraumfüllenden Dämmung herzustellen. Hochfeuerhemmende Decken sind entsprechend den Wänden auszuführen. Eine unterseitige

³ Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise

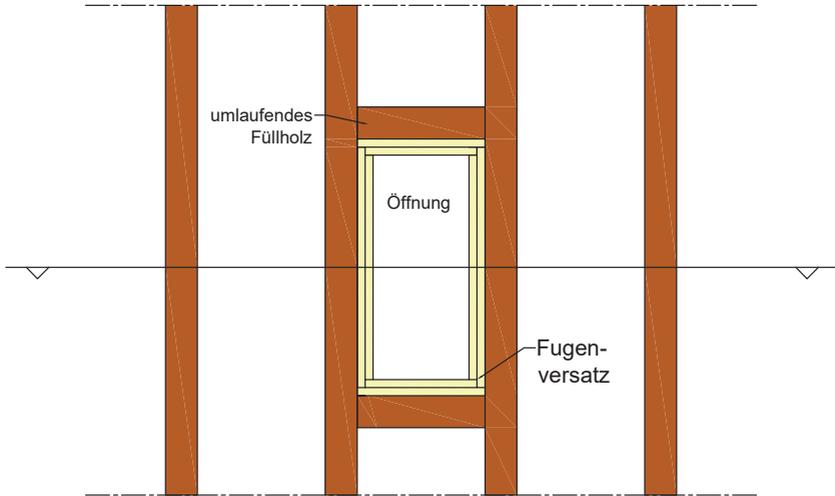


Abb. 2.3: Öffnung mit Öffnungsleibung nach M-HFH HolzR

Brandschutzbekleidung ist allerdings ausreichend. Dafür muss an dieser Stelle der Fußbodenaufbau die Funktion der Brandschutzbekleidung übernehmen. Die M-HFH HolzR beschreibt, wann diese Anforderung als erfüllt gilt. Auch bei der Ausbildung von Anschlüssen sind die Details zur Ausführung der Brandschutzbekleidung zu beachten. Anschlüsse sind so zu gestalten, dass die Bekleidung auch bei Verformungen, die durch die Brandeinwirkung entstehen können, nicht aufreißt. Dazu sind zur Verbindung der Bauteile Schrauben in einem Abstand ≤ 500 mm vorzusehen. Die Schrauben müssen einen Schaftdurchmesser von 12 mm und eine Einbautiefe von mindestens 70 mm haben. Alternativ sind unter bestimmten Bedingungen Schrauben/Gewindestangen mit einem Mindestdurchmesser von 8 mm anwendbar. Fugen zwischen Bauteilen sind mit n. b. B. zu verschließen. Werden Öffnungen für Türen, Fenster oder sonstige Einbauten (dazu zählen auch Leitungsdurchführungen) hergestellt, so sind diese mit einer Brandschutzbekleidung in den Öffnungsleibungen mit Fugenversatz (siehe Abb. 2.3 und Abb. 2.4), Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen auszuführen. Werden an den Öffnungsverschluss brandschutztechnische Anforderungen gestellt, wie z. B. an Kabelabschottungen, so dürfen diese nur eingebaut werden, wenn ein entsprechender Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweis vorliegt, der den Einbau dieser Abschlüsse in hochfeuerhemmende Bauteile regelt. Installationen sind vor Wänden bzw. unterhalb von Decken oder in Schächten/Kanälen zu führen. Werden Schächte oder Kanäle verwendet, gelten für die Durchführung dieser durch Wände und Decken dieselben Anforderungen wie für sonstige Öffnungen (s. o.). Für einzelne Leitungen oder Hüllrohre aus n. b. B. sowie Hohlwanddosen gelten besondere (erleichterte) Bedingungen.

Besonders relevant für diese Arbeit ist die aus dem Zusammenwirken der M-HFH HolzR und der MLAR resultierende Lösung für die Abschottung von Leitungsdurchführungen durch hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise. So muss innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung nach M-HFH HolzR die Abschottung der Leitungen gemäß MLAR erfolgen. Die Produkte müssen für diesen Anwendungsfall zugelassen sein.

Der derzeitige Entwurf einer neuen Holzbaurichtlinie [28] sieht einen Anwendungsbereich der

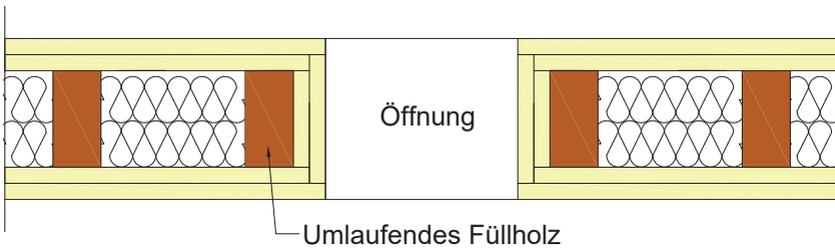


Abb. 2.4: Schnitt Öffnungsleibung nach M-HFH HolzR

Richtlinie für Gebäude der Gebäudeklasse vier und Standardgebäude der Gebäudeklasse fünf unterhalb der Hochhausgrenze vor. Dies greift die Öffnung der MBO für den Holzbau durch die Möglichkeit der abweichenden Verwendung brennbarer Bausteine für Bauteile, an die die bauordnungsrechtliche Anforderung hochfeuerhemmend oder feuerbeständig gestellt wird, auf (siehe Unterabschnitt 2.1.2). Weiterhin wird die Anwendung der Massivholzbauweise für Standardgebäude der Gebäudeklasse vier und fünf, die lediglich Nutzungseinheiten $\leq 200 \text{ m}^2$ enthalten, geregelt ermöglicht. Dort sollen auch 25% der Wandoberflächen oder die Decke als sichtbare Holzoberfläche ausgeführt werden können. Sonstige Flächen sind mit einer 18 mm dicken einlagigen Plattenbekleidung für 30 Minuten vor einer Entzündung zu schützen. Hinsichtlich der Ausbildung von Öffnungen werden keine abweichenden Aussagen von der M-HFH HolzR getroffen.

2.3 Zwischenfazit

Die brandschutztechnischen Anforderungen können aufgrund des in Deutschland herrschenden Föderalismus von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich sein. Hinsichtlich der Verlegung von Leitungen in und durch Bauteile stellt die Musterbauordnung in § 40 grundlegende Anforderungen, die in der Leitungsanlagenrichtlinie konkretisiert werden. Leitungsdurchführungen im Holzbau werden dabei allerdings nicht gesondert betrachtet. In Verbindung mit der M-HFH HolzR ergeben sich Anforderungen an die Gestaltung von Öffnungen zur Leitungsdurchführung durch hochfeuerhemmende Holzbauteile. Die in der MLAR beschriebenen Erleichterungen sind in der derzeitigen Form kaum im Holzbau anwendbar. Die geplante Neufassung der Holzbaurichtlinie erweitert den geregelten Anwendungsbereich des Holzbaus auf höhere Gebäude und nimmt die Massivholzbauweise auf. Zudem werden sichtbare Holzoberflächen geregelt möglich.

3 Grundlagen zum Holzbau und Baustoff Holz

Da sich diese Arbeit mit der Ausführung einer Schnittstelle zwischen Holzbauteilen und der technischen Gebäudeausrüstung aus brandschutztechnischer Sicht beschäftigt, sollen grundlegende Aspekte des Holzbaus beschrieben werden, um die Einordnung des in dieser Arbeit behandelten Details in den Gesamtkontext des Holzbaus zu ermöglichen. Die Eigenschaften des Holzes, welches auch Rohstoff für verschiedenartige Holzwerkstoffe (siehe Unterabschnitt 3.1.3) ist, sollen zunächst grundlegend betrachtet werden. Ein besonderes Augenmerk wird auf das Abbrandverhalten von Holz sowie beim Abbrand des Holzes vorherrschende Temperaturen gelegt. Die dabei beschriebenen Eigenschaften dienen auch als Grundlage, um die, anschließend betrachteten, thermischen Eigenschaften des Werkstoffs darstellen zu können.

3.1 Grundlagen zum Holzbau

Ausgehend von allgemeinen brandschutztechnisch relevanten Grundlagen zum Holzbau werden verschiedene Konstruktionsmethoden im Holzbau vorgestellt. Die im Holzbau verwendeten Holzwerkstoffe werden voneinander abgegrenzt. Da Öffnungen als konstruktives Detail des Holzbaus für diese Arbeit besondere Relevanz haben, werden diese gesondert betrachtet. Abschließend wird ein kurzer Einblick in die Bemessung von Holzkonstruktionen im Brandfall gegeben.

3.1.1 Mehrgeschossiger Holzbau

Weltweit und in Deutschland gewinnt der mehrgeschossige Holzbau in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Für Deutschland ist dies an der steigenden Anzahl an genehmigten Holzbauprojekten, vor allem im Wohnungsbau, zu erkennen [29]. An Abb. 3.1 ist abzulesen, dass der Anteil an genehmigten Gebäuden in Holzbauweise seit dem Jahr 2004¹ bis im Jahr 2019² zugenommen hat. Zudem lassen aktuelle Bewegungen im Bauordnungsrecht (siehe Unterabschnitt 2.1.2 sowie Unterabschnitt 2.2.4) die Annahme zu, dass der Anteil des Holzbaus zukünftig steigen wird. Die neuen Regelungen ermöglichen zukünftig auch Gebäude mit einer größeren Geschossanzahl geregelt in Holzbauweise zu errichten. Mit zunehmender Höhe und Komplexität der Gebäude nimmt der Bedarf an Leitungsabschottungen zu, was die Relevanz dieses Themas unterstreicht.

Die M-HFH HolzR [23] regelte bislang nur Gebäude bis zu einer Höhe von 13 Metern. Allerdings bestehen bereits einige Gebäude die diese Grenze deutlich überschreiten und sogar über die Hochhausgrenze hinauswachsen. Realisiert wurden diese Bauwerke mit Hilfe von individuellen, risikoorientierten Brandschutzkonzepten, die Abweichungen vom Baurecht durch entsprechende bauliche, anlagentechnische oder auch organisatorische Kompensationsmaßnahmen ermöglichen. Häufig betreffen die Abweichungen eine reduzierte Bekleidung der Bauteiloberfläche, die Verwendung brennbarer Dämmstoffe, sichtbare Holzoberflächen oder die Überschreitung der Höhengrenze von Gebäudeklasse 4 zu Gebäudeklasse 5. Als Kompensationsmaßnahmen kommen beispielsweise Brandmeldeanlagen zum Einsatz, die eine Brandfrüherkennung und damit

¹ Einführung der M-HFH HolzR

² aktuellste verfügbare Zahlen

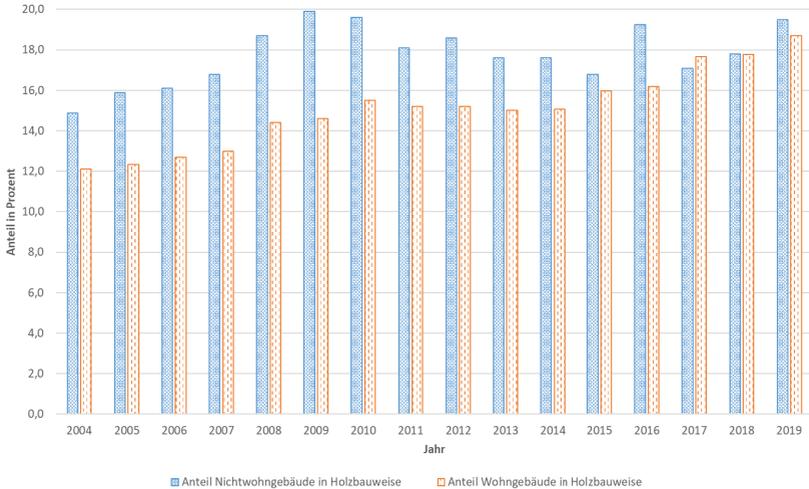


Abb. 3.1: Anteil der genehmigten Gebäude in Holzbauweise 2004 bis 2019 [30]

eine schnellere Alarmierung der Einsatzkräfte sowie eine schnellere Räumung des Gebäudes ermöglichen. Feuerlöschanlagen, meist Sprinkleranlagen, können die Ausbreitung eines Brandes frühzeitig behindern und somit ebenfalls brennbare Bauteile bzw. Bauteiloberflächen kompensieren. Weiterhin kann es für ein erfolgreiches Genehmigungsverfahren hilfreich sein, Brandabschnitte kleiner zu dimensionieren. Mit diesen Kompensationsmaßnahmen kann der immobile Brandlast, in Form der Konstruktion, Rechnung getragen werden und im Brandfall ein erfolgreicher Löschangriff ermöglicht werden [31].

3.1.2 Konstruktionsmethoden im Holzbau

Der moderne Holzbau kombiniert unterschiedliche Arten vertikaler und horizontaler Bauelemente. Abbildung 3.2 stellt unterschiedliche Arten von Decken- und Wandelementen dar, die im Holzbau zur Verfügung stehen. Die Bauweisen ergeben sich, wenn die passenden vertikalen und horizontalen Bauelemente miteinander kombiniert werden. Beim Zusammenfügen von Bauelementen verschiedener Konstruktionsmethoden entstehen sogenannte Mischkonstruktionen. Bauelemente lassen sich aufgrund ihres allgemeinen Aufbaus einer der Konstruktionsmethoden zuordnen. Auf Detailebene können sie sich deutlich unterscheiden.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist vor allem das Brandverhalten der verwendeten Materialien (Dämmstoffen, Leim, usw.) sowie das Vorhandensein von Hohlräumen relevant. Die Internetseite „Dataholz.eu“ [33] bietet eine Sammlung von Daten über Holz, Holzwerkstoffe, Baustoffe, Bauteile und Bauteilfügungen für den Holzbau. Die dort vorhandene Sammlung von durch Prüfanstalten akkreditierter Aufbauten bietet einen weitreichenden Überblick über die aktuell am Markt vorhandenen Wand- und Deckenaufbauten aus Holz. Aus brandschutztechnischer Sicht sind, gerade für Bauteilfügungen, Detailinformationen über Bauelementaufbauten wichtig. Bereits kleine Änderungen beispielsweise bzgl. des Brandverhaltens können die erforderlichen brandschutztechnischen Maßnahmen deutlich beeinflussen.

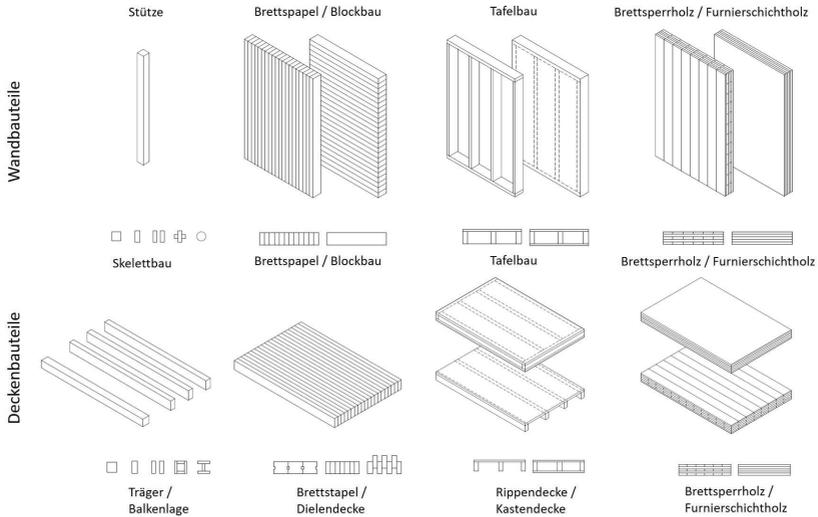


Abb. 3.2: Vertikale und horizontale Komponenten unterschiedlicher Konstruktionsmethoden im Holzbau, modifiziert entnommen aus [32]

3.1.3 Holzwerkstoffe

Im Holzbau wird, anstelle von reinem Holz, großteils auf Holzwerkstoffe zurückgegriffen. Der inhomogene und anisotrope Baustoff wird also nicht in seiner reinen Form, wie er wächst, verwendet. Zum einen lassen sich auf diese Weise Produkte mit größeren Abmessungen herstellen, zum anderen können Bauteileigenschaften gezielt beeinflusst werden und Reststoffe wie Späne verwendet werden. Durch die gegenseitige Sperrung kreuzweise verleimter Lagen können beispielsweise geringere Schwind- und Quellmaße erreicht werden. Abbildung 3.3 zeigt, wie Holzwerkstoffe in verschiedene Gruppen, je nach Ausgangsprodukten und Verarbeitungsweise, eingeteilt werden können und soll dabei helfen, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit verwendeten Holzwerkstoffe einzuordnen und abzugrenzen. Von Relevanz für diese Arbeit sind die Werkstoffe Brettschichtholz, Brettsperrholz sowie OSB-Platten. Die Unterschiede im Aufbau zwischen Brettschichtholz und Brettsperrholz sind für diese Arbeit wichtig. Aus diesem Grund werden diese in Abb. 3.4 gesondert dargestellt. Festzustellen ist, dass Brettschichtholz normalerweise lediglich aus einer Lage Lamellen besteht. Es beinhaltet demnach Leimfugen, die parallel zueinander angeordnet sind und das Bauteil durchdringen. Brettschichtholz wird im Normalfall für Träger verwendet. Bei Brettsperrholz wird eine ungerade Anzahl verleimter Brettlagen (>3) kreuzweise verleimt. Es entsteht ein mehrschichtiges, flächiges Bauteil. Die entstehenden Leimfugen sind parallel zur entstehenden Fläche durchgehend, senkrecht dazu allerdings nach jeder Schicht unterbrochen. Brettsperrholz wird im Normalfall für tragende flächige Bauteile (Wände, Decken) eingesetzt. Die Unterschiede im Aufbau von Brettschichtholz und Brettsperrholz sowie der Zusammensetzung anderer Holzwerkstoffe sorgen für ein unterschiedliches Brandverhalten der Holzwerkstoffe. Hierzu wird auf Unterabschnitt 3.2.4 verwiesen.

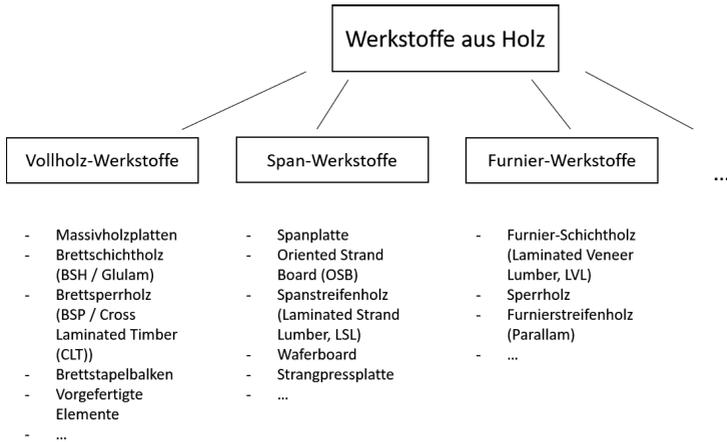


Abb. 3.3: Unterteilung von Werkstoffen aus Holz, eigene Darstellung in Anlehnung an [34]

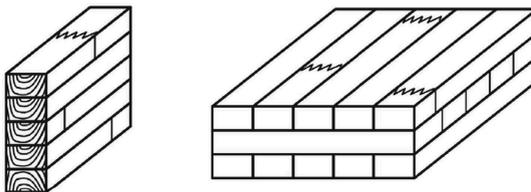


Abb. 3.4: Darstellung des Aufbaus von Brettschichtholz (links) und Brettsperrholz (rechts), entnommen aus [6]

3.1.4 Ausbildung von Öffnungen in Holzbauteilen

Da Holz ein brennbarer Baustoff ist, muss bei der Ausbildung von Öffnungen in Holzbauteilen darauf geachtet werden, dass innenliegende Elemente der Bauteile, die sonst durch vorgelagerte Schichten vor einer Brandbeanspruchung geschützt sind, im Brandfall nicht schneller bzw. stärker beansprucht werden. Zudem müssen Hohlraumbrände vermieden werden. Diese Ziele werden im Normalfall durch Bekleidungen der Holzbauteile erreicht, die die Bauteile für die erforderliche Dauer vor einer Brandbeanspruchung schützen. Eckbereiche stellen eine kritische Stelle dar, da diese von mehreren Seiten beflammt werden können. Fugen sind im Regelfall nicht durchgängig, sondern mit einfachen oder doppeltem Versatz auszubilden.

Zur Verlegung von Leitungen durch Bauteile und dem damit verbundenen Einbau von Abschottungssystemen, ist eine Öffnung im Bauteil herzustellen. In Unterabschnitt 2.2.4 wurde bereits beschrieben, wie eine Öffnung bzw. deren Leibung innerhalb eines hochfeuerhemmenden Holzbauteils nach der aktuell geltenden M-HFHHolzR [23] auszuführen ist. Folgend sollen weitere Ausführungsmöglichkeiten von Öffnungen aufgezeigt werden, die für den Einbau von Abschottungssystemen genutzt werden können. Diese beziehen sich zum Teil auf die in Deutschland geltenden Regelungen, es werden aber auch Ausführungsmöglichkeiten anderer europäischer Länder in Betracht gezogen. Diese sind, teils aufgrund der in Deutschland geforderten Brandschutzbekleidung (K₂60-Bekleidung) für hochfeuerhemmende Holzbauteile, nicht direkt anwendbar.

In [35] wurden verschiedene Varianten erarbeitet, wie Öffnungen für den Einbau von Leitungsabschottungen in Bauteile, die die Klassifizierung REI60 - K₂60 haben, ausgebildet werden können, sodass die Anforderungen an das Kapselkriterium erfüllt werden. Allgemein wird, bezugnehmend auf Prüfergebnisse der MPA Braunschweig, die Aussage getroffen, dass ein einfacher Fugenversatz anstelle eines doppelten Fugenversatzes bei einer zweischichtigen Leibungsbekleidung ausreichend ist (siehe Abb. 3.5). Auf dieser Basis und der Basis weiterer Untersuchungen und Recherche wird in [35] weiterhin exemplarisch dargestellt, wie Öffnungen zum Einbau eines Abschottungssystems in ein Deckenbauteil ausgeführt werden können, sodass das Raumabschluss- und Wärmedämmkriterium sowie das bereits genannte Kapselkriterium eingehalten werden kann. Ein Aufbau ist in Abb. 3.6 dargestellt und kann auf unterschiedliche Deckenkonstruktionen in Holzrahmen und Massivholzbauweise übertragen werden. Eine weitere Möglichkeit zum Einbau von Abschottungssystemen in Massivholzdecken ist in Abb. 3.7 zu sehen. Hierbei werden zwei Bekleidungslagen auf der Öffnungsleibung aufgebracht. Ist die Schnittkante nicht optimal ausgeführt, kann ein Brandschutzanstrich zwischen Bekleidung und Massivholz-Deckenplatte notwendig werden.

In [36] wird, auf Grundlage von Brandversuchen über 30 und 90 Minuten, empfohlen, die Leibungsbekleidung entsprechend der Prinzipien der Musterholzbaurichtlinie [23], mindestens 100 mm umlaufend an Ober- und Unterseite auszuführen. Je nach Feuerwiderstandsdauer des betreffenden Bauteils kann die Kapselung als K₂60-Bekleidung (für Feuerwiderstandsdauern

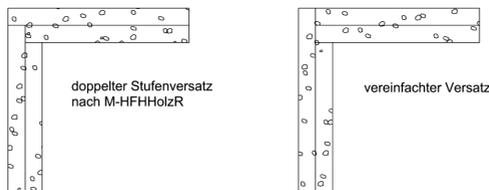


Abb. 3.5: Darstellung des doppelten (links) und einfachen (rechts) Versatzes zur Ausführung von Eckfugen bei Brandschutzbekleidungen [35]

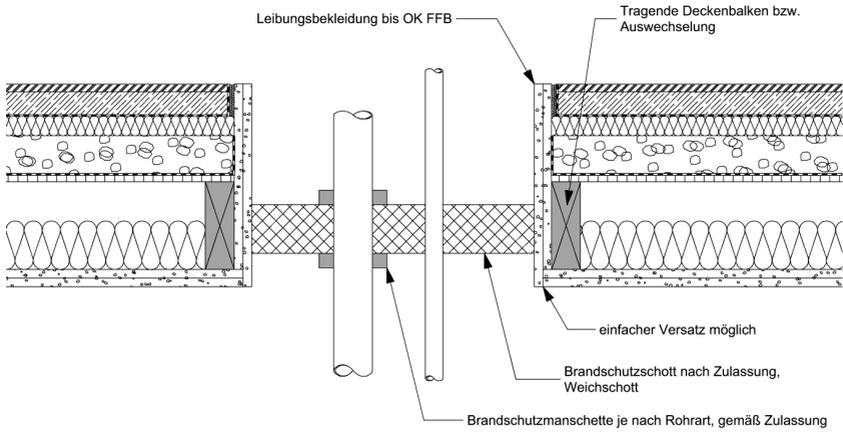


Abb. 3.6: Darstellung eines Weichschottsystems, innerhalb einer Öffnung mit Leibungsbekleidung und einfachem Fugenversatz in einem Deckenbauteil [35]

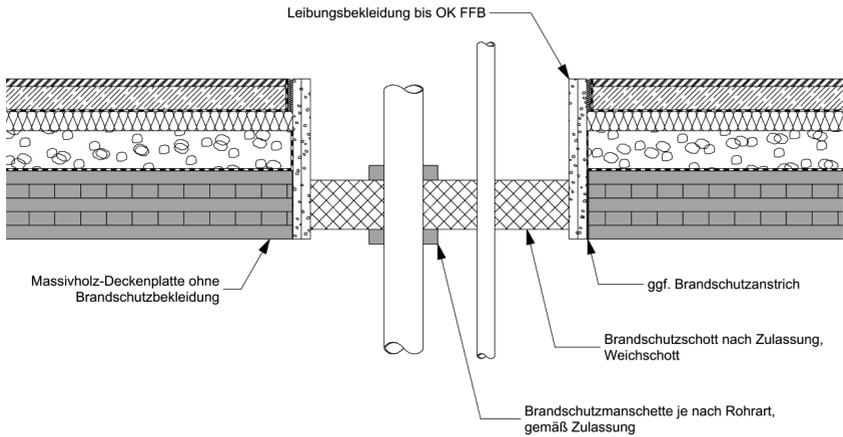


Abb. 3.7: Darstellung eines Weichschottsystems, innerhalb einer Öffnung mit Leibungsbekleidung in einem massiven Holzdeckenbauteil [35]

3 Grundlagen zum Holzbau und Baustoff Holz

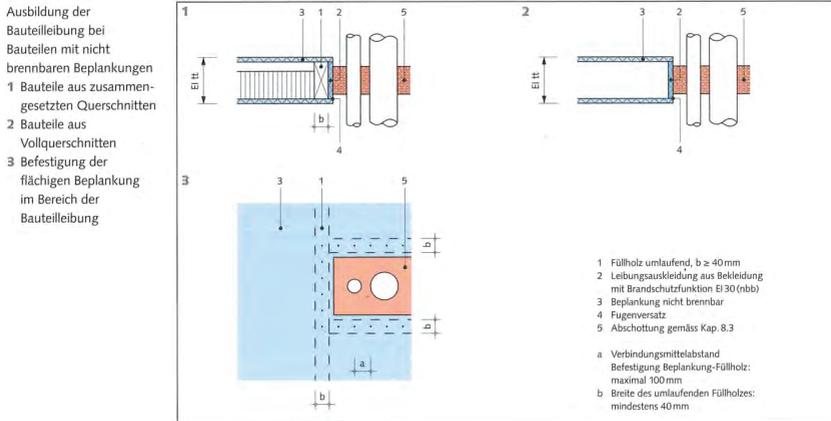


Abb. 3.8: Ausbildung der Öffnungsleibung bei Oberflächen mit nichtbrennbarer Bekleidung in der Schweiz, entnommen aus [38]

von 60 und 90 Minuten) oder K230-Bekleidung ausgeführt werden. Durchgängige Fugen sind zu vermeiden. Umlaufende Füllhölzer (mindestens 40 mm dick) sollten um die Öffnung bei Bauteilen in Holzrahmenbauweise angeordnet werden, um die Bekleidung zu stabilisieren. Spalte und Fugen sollten mit einer Füllmasse (z. B. Gipsspachtel) verschlossen werden. Diese Variante kann zur Öffnungsausbildung in sonst unbekleideten Bauteilen angewendet werden.

In [37] wird ebenfalls der Hinweis gegeben, dass, falls eine Leibungsbekleidung im Öffnungsreich angebracht wird, diese vollflächig am Holz anliegen muss oder zwischen Holz und Gipsplatte zusätzlich eine intumeszierende Beschichtung aufzubringen ist.

Ausführliche Hinweise zur Herstellung von Öffnungen in Holzbauteilen zum Einbau von Abschottungssystemen bietet [38], mit Gültigkeit in der Schweiz. Öffnungsleibungen sind über den gesamten Bauteilquerschnitt mit nichtbrennbaren Bekleidungen mit Brandschutzfunktion (EI30, n. b.) zu versehen. Durchgehende Fugen sollen vermieden werden. Bei Bauteilen aus zusammengesetzten Querschnitten (z. B. Holzrahmenbauweise) sind umlaufende Füllhölzer vorzusehen. Für Bauteile mit nichtbrennbaren Beplankungen ist die Ausbildung der Öffnungsleibung in Abb. 3.8 dargestellt. Für Bauteile mit brennbaren Oberflächen ist der Fugenversatz mit Hilfe eines 50 mm breiten Kragens aus Bekleidungsmaterial mit Brandschutzfunktion zu gewährleisten (siehe Abb. 3.9). Ist es nicht möglich, den erforderlichen Versatz zu gewährleisten oder einen Kragen herzustellen, besteht weiterhin die Möglichkeit, die Öffnungsleibung mit Hilfe von, für diesen Zweck zugelassenen, Brandschutzdichtungsbändern zwischen Leibung und Beplankung herzustellen (vgl. Abb. 3.10).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle aufgezeigten Ausführungsvarianten das Ziel verfolgen, einen Einbrand in den Querschnitt des jeweiligen Bauteils zu verhindern. Bei Bauteilen mit Bekleidung wird verhindert, dass der Brand über Fugen in der Bekleidung oder zwischen der Bekleidung und dem Bauteil in die Konstruktion vordringen kann. Dies wird in den meisten Fällen durch einen Versatz der Fugen in der Brandschutzbekleidung realisiert. Werden Bekleidungen direkt an massive Holzoberflächen angeschlossen, so müssen diese vollflächig aufliegen, oder es sind gesonderte Massnahmen z. B. in Form einer Brandschutzbeschichtung zwischen Holzoberfläche und der Brandschutzbekleidung zu treffen. Unterschiede in der Ausführung der Öffnungsleibung ergeben sich vor allem durch die Unterscheidung zwischen brennbaren oder

Ausbildung der Bauteilleibung bei Bauteilen mit brennbaren Oberflächen
 1 Bauteile aus zusammengesetzten Querschnitten
 2 Bauteile aus Vollquerschnitten
 3 Befestigung der flächigen Beplankung und des Kragens im Bereich der Bauteilleibung

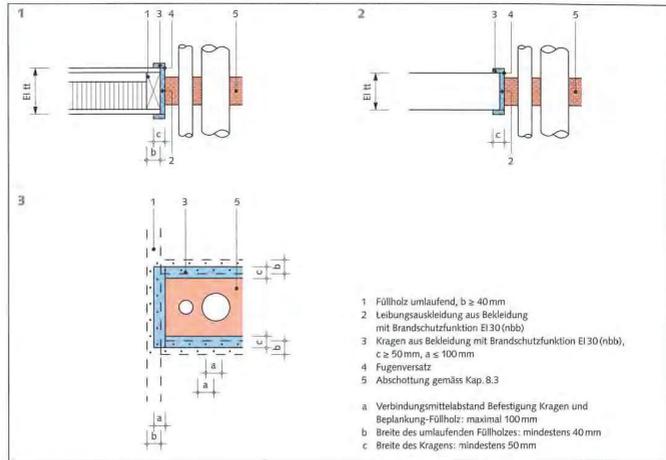


Abb. 3.9: Ausbildung der Öffnungtleibung bei brennbaren Bauteiloberflächen in der Schweiz, entnommen aus [38]

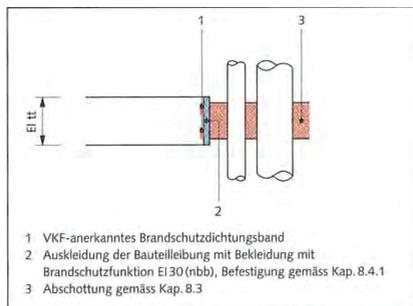


Abb. 3.10: Ausbildung der Öffnungtleibung bei brennbaren Bauteiloberflächen ohne Fugenversatz in der Schweiz, entnommen aus [38]

nichtbrennbaren Bekleidungen der Bauteiloberflächen bzw. Oberflächenbekleidung sowie massiven oder zusammengesetzten Bauteilquerschnitten.

3.1.5 Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall

Mit der Einführung der Eurocodereihe im Jahr 2012 hat DIN EN 1995-1-2 (Eurocode 5 Teil 1-2) [39], mit zugehörigem nationalen Anhang [40], die zuvor geltenden Bemessungstabellen nach DIN 4102-4 [41] abgelöst. Die Bauteilbemessung nach Eurocode ermöglicht, alternativ zur Bauteilbemessung nach ETK, auch die Bemessung nach Naturbrandkurven, die einen realistischeren Brandverlauf, (siehe Abb. 3.11 links) mit Brandentwicklungs-, Vollbrand-, und Abkühlphase abbilden sollen, und somit oft zu einem wirtschaftlicheren Ergebnis führen. Die Einheitstemperaturzeitkurve soll Brandverläufe von gewöhnlichen Raumbränden konservativ darstellen. Ihr Beginn stellt den Zeitpunkt des Flashovers und damit den Übergang zum Vollbrand dar. Der Verlauf der ETK (vgl. Abb. 3.11 rechts) basiert nach [42] auf Erfahrungswerten von Brandversuchen aus den 1930er Jahren. Ein internationaler historischer Überblick zur Entstehung von Bemessungskurven zur Feuerwiderstandsprüfung ist in [43, 44] zu finden. Die Einheitstemperaturzeitkurve entspricht der Bemessungskurve nach ISO 834-1 [45]. In den USA und Kanada entsprechen sich die maßgebenden Bemessungskurven. Diese sind in ASTM E119 (USA) bzw. CAN/ULC-S101 (Kanada) beschrieben. Werther [46] zeigt, dass trotz geringerer nomineller Temperaturen der ASTM-Kurve im Vergleich zur ISO 834-Kurve, aufgrund der unterschiedlichen zu verwendenden Messtechnik, die Beanspruchung auf der Prüfkörperoberfläche und im Prüfkörper äquivalent ist. Daraus kann geschlossen werden, dass, im Hinblick auf gemessene Temperaturen an Probekörpern, die Prüfergebnisse aus Europa mit denen aus Amerika und Kanada, bei Beanspruchung nach den genannten Temperatur-Zeitkurven, vergleichbar sind.

In Brandversuchen zeigt sich, dass Naturbrände die Temperaturen der ETK teils übersteigen, jedoch anschließend im Gegensatz zur ETK schnell wieder abklingen [42] (siehe Abb. 3.11 rechts). Durch die veränderte Beanspruchung kann das Brandverhalten des Holzes beeinflusst werden. Auf diese Thematik wird in Unterabschnitt 3.2.4 eingegangen.

Bei der Bauteilbemessung im Brandfall ist nachzuweisen, dass die Einwirkungen auf das Bauteil im Brandfall nicht höher sind als die Beanspruchbarkeit des Bauteils. Dies kann mit vereinfachten oder allgemeinen Rechenverfahren erfolgen.

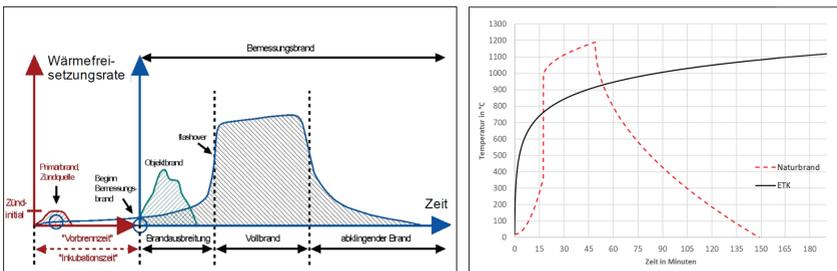


Abb. 3.11: links: Ablauf und Phasen eines natürlichen Brandes [47]; rechts: Verlauf der ETK sowie beispielhafte Darstellung eines berechneten Naturbrandes nach [48], dessen Verlauf die ETK zeitweise übersteigt

Vereinfachte Verfahren

Nach Eurocode 5 können die Einwirkungen im Brandfall vereinfacht aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur ermittelt werden. Die Beanspruchbarkeit von Bauteilen kann mit zwei unterschiedlichen vereinfachten Verfahren ermittelt werden, denen beiden die Abbrandtiefe am Holzbauteil zugrunde liegt. Zum einen kann der effektive Restquerschnitt bestimmt werden und für diesen die Tragwerksbemessung nach den Regeln für den Kaltfall durchgeführt werden. Zum anderen kann für allseitig beflamte Rund- und Rechteckquerschnitte aus Nadelholz, die Methode mit reduzierten Werkstoffeigenschaften angewendet werden, wobei der verbleibende Restquerschnitt zugrunde gelegt wird [49]. Methodisch wird also für die Bauteile eine verminderte Tragfähigkeit aufgrund des resultierenden Abbrandes und dem dadurch verminderten Bauteilquerschnitt berechnet und der Einwirkung gegenübergestellt.

Bei der Berechnung der Abbrandtiefe nach Eurocode 5 sind Bekleidungen von Bauteilen zu berücksichtigen, da dann die Beanspruchung und der Abbrand des Holzes erst zu einem späteren Zeitpunkt im Brandverlauf einsetzt. Versagt die Bekleidung eines anfänglich geschützten Bauteils, ist solange eine erhöhte Abbrandrate für die darunterliegende Schicht anzusetzen, bis eine Abbrandtiefe von 25 mm erreicht ist. Bei unbedeckten Bauteilen kann mit einer konstanten Abbrandrate gerechnet werden. Für die Zeitdauer der Brandbeanspruchung t ist zu unterscheiden, ob eindimensionaler Abbrand vorliegt oder ein Eckabbrand und Risse (mehrdimensionaler Abbrand) berücksichtigt werden müssen. Je nachdem ist entweder der Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate β_0 , woraus sich der Bemessungswert der Abbrandtiefe für eindimensionalen Abbrand $d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t$ ergibt oder der Bemessungswert der ideellen Abbrandrate β_n anzusetzen, woraus der Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe $d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t$ resultiert. Die Abbrandrate gibt den Abbrand in mm pro Zeiteinheit (min) an. Die Bemessungswerte für Abbrandraten im Eurocode 5 gelten für Normbrandbeanspruchung und werden in Abhängigkeit der Dichte angegeben. Ebenso wird zwischen Vollholz und Brettschichtholz unterschieden (siehe dazu auch Unterabschnitt 3.2.4). Für Brettschichtholz aus Nadel- und Buchenholz mit einer Rohdichte $\geq 290 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ wird eine Abbrandrate von $\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bzw. $\beta_0 = 0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ angegeben. Für Vollholz sind leicht abweichende Werte von $\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bzw. $\beta_n = 0,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ gegeben. Für Holzwerkstoffplatten, die häufig als Bekleidung von Holzbauteilen dienen, werden Abbrandraten angegeben, deren Werte für eine Rohdichte von $450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und eine Werkstoffdicke von 20 mm gelten. Für andere charakteristische Rohdichten ρ_k und Werkstoffdicken $h_p < 20$ mm kann die Abbrandrate $\beta_{0,\rho,t}$ wie folgt berechnet werden:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \cdot k_\rho \cdot k_h \quad (3.1)$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (3.2)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (3.3)$$

ρ_k = charakteristische Rohdichte, in kg/m^3

h_p = Werkstoffdicke, in mm

Wie oben bereits beschrieben, können sich Abbrandraten bei unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus verändern.

Zusammenfassend muss für Holzbauteile sichergestellt sein, dass im Brandfall ein notwendiger Restquerschnitt verbleibt, der die Funktion des Bauteils erfüllen kann. Dies kann erreicht werden, indem der notwendige Querschnitt entsprechend lange vor einer Brandbeanspruchung geschützt wird. Dies ist entweder durch eine Bekleidung des Bauteils möglich, oder aber durch eine „Bekleidung“ mit dem Holz selbst, indem das Bauteil in Hinblick auf den erwarteten

Abbrand überdimensioniert wird.

Raumabschluss

Die raumabschließende Funktion (Kriterium E) von Wand- und Deckenkonstruktionen kann nach Anhang E des Eurocode 5 Teil 1-2 berechnet werden. Das Raumabschlusskriterium wird dabei als erfüllt angesehen, wenn das Wärmedämmkriterium (I) erfüllt ist und sichergestellt ist, dass sich Bekleidungen der Konstruktion auf der unbeflammten Seite während des Brandes nicht lösen. Das Rechenverfahren ist nur für Bauteile in Holzrahmenbauweise mit Bekleidungen aus Holzwerkstoffen oder Gipsplatten und bis zu einer Branddauer von 60 Minuten anwendbar. Das Verfahren bemisst die Wärmedämmung des Bauteils anhand der Summe der Beiträge der einzelnen Konstruktionsschichten zur Wärmedämmung. Die Grundwerte der Wärmedämmung der einzelnen Bauteilschichten werden dazu, nachdem sie, in Abhängigkeit ihrer Position im Bauteil und dem Vorhandensein von Fugen, abgemindert wurden, summiert. Zum Nachweis der Einhaltung des Wärmedämmkriteriums muss die errechnete Zeit t_{ins} , die das Erreichen der angegebenen Temperaturerhöhung (140K bzw. 180K) auf der feuerabgewandten Seite beschreibt, größer sein als die erforderliche Feuerwiderstandsdauer der Konstruktion t_{req} . Die Berechnung von t_{ins} erfolgt für unterschiedliche Wärmedurchgangswege in Abhängigkeit des Vorhandenseins von beispielsweise Fugen oder Installationen wie folgt:

$$t_{ins} = \sum t_{ins,0,i} \cdot k_{pos} \cdot k_j \quad (3.4)$$

Dabei ist

- $t_{ins,0,j}$ der Grundwert der Wärmedämmung der Lage i , in Minuten
- k_{pos} der Positionsbeiwert
- k_j der Fugenbeiwert

Mit allgemeinen Berechnungsverfahren, die für einzelne Bauteile, Teile der Konstruktion oder ganze Tragwerke angewendet werden können, kann

- die Abbrandtiefe bestimmt werden,
- die zeitliche Temperaturentwicklung und örtliche Temperaturverteilung in tragenden Bauteilen berechnet werden und
- das Gesamttragwerkverhalten oder das Tragverhalten eines Teils des Tragwerks ermittelt werden.

Da Leitungsabschottungen innerhalb von Holzbauteilen mit direktem Kontakt zu Holz in der Vergangenheit wenig untersucht wurden und prinzipiell nicht vorkamen, enthält das Verfahren zur Berechnung des Raumabschlusses keine gesonderten Regelungen zum Einbeziehen von Leitungsabschottungen in die Berechnung des Raumabschlusses von Holzbauteilen.

Allgemeine Verfahren

Anhang B des Eurocode 5 Teil 1-2 enthält Vorgaben, die für die Berechnungen mittels allgemeinen Rechenverfahren herangezogen werden sollten. Die Außentemperatur sollte mit 20 °C angenommen werden. Zudem werden thermische Holzeigenschaften (Rohdichte, Wärmeleitzahl, Wärmekapazität), wie in den Abbildungen 3.16, 3.17 und 3.18 in Abschnitt 3.2.6 dargestellt, gegeben. Informationen zu thermischen Eigenschaften sind in dieser Arbeit im genannten Abschnitt zu finden. Generell können je nach Berechnungsmodell unterschiedliche Anpassungen der gegebenen Werte thermischer Eigenschaften notwendig sein.

3.2 Brandschutztechnisch relevante Eigenschaften von Holz

Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften des Holzes sollen die brandschutztechnisch relevanten Materialeigenschaften des Baustoffs Holz und dessen Brandverhalten beschrieben werden. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung ist Holz generell als brennbarer Baustoff zu beurteilen (siehe dazu Unterabschnitt 3.2.1). Die Entzündbarkeit wird allerdings maßgeblich vom Oberflächen-Volumen-Verhältnis beeinflusst. Im Sinne des Bauordnungsrechts sind Baustoffe aus Holz normalerweise als normalentflammbar (Baustoffklasse B2 bzw. E oder D) anzusehen. In Form von Holzwerkstoffen, beispielsweise als zementgebundene Spanplatte, können jedoch auch die Anforderungen an schwerentflammbare Baustoffe (Baustoffklasse B1 bzw. C) erfüllt werden (vgl. Unterabschnitt 2.1.3). Um das Verhalten von Holz im Brandfall rechnerisch untersuchen zu können, werden Prozesse im Holz bei erhöhten Temperaturen sowie die damit zusammenhängenden thermischen Eigenschaften des Holzes beschrieben.

3.2.1 Chemischer Aufbau

Holz ist ein komplexes biologisches Gefüge, in dem viele verschiedene Stoffe und Zelltypen zusammenarbeiten, um die Bedürfnisse einer Pflanze möglichst optimal zu bedienen. Dabei hat das Holz drei Hauptfunktionen:

1. Wassertransport von den Wurzeln bis zu den Blättern
2. Sicherung der Standfestigkeit des Baumes
3. Speicherung biochemischer Stoffe

Durch das Verständnis der natürlichen Funktionsweisen der Hölzer in unterschiedlichen Situationen kann auf ihre Eignung zur Verwendbarkeit an anderer Stelle geschlossen werden [50]. Daraus wird auch deutlich, dass sich der Aufbau und die Eigenschaften von Holz, je nach Holzart und Standort, deutlich unterscheiden können.

Im Allgemeinen besteht Holz zum Großteil aus Kohlenstoff (50%) und Sauerstoff (43%). Weitere Bestandteile sind Wasserstoff, Stickstoff und Mineralstoffe [51]. Wird von Holz gesprochen, ist das lignifizierte Gewebe von Bäumen und Sträuchern gemeint [52]. In dieser Arbeit wird unter dem Begriff Holz das Holz von Nadel- und Laubbäumen verstanden. Aus chemischer Sicht besteht Holz aus Cellulose (ca. 30% - 50%), Polyosen (früher: Hemicellulosen, ca. 15% - 35%) und Lignin (ca. 20% - 35%). Polyosen und Cellulose werden unter dem Begriff Holocellulose zusammengefasst [53]. Nadelholz hat im Allgemeinen einen höheren Ligninanteil von ca. 30% im Vergleich zu Laubholz mit einem Ligninanteil von ca. 25% [53].

In [54] wird zusammenfassend beschrieben, welche chemischen Bestandteile Einfluss auf das Brandverhalten von Holz haben. Demnach sind Polyosen hinsichtlich der thermischen Beanspruchung besonders anfällig. In Laub- und Nadelhölzern ist die Zusammensetzung der Polyosen unterschiedlich. Die Polyosen selbst unterscheiden sich daher in Bezug auf ihre thermische Beständigkeit. Nach [55] ist Lignin die für die Kohlebildung hauptverantwortliche Komponente und beeinflusst damit maßgeblich das Brandverhalten unterschiedlicher Holzarten. Zwar treten beim Lignin bereits bei Temperaturen zwischen 130 °C und 150 °C erste Veränderungen auf, jedoch ist das veränderte Ligninmakromolekül auch die beständigste Holzkomponente [54]. Für den Einfluss von Cellulose, Extraktstoffen und den Aschegehalt auf das Brandverhalten von Holz werden in den von [54] zitierten Quellen unterschiedliche bzw. nicht eindeutige Aussagen getroffen, sodass kein sicherer Einfluss festgestellt werden kann.

Aus diesen Angaben ist die Erkenntnis zu ziehen, dass Holz je nach Art (sowie weiteren Einflussfaktoren) einen unterschiedlichen (chemischen) Aufbau aufweist und dieser, aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Bestandteile bei Temperaturbeanspruchung, Einfluss auf die Materialeigenschaften und somit auch das Brandverhalten des jeweiligen Holzes hat.

3.2.2 Holz als Baustoff - Materialeigenschaften

Holz ist ein natürlicher Baustoff, der schon seit Jahrtausenden Anwendung findet. Seit einigen Jahren erlebt der Baustoff eine Renaissance aufgrund seiner speziellen Materialeigenschaften. Aufgrund seiner Fähigkeit im Wachstumsprozess CO_2 zu binden, dient Holz, wenn es in Gebäuden verwendet wird, als langfristiger CO_2 -Speicher. Am Ende dieses Zyklus kann das Holz recycelt oder energetisch verwertet werden, wobei bei Letzterem das darin gebundene CO_2 wieder freigesetzt wird. Holz kann sowohl als tragendes, aussteifendes sowie raumabschließendes Bauteil eingesetzt werden. Es erfüllt dabei nicht nur die statisch geforderten Aufgaben, sondern hat zugleich nennenswerte Dämmeigenschaften, wenn es als Baustoff in der Gebäudehülle verwendet wird. Da Holz ein natürlich gewachsener Rohstoff ist, ist dieser als inhomogen einzustufen. Seine Eigenschaften hängen von den herrschenden Umwelteinflüssen (Klima, Standort, Nährstoffgehalt des Bodens, etc.) am jeweiligen Standort (des Wachstums und der Lagerung) ab. Bei anderen Baustoffen, wie Stahl oder Beton, lassen sich bei der Herstellung die Materialeigenschaften gezielt einstellen. Sie sind als homogen bzw. homogener als Holz einzustufen. Die Beeinflussung der Materialeigenschaften ist jedoch auch teilweise bei Holz, durch die Herstellung von Holzwerkstoffen, (vgl. Unterabschnitt 3.1.3) möglich.

Aus Holz können nahezu alle beliebigen Formen und Größen von Bauteilen hergestellt bzw. industriell vorproduziert werden. Auf der Baustelle werden diese zu einem Gebäude zusammengesetzt. Es ergeben sich deutliche Vorteile in Bezug auf die Bauzeit im Vergleich zu anderen Bauweisen, die teilweise die Herstellung auf der Baustelle und eine damit verbundene Trocknungs- bzw. Aushärtungszeit mit sich bringen. Zudem trägt Holz aufgrund seiner Porosität und seiner hygroskopischen Eigenschaften zur Feuchteregulierung in Innenräumen bei. Es passt sich im Laufe der Zeit an die herrschende Umgebungsfeuchte an, was allerdings bei Reduktion des Feuchtegehalts zum Schwinden und bei Erhöhung des Feuchtegehalts zum Quellen des Holzes führt. Bei einer Holzfeuchte von ca. 28 % ist bei allen Holzarten die Fasersättigung erreicht. Weiteres eingelagertes Wasser wird als freies Wasser bezeichnet und befindet sich in den größeren Zellhohlräumen. Der Punkt der Fasersättigung ist aus baupraktischer Sicht interessant, da sich feuchteabhängige Festigkeitseigenschaften des Holzes nur bis zu diesem Punkt verändern [56]. Ähnliches gilt für die Rohdichte des Holzes. Im Bereich des Feuchtegehaltes von 0 % bis 25 % besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Rohdichte [57]. Je größer die Rohdichte von Holz ist, desto größer ist das volumenbezogene Schwinden oder Quellen. Die relevanten Schwind- und Quellprozesse finden quer zur Faser statt. Die Veränderungen in Faserrichtung sind nahezu vernachlässigbar [57]. Bei einem Feuchtegehalt von 25 % ist in den meisten Fällen 75 % des volumenbezogenen Quellens erreicht [57]. In geschlossenen, beheizten Innenräumen stellt sich [58] zufolge bei Nadelholz eine Ausgleichsfeuchte von 5 % bis 15 % ein. Nach [52] beträgt diese im Allgemeinen 7 % bis 15 %. Die M-HFH HolzR [59] greift diesen Maximalwert der Ausgleichsfeuchte auf (vgl. Unterabschnitt 2.2.4). Normalerweise stellt sich bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % bei den meisten Nadelhölzern bzw. europäischen Hölzern laut [58] und [59] ein Feuchtegehalt von etwa 12 % ein. Der Feuchtegehalt beeinflusst unter anderem folgende Eigenschaften des Holzes [59]:

- Festigkeit
- Elastizitätsmodul
- Schwinden und Quellen
- Wärmeleitfähigkeit

Holz ist nicht nur in Bezug auf sein Schwind- und Quellverhalten ein anisotroper Werkstoff, sondern beispielsweise auch in Hinblick auf seine Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit [52].

Die Dichte von Holz variiert stark zwischen verschiedenen Holzarten. Sie liegt bei heimischen Laubhölzern mit zwischen $0,60 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $0,70 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ höher als die der heimischen Nadelhölzer mit

Werten im Bereich von $0,45 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bis $0,55 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [52]. Weitere Informationen hinsichtlich der Dichte, vor allem hinsichtlich deren Temperaturabhängigkeit, sind in Abschnitt 3.2.6 enthalten.

Als ein Nachteil des Baustoffs Holz ist seine Brennbarkeit, die sich aus der chemischen Zusammensetzung (siehe Unterabschnitt 3.2.1) ergibt, zu nennen. Diese ist allerdings durch das gegebene, berechenbare Brandverhalten, welches in Unterabschnitt 3.2.4 genauer beschrieben wird, zu relativieren.

Für die Bemessung von Holzbauwerken im Brandfall ist DIN EN 1995-1-2 (Eurocode 5-1-2) [39] heranzuziehen, worauf in Unterabschnitt 3.1.5 bereits näher eingegangen wurde.

3.2.3 Verbrennung von Holz

Die Prozesse, die bei der Erhitzung und Verbrennung von Holz durchlaufen werden, wurden in der Vergangenheit vielfach untersucht. Arbeiten aus jüngerer Zeit [46, 54, 60–62] fassen die Erkenntnisse, die über das 20. Jahrhundert gesammelt wurden, zusammen. Nennenswert sind dazu beispielsweise die Arbeiten [53, 63–68], die mitunter von den zuvor genannten Arbeiten zitiert werden. Es zeigt sich, dass je nach Untersuchungsart, Holzart und anderen Einflüssen teils leicht abweichende Ergebnisse bzgl. der Temperaturspannen angegeben werden, die die Prozesskette beim Brennen von Holz beschreiben. Abbildung 3.12 stellt den Ablauf des Verbrennungsprozesses dar, wie er aus den genannten Quellen hervorgeht, vor allem angelehnt an die von [60] beschriebenen Phasen und die Darstellung von [62] sowie [61]. Die Kenntnis dieser Vorgänge in Holzbauteilen ist eine erforderliche Grundlage um die Prozesse verstehen und verknüpfen zu können, die Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität oder die Rohdichte von Holz unter Brandbeanspruchung beeinflussen. Auf die Temperatur, ab der Holzkohle gebildet wird, wird in einem folgenden Abschnitt genauer eingegangen, da diese besondere Relevanz für weitere Untersuchungen in dieser Arbeit hat. Bei längeren Beanspruchungen mit niedrigeren Temperaturen kann es ebenfalls zur Verkohlung und Entzündung von Holz kommen, siehe dazu Abb. 3.13. Für den Brandfall ist diese Art der Beanspruchung jedoch weniger von Relevanz. Dennoch sollte dies bei der Planung von Gebäuden in Holzbauweise für spezielle Anwendungen oder auch zur Festlegung von Abständen von Holzbauteilen zu heißen Oberflächen in Betracht gezogen werden.

3 Grundlagen zum Holzbau und Baustoff Holz

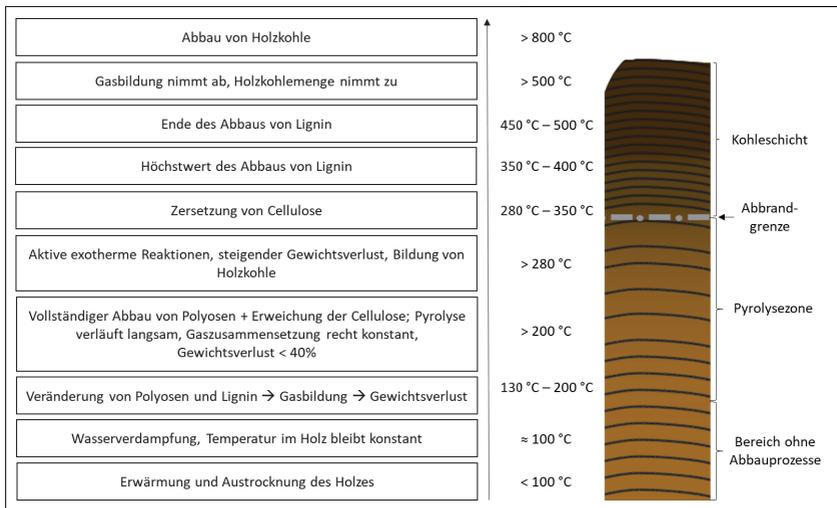


Abb. 3.12: Prozesse im Holz in Abhängigkeit der Temperatur, [60–62]

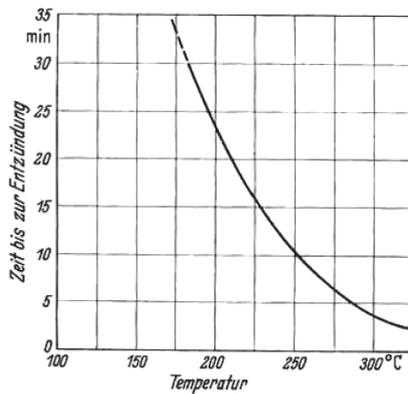


Abb. 3.13: Zeit bis zur Entzündung von Holz in Abhängigkeit der Temperatur, entnommen aus [69], Primärquelle [70]

3.2.4 Einflussfaktoren auf die Abbrandrate

Für die Bemessung von Holzbauteilen (siehe Unterabschnitt 3.1.5) ist die Abbrandrate ein essenzieller Parameter. Zwischen Vollholz und Holzwerkstoffen können sich deutliche Unterschiede in der Abbrandrate ergeben. Ebenfalls hat die Holzart einen markanten Einfluss. Die Abbrandrate ist in dieser Arbeit relevant zur Dimensionierung von Querschnitten und ein wichtiger Einflussfaktor hinsichtlich der Versagensmechanismen von Leitungsabschottungen, die in Holzbauteilen angewendet werden. Aus diesem Grund werden holzspezifische und versuchsspezifische Faktoren beschrieben, die die Abbrandrate beeinflussen. Die im Eurocode 5 angegebenen Werte zu Abbrandraten sind Bemessungswerte. Die mit diesen Werten durchgeführten Berechnungen sind auf der sicheren Seite liegend.

Nach Aussage von [64] und [71] brennt Holz im Allgemeinen, unter Normbrandbeanspruchung (ETK), über die Zeit mit einer konstanten Abbrandrate. Für längere Branddauern, ohne weitere Einflussfaktoren ist diese Aussage sicher zutreffend. Kommt es jedoch beispielsweise zum Abfallen der schützenden Kohleschicht, brennt das darunterliegende Holz mit einer erhöhten Abbrandrate ab, bis erneut eine ausreichend dicke schützende Holzkohleschicht aufgebaut ist. Auch im Eurocode 5 werden diese Annahmen zur Dimensionierung von Holzbauteilen im Brandfall zugrunde gelegt (siehe dazu Unterabschnitt 3.1.5). Zudem kann nach Eurocode 5 die Abbrandrate in Abhängigkeit der Dichte von Holz und Holzwerkstoffen bestimmt werden.

In den Arbeiten verschiedener Autoren finden sich zur Abhängigkeit der Abbrandrate von der Dichte teils widersprüchliche Aussagen [72]. Lache [64] zufolge hat die Dichte des Holzes zwischen unterschiedlichen Holzarten keine Aussagekraft bzgl. der Abbrandgeschwindigkeit, da die Holzart aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen einen deutlich größeren Einfluss auf diese hat (siehe Unterabschnitt 3.2.1, vgl. auch [54]). In Versuchen [64] wies Buchenholz mit höherer Dichte ($700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) eine größere Abbrandrate auf als Fichte mit einer niedrigeren Dichte von $433 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Bei Kiefernholz aus Kern und Splint mit gleicher Rohdichte, konnte ein Unterschied von 17% in der Abbrandrate festgestellt werden. Für die Holzart Eiche konnte Lache [64] eine Verringerung der Abbrandrate mit steigender Rohdichte feststellen. Mit Bezug auf seine unterschiedlichen Ergebnisse aus seinen Untersuchungen an Fichten- und Kiefernholz sowie Buchen- und Eichenholz, hält Lache eine allgemeine Kategorisierung in Laub- und Nadelholz in Bezug auf die Abbrandgeschwindigkeit für nicht sinnvoll. Gilka-Bötzwow, Heiduschke und Haller [73] unterstützten zum einen die Aussage, dass innerhalb derselben Holzart ein Zusammenhang der Dichte mit der Abbrandrate festgestellt werden kann, erweitern diese Aussage allerdings auch über Holzarten hinweg mit Verweis auf Untersuchungen unterschiedlicher Autoren, die Abbrandraten verschiedener Holzarten mit unterschiedlichen Rohdichten untersuchten. Dies ist in Anbetracht der Ergebnisse anderer Autoren (s. o.) kritisch zu beurteilen.

In [72] konnte bei der Untersuchung von Holz und Holzwerkstoffen bzgl. ihrer Abbrandrate eine verringerte Abbrandrate bei höher werdender Dichte für Flachpressplatten (Holzwerkstoffplatten), jedoch nicht für Vollhölzer festgestellt werden. Durch einen Vergleich seiner eigenen Ergebnisse mit denen aus [64] kommt er weiterhin zur Folgerung, dass die Spangröße von Holzwerkstoffen keinen Einfluss auf die Abbrandrate hat. Dagegen fand [62] heraus, dass Spanplatten sich im Brandfall besser verhalten als OSB-Platten, da es bei OSB-Platten eher zum Abfallen einzelner Kohlestücke kommt. Die Folge ist eine leicht höhere Abbrandrate von OSB-Platten. Warum es zum beschriebenen Abfallen der Kohle bei OSB-Platten kommt, wurde nicht untersucht bzw. beschrieben. Unterschiedliche Bindemittel können das Brandverhalten beeinflussen. Collier [74] untersuchte Vollholz und Leimholz und stellte keinen signifikanten Unterschied bei der Abbrandrate senkrecht sowie parallel zu den Leimfugen fest. Unterschiede ergeben sich teils durch erhöhten Abbrand an den Leimfugen. Die Effekte durch erhöhten Abbrand um Astlöcher werden bei Leimholz im Vergleich zu Vollholz durch Vorsortierung minimiert. Zwischen den einzelnen Lamellen konnten Unterschiede beim Abbrand festgestellt werden, eventuell aufgrund der unterschiedlichen Dichte (Kernholz/Splintholz).

Bei horizontal angeordneten Bauteilen aus Brettsper Holz wurde in verschiedenen Versuchen [75–79] die Delamination einzelner verkohlter Schichten beobachtet [80]. Zum Abfallen kommt es, wenn die kritische Temperatur für die Wirksamkeit des Klebstoffs erreicht wird. Nach [81] ist dies der Fall, wenn die Temperatur in der Klebefuge ca. 220 Grad erreicht, was nach [82] ca. 7 mm hinter der Abbrandgrenze (angenommen bei 300 °C) der Fall ist. Nach Aussage von [75] tritt das Abfallen der Kohleschicht dagegen auf, wenn die Lamellen komplett verkohlt sind, also die Abbrandgrenze die Klebefuge erreicht, was einer Temperatur von 300 °C zur Delamination entspricht. Das Abfallen wurde vor allem bei mit 1K-Polyurethan (PUR) Klebstoff verklebten Elementen beobachtet [75–78, 83–85]. Bei Verwendung von Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) Klebstoff ist das Abfallen verkohlter Schichten nicht dokumentiert [75, 80]. In [86] wird allerdings beschrieben, dass ebenfalls in Versuchen mit PUR kein Abfallen von Schichten beobachtet wurde, woraus sich schließen lässt, dass nicht Anhand der Art des Klebstoffs beurteilt werden kann, ob es zu einer Delamination einzelner Schichten im Brandfall kommt. Bei vertikal angeordneten Bauteilen ist der Effekt abfallender Kohleschichten generell seltener bis gar nicht zu beobachten [76, 79, 80]. Fallen Stücke der Kohleschicht ab, tritt in diesen Bereichen anschließend ein erhöhter Abbrand auf. Dieser muss berücksichtigt werden, bis die neu entstehende Kohleschicht eine Dicke von 25 mm erreicht hat [75]. Grund für den erhöhten Abbrand nach dem Abfallen ist die fehlende wärmedämmende Kohleschicht und die zu diesen Zeitpunkt bereits erhöhte Ofenraumtemperatur, die auf das freiverdende, unbeanspruchte Holz einwirkt. Für kurze Branddauern (< 30 min) ist das Abfallen der Schichten weniger relevant, da in dieser Zeit nur die erste Lamellenlage verkohlt und es somit nicht zur Delamination kommt. Brettsper Holz-Bauteile mit dickeren Einzelschichten verhalten sich im Brandfall besser, da es seltener zum Abfallen einzelner Schichten und somit auch seltener zur Erhöhung der Abbrandrate unterhalb der delaminierten Schicht kommt [75]. Kommt es im Brandverlauf nicht zum Abfallen verkohlter Schichten, kann die Abbrandrate von Brettsper Holz entsprechend der von Vollholz angenommen werden [75]. Zusammenfassend hat auf das Abfallen verkohlter Schichten, abgesehen von holzspezifischen Eigenschaften, die Bauteilorientierung, der Klebstoff sowie die Lamellendicke einen signifikanten Einfluss.

Neben der Art des Holzes bzw. der Holzwerkstoffe hat die Feuchte einen Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit [64]. Dieser wird allerdings als gering beschrieben. Bei Holzfeuchten von 8 % und 20 % Prozent wurde eine ca. 10 % abweichende Abbrandrate festgestellt. Die Größenordnung wird von Untersuchungen durch Werther [46] bestätigt, der den Zusammenhang der Änderung der Abbrandrate proportional um 1 % je 1 % Feuchtegehalt beziffert. Da sich Änderungen der Holzfeuchte bei gewöhnlicher Nutzung eines Gebäudes im Normalfall im Bereich zwischen mindestens 5 % im Winter und maximal 14 % bis 15 % im Sommer [58, 87] bewegen, beeinflusst dies die Abbrandrate im Normalfall lediglich im einstelligen Prozentbereich, was im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren vernachlässigbar ist.

Weiterhin nimmt die Charakteristik der Brandbeanspruchung Einfluss auf die Abbrandrate. Bei konstanter Temperaturbeanspruchung verändert sich die Abbrandrate im Brandverlauf. Die Bildung einer dicker werdenden Kohleschicht schützt das darunterliegende Holz zunehmend vor der Temperatur, der Abbrand verlangsamt sich [88, 89]. Der Aufbau und die Dicke der Kohleschicht wird durch die chemische Zusammensetzung des Holzes, vor allem dem Ligningehalt beeinflusst [90]. Durch die Bildung von Rissen und den Abbau der Kohleschicht wird deren Schutzwirkung eingeschränkt [90]. Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen (z. B. [71, 72, 88, 91]) zeigen, dass bei Normbrandbeanspruchung, die einen Anstieg der Brandraumtemperatur beinhaltet, sich die Effekte der schützenden Kohleschicht und der Temperaturerhöhung nahezu ausgleichen, sodass eine tendenziell konstante Abbrandrate die Folge ist. König und Walleij [91] geben mit Verweis auf [92] an, dass bei ca. 1000 °C die Kohleschicht in gleicher Geschwindigkeit abgebaut wird, wie neue Kohle entsteht. Nach [61] ist dies erst bei einer Temperatur von 1100 °C der Fall. Diese Erkenntnisse führen dazu, dass Abbrandraten für übliche Branddauern als über die Zeit konstante Werte angegeben werden, sowie zu der Möglichkeit, die Abbrandrate am

Ende eines Versuchs zu bestimmen. Bei der Beanspruchung nach ETK werden erst nach mehr als 90 Minuten Temperaturen von über 1000°C erreicht. Numerische Simulationen von [46], mit Eingangsdaten entsprechend denen des Eurocode 5, zeigen, dass bei einer Beanspruchung mit ETK die Abbrandrate zunächst mit der steigenden Temperatur zunimmt und anschließend von der 20. bis zur 90. Minute kontinuierlich leicht abnimmt. Dies bestätigt den Aufbau der Kohleschicht in dieser Zeitspanne. Die Veränderungen in der Abbrandrate unterscheiden sich je nach Rohdichte. Bei kleineren Rohdichten ergeben sich größere zeitabhängige Änderungen der Abbrandrate, beispielsweise von max. 0,1 mm über 70 min bei einer Rohdichte von $350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Auch der Sauerstoffgehalt im Brandraum beeinflusst die Abbrandrate stark. Wird der Sauerstoffgehalt von 21 % auf 10,5 % reduziert, wurde in Brandversuchen ein um 20 % geringerer Masseverlust festgestellt. Wird der Sauerstoffgehalt auf 0 % reduziert, ändert sich die Abbrandrate um 35 % bis 50 % [71]. In Normanbrandversuchen mit Holzbauteilen sinkt der Sauerstoffgehalt im Brandraum auf ca 8 % bis 10 %, wenn die Holzbauteile entzündet wurden [71].

Zur Messung der Abbrandrate werden in [64] zwei unterschiedliche Messmethoden beschrieben. Erstens die einmalige Messung des verbleibenden Restquerschnitts am Versuchsende, nachdem die Probe schnellstmöglich abgelöscht und die Kohleschicht abgetragen wurde. Zweitens eine kontinuierliche Messung während des Versuchs, die ursprünglich von [93] angewandt wurde. Mittels Messfühlern, die sich mit definiertem Druck durch die weniger dichte Kohleschicht bohren, wird der Abstand der Abbrandgrenze zur ursprünglichen Probenoberfläche gemessen. Im Ergebnis führt die Methode der kontinuierlichen Messung zu geringfügig höheren Werten als die einmalige Messung am Versuchsende. Diese Differenz ist methodenbedingt und auf das Einbrennen der Messnadeln zurückzuführen. Bei Hölzern mit geringer Rohdichte fällt der Effekt größer aus als bei harten Hölzern.

Gilka-Bötzow et al. [73] und Lingens [54] fassen in ihren Arbeiten recherchierte Werte zur Abbrandraten verschiedener Holzarten zusammen. Für die als Bauholz in der Regel zur Anwendung kommende Fichte werden Werte in einer Spanne von $0,5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bis $1,02 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bei Holzfeuchten von 8 % bis 20 % angegeben, wobei sich der Großteil der Werte zwischen $0,5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ und $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bewegt. Die im Eurocode 5 [39] angegebenen Werte liegen in einem ähnlichen Bereich (siehe Unterabschnitt 3.1.5).

In diesem Abschnitt wurde aufgezeigt, dass die Abbrandrate von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Werden Abschottungen in Holzbauteile eingebaut, beeinflusst die Abbrandrate unter Umständen deren Funktion im Bauteil maßgeblich. Die Abbrandrate von Holzwerkstoffen stellt sich aufgrund homogenerer Eigenschaften berechenbarer dar, was im Hinblick auf den Einbau von Abschottungen vorteilhaft ist. Allerdings müssen werkstoffspezifische Eigenschaften beim Abbrand, wie die mögliche Delamination einzelner Schichten bei Brettsperholz, in Betracht gezogen werden.

3.2.5 Temperatur an der Abbrandgrenze

Unter Abbrandgrenze wird der Bereich verstanden, der durch die voranschreitende Pyrolyse des Holzes zwar schon braun verfärbt ist, aber noch nicht in Kohle umgewandelt ist. Dies wird in Abb. 3.14 veranschaulicht. Die Temperatur an der Abbrandgrenze wird beispielsweise dann relevant, wenn die Tiefe des Abbrandes anhand der im Bauteil herrschenden Temperatur berechnet werden soll. Dies ist beispielsweise bei thermischen Simulationen der Fall. Unterschiedliche Autoren haben in der Vergangenheit die Temperatur an der Abbrandgrenze bestimmt bzw. begründet angenommen und kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Tabelle 3.1 fasst Werte, die für die Temperatur an der Abbrandgrenze von unterschiedlichen Autoren angegeben wurden, zusammen. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll vielmehr das Spektrum der Werte veranschaulichen. Zusage [60, 71, 94] liegt im Bereich der Abbrandgrenze ein steiler Temperaturgradient vor. Bei Messungenauigkeiten von 1 mm konnten bereits Temperaturänderungen von ca. 50 °C festgestellt werden. Mikkola [95] stellt fest, dass bereits 15 mm

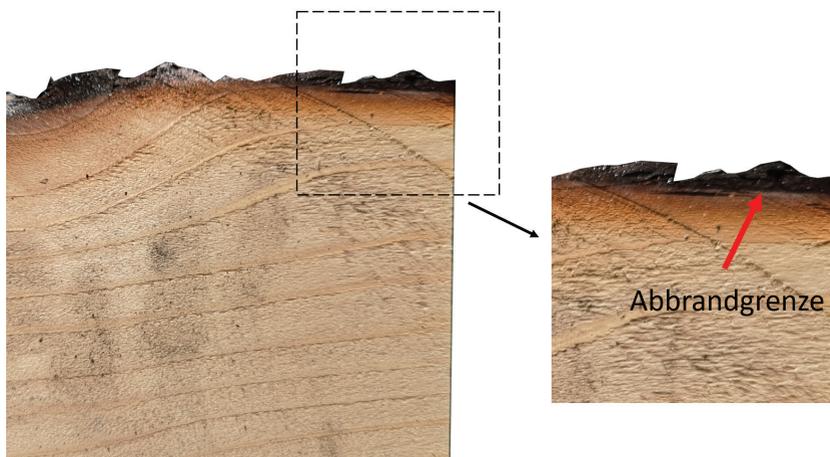


Abb. 3.14: Darstellung der Abbrandgrenze

Tab. 3.1: Temperatur an der Abbrandgrenze

Temperatur an der Abbrandgrenze	Autor	Quelle
288 °C	Schaffer, E. L.	[88]
280 °C bis 350 °C gemessen, 300 °C festgelegt	Tran, Hao C. und White, Robert H.	[94]
360 °C	Mikkola, E.	[95]
200 °C	Dorn, H. und Egner, K.	[96]
200 °C bis 300 °C	Frangi, A.	[60]
300 °C ± (1 % - 15 %)	Collier, P. C. R.	[74]
300 °C	Eurocode 5-1-2	[39]

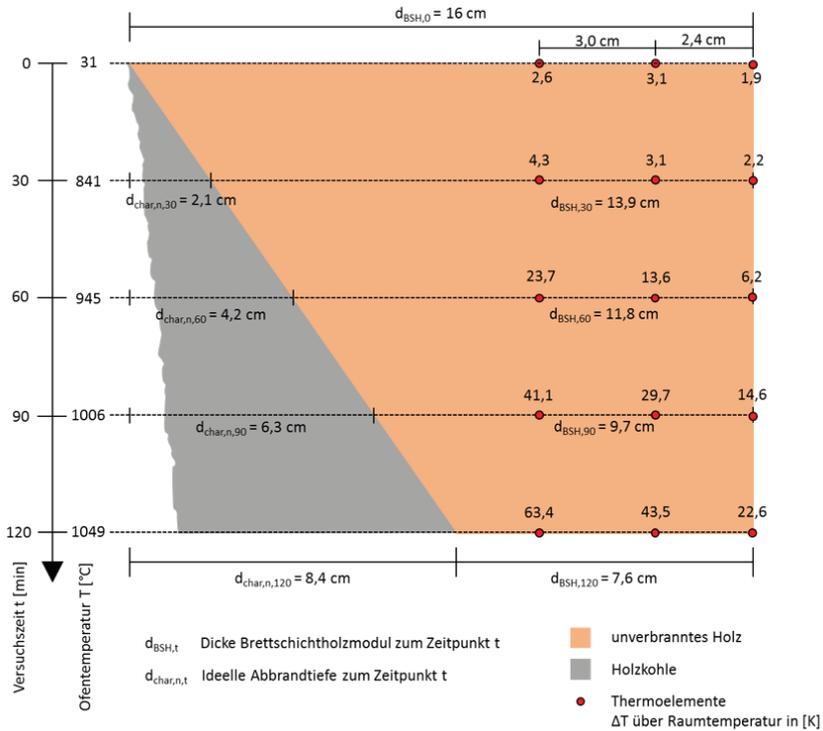


Abb. 3.15: Temperaturen im Holz bei Brandbeanspruchung (ETK) eines 160 mm dicken Vollholzquerschnitts (Brettschichtholz) über 120 Minuten [98, 99]

hinter der Abbrandgrenze die Temperatur auf unter 100 °C abgefallen ist. Dorn [96] gibt diese Temperatur sogar bereits 10 mm hinter der Abbrandgrenze an, wobei dieser von einer geringeren Temperatur an der Abbrandgrenze ausgeht. Nach [97] ist 40 mm bzw. nach [71] 40 mm bis 50 mm hinter der Abbrandgrenze wieder die Ausgangstemperatur festzustellen. Eigene Messungen an Holzprobekörpern ergaben die in Abb. 3.15 dargestellten Messwerte. Neuere Untersuchungen [86, 97, 100] bestätigen die Fehleranfälligkeit bei der Messung der Temperaturen in Holz aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Holzes und geben mögliche Messfehler von mehreren hundert Kelvin bzw. große Abweichungen bei der Bestimmung der Abbrandgrenze an. Die Art der Thermoelemente und die darin verwendeten Materialien, deren Anordnung und die Art der Montage spielen dabei eine große Rolle. Diese Messwerte und Untersuchungen erklären zum einen die relativ weit streuenden Angaben der unterschiedlichen Autoren in der Vergangenheit bzgl. der Temperatur an der Abbrandgrenze, zum anderen kann geschlossen werden, dass auch bei einem Fehler bei der Annahme der Temperatur an der Abbrandgrenze, sich im Ergebnis die Lage der Abbrandgrenze nur geringfügig ändert. Um verlässliche Messwerte für Temperaturen innerhalb des Holzes zu erhalten, sollten [97, 100] zufolge Thermodrähte bei der Herstellung der Holzprobekörper in Leimfugen eingelegt werden und die Leitungen für mindestens 50 mm parallel zu den Isothermen geführt werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Autoren [86, 97,

100] die Temperatur an der Abbrandgrenze bei ca. 300 °C annehmen und dieser Wert zudem mit dem angenommenen Wert des Eurocodes 5 übereinstimmt, wird dieser Temperaturwert auch für diese Arbeit zu Grunde gelegt. Nach Werther [46] beeinflusst das Beanspruchungsniveau die Temperaturentwicklung im Inneren von Holzbauteilen. Dabei korrelieren Abbrandtiefe und Abbrandrate mit dem Beanspruchungsniveau in der Aufheizphase. Hohe Beanspruchungsniveaus haben einen großen Temperaturgradienten im Bereich der Abbrandgrenze zur Folge. Die Temperaturen sinken vergleichsweise schnell ab und weniger Material wird thermisch beeinflusst. Bei geringeren Beanspruchungsniveaus treten diese Erscheinungen gegenläufig auf. Eine schnelle Abkühlphase führt, wie zu erwarten, zu kleineren thermisch beeinflussten Bereichen im Material als eine langsame. Die Temperatur an der Abbrandgrenze bleibt auch in diesen Fällen gleich und kann mit 300 °C angenommen werden.

3.2.6 Thermische Eigenschaften von Holz

Um Wärmetransportvorgänge innerhalb eines Bauteils berechnen zu können, sind Angaben zu materialspezifischen Parametern in Abhängigkeit der Temperatur relevant. Im Folgenden wird die Veränderung der Parameter Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben. Die betrachtete Temperaturspanne bezieht sich auf den Brandfall. Auch werden an dieser Stelle die Werte für die Parameter vorgestellt, bewertet bzw. deren Herkunft beschrieben, die in Eurocode 5 [39] gegeben werden und die für die Berechnungen in dieser Arbeit verwendet werden. Bei den Wertvorgaben des Eurocodes handelt es sich weniger um realistische als vielmehr um effektive Werte, die Massetransportprozesse berücksichtigen und daher nur für Normbrandbeanspruchung angewendet werden sollten [101]. Die Werte sind also bereits dahingehend abgeändert, dass sie Vorgänge, die in einer thermischen Simulation nicht beachtet werden, implizit berücksichtigen.

Rohdichte von Holz in Abhängigkeit der Temperatur

Die Rohdichte ρ eines Stoffes gibt dessen Masse m (in kg) bezogen auf sein Volumen V (in m^3) an.

Die exotherme chemische Reaktion, die von Holz beim Brennen durchlaufen wird, setzt Wärme sowie flüchtige und nicht-flüchtige Bestandteile frei. Dies führt zu einem Masseverlust während des Zersetzungsprozesses, bei dem zunächst Holz in Kohle umgewandelt wird [102]. Bis zu einer Temperatur von 200 °C ist, in einer für Brände relevanten Zeitdauer, nur ein geringer Masseverlust bei Holz festzustellen [103]. Nach [104] fällt die Dichte von Holz bei einer Temperatur von 200 °C auf ca. 90 % der Ausgangsdichte ab. Wasser verdampft zwar in dieser Temperaturspanne, verflüchtigt sich aber zunächst nicht vollständig, sondern bewegt sich innerhalb des Bauteils in tiefere Schichten und kondensiert dort in Bauteilebenen in denen niedrigere Temperaturen herrschen [105]. Bei 200 °C beginnt der Abbau der Hemicellulosen. Zwischen 200 °C und 240 °C erweicht die Cellulose. Cellulose und Hemicellulosen verfärben sich dunkel. Ab 280 °C beginnt ein rapider Gewichtsverlust [106]. Bei einer Temperatur von 350 °C beträgt die Dichte nur noch ca. 20 % des Ausgangswertes [104]. Bei Temperaturen über 450 – 500 °C glüht und oxidiert die Kohle und verliert weiter an Masse [61]. König [91] nimmt für die Wärmekapazität der Holzkohle eine lineare Abnahme von 800 °C bis 1200 °C an, was auf den Abbau der Kohleschicht und somit den Rückgang der Dichte auf den Wert $0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ in dieser Temperaturspanne zurückzuführen ist.

Die Arbeiten verschiedener Autoren [60, 91, 104, 107–110] stellen unterschiedliche Verläufe der Dichte über die Zeit im Verbrennungsprozess dar. Dabei sind deutliche Gemeinsamkeiten in den Modellen der Arbeiten zu erkennen. Zu Beginn lässt sich zumeist eine erste Abnahme der Dichte im Bereich bis 200 °C erkennen, die mit der chemischen Veränderung der Polyosen und des Lignins zu begründen ist. Die deutlichste Abnahme der Rohdichte folgt im Bereich von 200 °C bis 400 °C, in dem Kohle gebildet sowie Cellulose und Lignin abgebaut wird. Anschließend wird

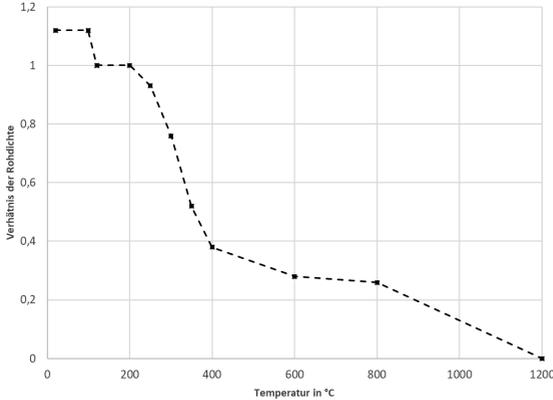


Abb. 3.16: Temperaturabhängige Rohdichte von Holz nach Eurocode 5 [39]

Tab. 3.2: Rohdichte von Holz nach EC 5 [39]

Temperatur in °C	Dichteverhältnis Rohdichte zur Darrrohldichte
20	1+ ω_1
99	1+ ω
99	1+ ω
120	1+ 1,00
120	1+ 1,00
200	1+ 1,00
250	1+ 0,93
300	1+ 0,76
350	1+ 0,52
400	1+ 0,38
600	1+ 0,28
800	1+ 0,26
1200	1+ 0

¹⁾ ω = Feuchtegehalt, hier 12 %

entweder eine konstant bleibende Dichte der Kohleschicht angenommen oder es wird ein Abbau der Kohleschicht durch eine weitere Verminderung der Dichte bis hin zu $0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bei 1200°C angenommen. Der Eurocode beschreibt die Dichteentwicklung mit Hinblick auf die stattfindenden Prozesse beim Verbrennungsprozess (vgl. Unterabschnitt 3.2.3) im Vergleich zu den anderen Ansätzen nach Meinung des Autors am nachvollziehbarsten (siehe Abb. 3.16). Diese Werte wurden [101] zufolge aus [109] weitestgehend übernommen, allerdings im Bereich 800°C bis 1200°C angepasst, um den Abbau der Kohleschicht abzubilden.

Wärmeleitfähigkeit von Holz in Abhängigkeit der Temperatur

Die Wärmeleitfähigkeit (auch Wärmeleitzahl) λ eines Materials beschreibt die Wärmemenge, die bei einem Temperaturunterschied von einem Kelvin während einer Sekunde durch eine 1 m^2 große Materialschicht mit der Dicke 1 m zwischen den Schichtoberflächen hindurchgeht.

Die Wärmeleitfähigkeit von Holz steigt mit zunehmender Dichte und Temperatur sowie zunehmendem Feuchtegehalt an [111]. Weitere Einflussfaktoren können die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls beeinflussen. Weiterhin ist Holz ein anisotropes Material, weshalb sich die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zu den Fasern und in Faserrichtung unterscheidet [112]. Um die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte und dem Feuchtegehalt zu beschreiben, liegen ausreichend viele Messergebnisse vor. Die Datengrundlage der Beschreibung des Verhältnisses von Wärmeleitfähigkeit zur Temperatur ist dagegen für größere Temperaturbereiche nicht ausreichend [112]. Der Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit wird mit 10 % pro 50 K als recht klein beschrieben [112]. Im Brandfall ist dieser Einfluss aufgrund der starken Temperaturerhöhungen jedoch als relevant anzusehen. Die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit parallel zur Faser in Bezug zur Wärmeleitfähigkeit in radialer oder tangentialer Richtung werden von [111] mit einem Faktor von ca. 1,8 quantifiziert. Spearpoint [113] gibt hinsichtlich der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Faser Faktoren unterschiedlicher Autoren z. B. [105][114] im Bereich von 1,75 bis 2,8 an, wobei schlussendlich der Wert 2,1 verwendet wird. Für die Baupraxis ist in erster Linie die Wärmeleitung quer zur Faser relevant [112]. Aus diesem Grund wird dieser Einfluss im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet und Werte für die Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser verwendet. Auch in radialer oder tangentialer Richtung unterscheidet sich die Wärmeleitfähigkeit des Holzes. Diese Unterschiede

fallen jedoch deutlich geringer aus und liegen im Bereich von 5 bis 10 Prozent [115]. In der Baupraxis wird nicht zwischen radialer und tangentialer Ausrichtung unterschieden, weshalb eine Differenzierung für praktische Anwendungen nicht zweckmäßig ist [46]. In [116] wurde die Wärmeleitfähigkeit von Fichtenholz im Temperaturbereich von 20 °C bis 160 °C gemessen. Die Messergebnisse passen gut zu den im Eurocode 5 angegebenen Werten in diesem Temperaturbereich. Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit von [117] an darrtrockenem Holz zeigten einen linearen Zusammenhang. Zusätzlich stellte er bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes eine weitere Steigerung der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Holzfeuchte fest. Auf Grundlage einer Reihe von experimentellen Untersuchungen ermittelte MacLean [118] folgende Gleichung 3.5, die die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Holz von der Rohdichte und der Holzfeuchte beschreibt und für Rohdichten von 300 bis 800 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und Feuchtegehalte bis 40 % gilt.

$$\lambda_0 = 0,0237 + (2 + 0,04 \cdot w) \cdot r_0 \cdot 10^{-4}, \quad (3.5)$$

wobei

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \text{Wärmeleitfähigkeit von Holz quer zur Faser bei Raumtemperatur in } \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\ r_0 &= \text{Darrdichte in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ w &= \text{Holzfeuchte in } \% \end{aligned}$$

Frangi [60] kombinierte in seiner Arbeit die von [68] angegebenen Gleichungen zur Beschreibung des Einflusses der Rohdichte bzw. der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit zu Gleichung 3.6, woraus der von MacLean beschriebene Zusammenhang ebenfalls deutlich wird. Die Gleichung gilt für Holzfeuchtegehalte unterhalb von 40 % und für alle praktisch vorkommenden Rohdichten.

$$\lambda_0 = 0,0256 + (1,66 + 0,024 \cdot w) \cdot r_w \cdot 10^{-4}, \quad (3.6)$$

wobei

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \text{Wärmeleitfähigkeit von Holz quer zur Faser bei Raumtemperatur in } \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\ r_w &= \text{Feuchtdichte in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ w &= \text{Holzfeuchte in } \% \end{aligned}$$

Kollmann [68] beschreibt den Zusammenhang der Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit der Temperatur mit Gleichung 3.7 (auch übernommen in [119]), die sich ebenfalls auf die Gleichung von MacLean bezieht.

$$\lambda_{\text{Holz}(\Theta)} = \lambda_0 \left(1 + (1,1 - 9,8 \cdot 10^{-4} \cdot r_0) \cdot \frac{\Theta - 20}{100} \right), \quad (3.7)$$

wobei

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \text{Wärmeleitfähigkeit von Holz gemäß Gleichung 3.5 in } \frac{\text{W}}{\text{m K}} \\ r_0 &= \text{Darrdichte in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \Theta &= \text{Temperatur in } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

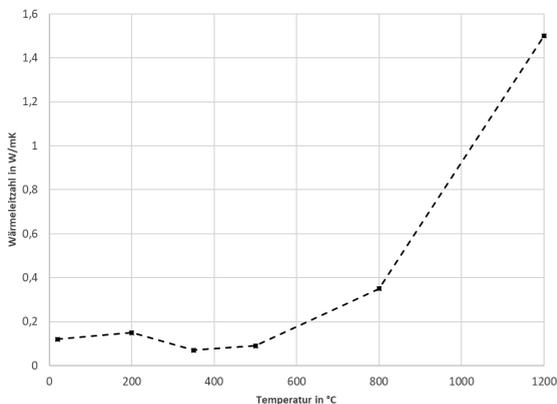
Die Wärmeleitfähigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur wurde von verschiedenen Autoren z. B. [57, 117, 120] untersucht. Ein klar übereinstimmendes Ergebnis bzgl. des Zusam-

menhangs ist dabei nicht festzustellen. Dies kann auf die unterschiedlichen Eingangsparameter sowie die unterschiedlichen Messmethoden zurückgeführt werden. Jedoch legen die Autoren alle einen linearen Zusammenhang der Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit der Temperatur zugrunde.

Um Temperaturen in Bauteilquerschnitten im Brandfall berechnen zu können, sind Angaben zur Wärmeleitfähigkeit im entsprechenden Temperaturbereich notwendig. Verschiedene Autoren (z. B. [91, 105, 121]) geben Werte für die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 0 °C bis ca. 1000 °C an. Naser [122], Werther [46] sowie Schleifer [62] geben einen Überblick über bisher publizierte Ansätze. Als Gemeinsamkeit ist beim Großteil der Temperaturverläufe festzustellen, dass im Bereich bis 100 °C bzw. 200 °C eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit angenommen bzw. gemessen wurde. Fällt die Wärmeleitfähigkeit im Modell bereits bei 100 °C ab, wird bei dieser Temperatur die Verdampfung des im Holz enthaltenen Wassers angenommen, was zum abfallen der Wärmeleitfähigkeit führt. Wird von darrtrockenem Holz ausgegangen, findet dieser Prozess nicht statt und die Wärmeleitfähigkeit fällt erst mit Abbau der Holzbestandteile von 200 °C bis 300 °C bzw. 350 °C ab. Bei dieser Temperatur wird die Umwandlung des Holzes in Holzkohle als abgeschlossen angenommen. Danach steigt die Wärmeleitfähigkeit allmählich wieder mit zunehmender Temperatur an. Weitere deutlichere Anstiege der Wärmeleitfähigkeit sind anschließend erst wieder ab der Temperatur zu verzeichnen, ab der die Degradation der Kohleschicht angenommen wird und dies im jeweiligen Modell dargestellt wird. Dies ist beispielsweise beim Modell nach [91] der Fall, wobei ab einer Temperatur von 500 °C eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit beschrieben wird. Grund dafür ist die Annahme, dass ab dieser Temperatur nicht mehr die Wärmeleitfähigkeit von Kohle in Reinform zum Tragen kommt, sondern die Wärmeleitfähigkeit der Kohleschicht, die Risse beinhaltet. Der Beginn der Rissbildung wird mit Beginn des Glühens der Kohleschicht bei ca. 500 °C vermutet. Eine ähnliche Beschreibung des Verlaufs der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur ist in [123] zu finden.

Anhand der Informationen aus der Literatur ist eine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Holzes von der Rohdichte, der Feuchte, der Richtung zur Faser, der Holzart sowie der Temperatur eindeutig festzustellen. Aufgrund von Messungenauigkeiten bzw. unterschiedlichen Messverfahren, Streuungen im Material oder auch Anpassungen der Eingangsdaten an die jeweiligen Simulationsmodelle, unterscheiden sich die Angaben, vor allem im Bereichen höherer Temperaturen, zu Teil deutlich. Grundlegend kann jedoch der zuvor allgemein beschriebene Verlauf der Wärmeleitfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Temperatur als zutreffend angesehen werden, da er die Prozesse im Holzquerschnitt während des Brandverlaufs abbildet.

Die Angaben des Eurocode 5 [39], die in dieser Arbeit verwendet werden, spiegeln diese Ansätze ebenfalls wider (siehe Abb. 3.17). Die Werte ergeben sich aus der Kombination der Ansätze verschiedener Autoren für die unterschiedlichen Temperaturbereiche. Die im Eurocode gegebenen Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Holzkohleschicht weichen deutlich von gemessenen Werten ab, da sie modifiziert wurden, um Risse und den Abbau der Kohleschicht bei sehr hohen Temperaturen zu berücksichtigen.



Tab. 3.3: Wärmeleitfähigkeit von Holz nach EC 5 [39]

Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit in W/mK
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,5

Abb. 3.17: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Holz und Holzkohleschicht [39]

Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit der Temperatur

Die spezifische Wärmekapazität ist definiert als die Menge an Wärme, die benötigt wird, um die Temperatur eines Kilogramms eines Stoffes um ein Kelvin zu erhöhen.

Sie ist im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit auch bei erhöhten Temperaturen leicht messbar. Daher liegen für die Wärmekapazität von Holz verlässliche Daten vor [124]. Wandelt sich Holz zu Holzkohle, gelten andere Werte, wobei die Datenbasis dafür deutlich schlechter ist. Die Wärmekapazität des Holzes wird bei Erwärkung durch die Veränderung des Holzes und dabei stattfindende chemische Prozesse beeinflusst.

Mehaffey [125] verwendet für die spezifische Wärmekapazität von Holz bis zu einer Temperatur von 200°C den in Gleichung 3.8 beschriebenen Zusammenhang, wobei auf den damaligen Entwurf des Eurocodes 5 [119] verwiesen wird. Ursprünglich stammt die Gleichung von Koch [126], der sie aus Messungen im Bereich von 60°C bis 140°C ableitete.

$$C = 1110 + 4,2 \cdot T \text{ ,in } \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right], \text{ Temperatur in } [^{\circ}\text{C}] \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

Ähnliche Werte liefert die von Dunlap [127] aufgestellte Gleichung 3.10, die aus Messwerten im Temperaturbereich von 0°C bis 106°C entstand.

$$C = 1114 + 4,86 \cdot T \text{ ,in } \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right], \text{ Temperatur in } [^{\circ}\text{C}] \quad (3.10)$$

Kollmann [68] zufolge besteht eine signifikante Abhängigkeit der Wärmekapazität des Holzes von dessen Feuchtegehalt. Mit steigender Holzfeuchte nimmt die Wärmekapazität zu. Dies ist mit der höheren Wärmekapazität von Wasser ($4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ [128]) im Vergleich zu Holz zu begründen. Die Dichte des Holzes hat dagegen nahezu keine Auswirkungen auf die Wärmekapazität, da die Wärmekapazität der Zellwandstruktur und die von Luft in einem ähnlichen Wertebereich liegen. Um die Holzfeuchte bei der Wärmekapazität zu berücksichtigen, kann nach Kollmann

[68] eine einfache Mischungsregel (Gleichung 3.11) angenommen werden.

$$C_x = x \cdot C_w + (1 - x) \cdot C_0 \quad (3.11)$$

Durch Einsetzen von $x = u/(1 + u)$ leitet er folgende Abhängigkeit für die spezifische Wärme feuchten Holzes her.

$$C_u = \frac{u}{1 + u} \cdot C_w + \left(1 - \frac{u}{1 + u}\right) \cdot C_0 \quad (3.12)$$

Durch Berücksichtigung der zur Verdampfung von Wasser benötigten Energie lässt sich ein Spitzenwert der Wärmekapazität von Holz um 100 °C herleiten, dessen Höhe von der Menge des verdampfenden Wassers abhängt. Die spezifische Wärme des freien Wassers wird in [125] mit $4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$ angenommen. Die Energie dasselbe zu verdampfen wird mit $2,26 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ und die spezifische Wärme des Wasserdampfes wird mit $2100 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$ angegeben.

Nach [112] ist die spezifische Wärme von feuchtem Holz allerdings größer als durch die einfache Mischungsregel angenommen, weshalb in Gleichung 3.13 ein Korrekturterm eingeführt wurde, der die Bindungsenergie zwischen Wassermolekülen und den Holzzellen berücksichtigt. Die Formel wurde durch Regression verschiedener früherer Messungen verschiedener Autoren (unter anderem [127]) abgeleitet. Für Feuchtegehalte oberhalb des Fasersättigungspunktes kann mit der einfachen Mischungsregel verfahren werden. Die bereits genannte Energie zur Verdampfung des Wassers muss im entsprechenden Temperaturbereich zusätzlich beachtet werden. In [124] wurde Gleichung 3.13 auf heute gebräuchliche Einheiten umgerechnet.

$$C_u(T) = \frac{C_0(T) + 4187u}{1 + u} + \Delta_c(T, u) \quad (3.13)$$

$$C_0(T) = 1159 + 3,86T \quad (3.14)$$

$$\Delta_c(T, u) = (23,55T - 1326u + 2417)u, \quad (3.15)$$

wobei

$$C_u(T) = \text{spezifische Wärme von Holz mit Feuchtegehalt } u, \\ \text{(Anteil bezogen auf 1) bei der Temperatur } T, \text{ in } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\Delta_c(T, u) = \text{Korrekturterm, in } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

$$C_0(T) = \text{spezifische Wärme von darrtrockenem Holz} \\ \text{bei der Temperatur } T, \text{ in } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

Anzuwenden unterhalb des Fasersättigungspunktes (30 %) und im Temperaturbereich von 7 °C bis 147 °C

Über die Frage, ob die Pyrolysereaktion des Holzes als Werteschnittstelle zwischen der Wärmekapazität von Holz und Holzkohle, insgesamt als exothermer oder endothermer Prozess betrachtet werden kann, herrscht noch Uneinigkeit (z. B. [60, 125] endotherm ; [39, 91] exotherm). Resultierend wird in der Darstellung der Wärmekapazität des Holzes über der Temperatur in diesem Bereich entweder ein erneuter Anstieg verzeichnet oder die Modelle verbinden die Werte der Wärmekapazität von Holz und Holzkohle linear, um die benötigte Reaktionsenergie darzu-

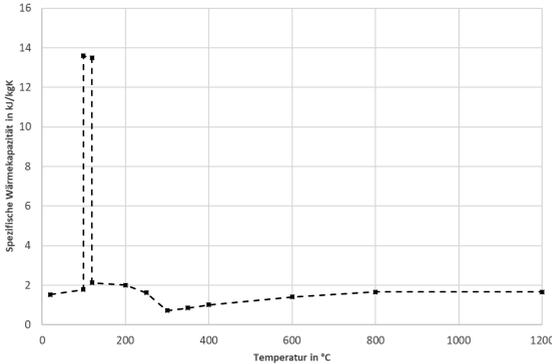


Abb. 3.18: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität für Holz und Holzkohle nach Eurocode 5 [39]

Tab. 3.4: Wärmekapazität von Holz nach EC 5 [39]

Temperatur in °C	Spezifische Wärmekapazität in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
20	1,53
99	1,77
99	13,6
120	13,5
120	2,12
200	2
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1
600	1,4
800	1,65
1200	1,65

stellen. Für weitere Informationen kann [124] herangezogen werden.

Für die Wärmekapazität der Holzkohle in Abhängigkeit der Temperatur liegen zum einen die bereits genannten Daten aus [129] vor, zum anderen ähnliche, leicht höhere Werte, die eine Formel in [124], ursprünglich von [130], vorgibt. Die Autoren [125] und [91] nehmen nach [123] für die Wärmeleitfähigkeit von Holzkohle einen konstanten Wert von $690 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$ an, wobei [91], wie weiter oben bereits erwähnt, von einem Abbau der Kohleschicht im Temperaturbereich von 800°C bis 1200°C ausgeht.

Der gesamte Verlauf der Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur wird in [123] wie folgt beschrieben: Bis zu einer Temperatur von 140°C kann für die spezifische Wärmekapazität von Holz eine lineare Abhängigkeit angegeben werden. Zusätzlich muss die spezifische Wärmekapazität des im Holz enthaltenen Wassers berücksichtigt werden. Zwischen $99,5\text{°C}$ und $104,4\text{°C}$ wird ein Spitzenwert der Wärmekapazität angenommen, um die Verdampfungsenthalpie des Wassers darzustellen. Anschließend wird bis zu einer Temperatur von 200°C erneut die lineare Funktion in Abhängigkeit der Wärme angenommen, allerdings ohne den Einfluss des Wassers. Für Kohle wird ab 350°C ein konstanter Wert von $690 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$ verwendet. Die Werte zwischen 200°C und 350°C ergeben sich durch eine lineare Verbindung [123]. Diese Beschreibung ist nach heutigem Kenntnisstand zwar nicht in allen Details passend, beinhaltet jedoch die wichtigsten Prinzipien.

Für die thermischen Eigenschaften Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit von Holz wurde bereits beschrieben, dass die Wertvorgaben des Eurocodes 5 Anwendung finden sollen. Da die Eingabeparameter in Wechselwirkung zueinander stehen, soll auch bei der Wärmekapazität von Holz auf diese Datenquelle zurückgegriffen werden (siehe Abb. 3.18). Der beschriebene Verlauf wird von den gegebenen Werten abgebildet. In den Arbeiten verschiedener Autoren wurden unterschiedliche Verläufe der Wärmekapazität von Holz im Brandfall erarbeitet, die vor allem während der Pyrolysephase und für den Temperaturbereich, in dem Holz bereits zu Kohle umgewandelt wurde, voneinander abweichen. In [62], [46] und [122] sind bisherige Ansätze zusammenfassend dargestellt. Einige dieser Ansätze bilden in Kombination die Grundlage für die Angaben des Eurocodes 5. Im Folgenden werden die im Eurocode 5 enthaltenen Werte und deren Herkunft erläutert sowie Abhängigkeiten und Ansätze zum Verlauf der Wärmekapazität betrachtet.

König [101] zufolge wurden die Angaben auf Grundlage der Ergebnisse aus [91] festgelegt. Die dortigen Ergebnisse beziehen sich im Bereich von 20 bis 200 Grad auf die Angaben von [125], der seine Annahmen aus dem damaligen Entwurf des Eurocodes und Daten aus [123] kombi-

nierte. Für die Wärmekapazität der Holzkohle wurden [101] und [60] zufolge Werte nach [129] verwendet. Diese sind auch im aktuellen Eurocode 5 zu finden. Beim Vergleich der Werte von [91] mit denen aus [129] fällt allerdings auf, dass diese im Bereich der Holzkohle abweichen. In [91] wird mit höher werdender Temperatur eine Abnahme der Wärmekapazität aufgrund des Abbaus der Kohleschicht zugrunde gelegt. Bei den im Eurocode verwendeten Werten spiegelt sich dieser Prozess nicht in der Wärmekapazität, sondern in der Abnahme der Dichte der Kohle in diesem Bereich wider.

Anhand der Messwerte und Herleitungen auf chemischer und physikalischer Grundlage lässt sich die Wärmekapazität von Holz und Holzkohle recht genau beschreiben. Für den Temperaturbereich, in dem Holz in Holzkohle umgewandelt wird, können sinnvolle Annahmen, auf Grundlage des jeweiligen Modells, getroffen werden.

3.3 Zwischenfazit

Die Holzbauweise ist sehr vielfältig hinsichtlich Konstruktionsweisen und Aufbauten von Bauteilen und darin verwendeten Holzwerkstoffen, was zu deutlichen Unterschieden beim Verhalten im Brandfall führt. Sollen Öffnungen für Leitungsabschottungen ausgebildet werden, ergeben sich je nach Aufbau des jeweiligen Bauteils unterschiedliche Möglichkeiten. Wichtig ist in allen Fällen, dass ein Einbrand in die Bauteilebene und damit die Entstehung möglicher Hohlraumbrände bei nicht-massiven Bauteilen verhindert wird. Um Holzbauteile für den Brandfall ausreichend standsicher zu gestalten, werden diese entweder überdimensioniert oder die Holzoberflächen werden mit Bekleidungen oder Beschichtungen vor der Beflammung geschützt. Im Brandfall entscheidet zum einen die thermische Beanspruchung, zum anderen Holzeigenschaften, wie die chemische Zusammensetzung, die Rohdichte und der Feuchtegehalt darüber, wie das Bauteil brennt.

Anhand der thermischen Eigenschaften des Holzes lässt sich berechnen, wie sich Wärme, die durch einen Brand an der Holzoberfläche entsteht, im Holzquerschnitt ausbreitet. Zur Eingabe in Simulationsmodelle müssen realistische Daten von thermischen Eigenschaften teilweise angepasst werden. Dies ist notwendig, um weitere Prozesse (z. B. Massetransport), die bei der Erwärmung im Holz stattfinden - in einer rein thermischen Simulation allerdings nicht berücksichtigt werden - abzubilden. Die Eingabeparameter beeinflussen sich gegenseitig und müssen aufeinander abgestimmt sein. Aus diesen Gründen liefern realistische Eingaben für einige Parameter bei FE-Simulationen teils schlechte Übereinstimmungen mit Versuchsergebnissen, wenn dabei weitere Mechanismen nicht berücksichtigt werden (siehe dazu Abschnitt 7.4.2).

4 Grundlagen zu Leitungsabschottungen

Ausgehend von grundlegenden Informationen zu Leitungsabschottungen sollen in diesem Kapitel der nationale und internationale Stand der Technik und Stand der Wissenschaft zu Leitungsabschottungen in Holzbauteilen dargestellt werden.

4.1 Grundlagen zu klassifizierten Leitungsabschottungen

Dieser Abschnitt liefert grundlegende Informationen zu Leitungsabschottungen. Die Wirkmechanismen von Leitungsabschottungen werden erklärt und typische Arten von Leitungsabschottungen werden vorgestellt. Weiterhin soll die Prüfung und Klassifizierung beschrieben werden, welche Grundlage für die Verwendung und Anwendung von Leitungsabschottungen in Gebäuden ist. Der Rauchdurchtritt durch Leitungsabschottungen wird aufgrund der derzeitigen Präsenz des Themas im Holzbau gesondert betrachtet.

4.1.1 Allgemeines

Leitungsabschottungen werden notwendig, sobald ein raumabschließendes Bauteil (z. B. Wand, Decke, Schacht), an das Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit gestellt werden, von Leitungen durchdrungen wird (siehe dazu Unterabschnitt 2.2.2). In Abhängigkeit der durchgeführten Leitungsart, deren Durchmesser und der Art des durchdrungenen Bauteils wird die Anwendung unterschiedlicher klassifizierter Abschottungen zwingend notwendig, wenn die Erleichterungen der Leitungsanlagenrichtlinie nicht angewendet werden können. Teils werden klassifizierte Abschottungen jedoch auch an Stellen verwendet, an denen die Erleichterungen der MLAR angewendet werden könnten. Dies ist mit dem meist deutlich geringeren Platzbedarf der geprüften Systeme zu begründen. Viele Abschottungen können innerhalb des Systems ohne Abstand zueinander (sogenannter 0-Abstand) eingesetzt werden. Durch die Platzersparnis können beispielsweise Schächte kleiner dimensioniert und es kann mehr Nutzfläche generiert werden.

Bei der Abschottung von Leitungen ergeben sich Schnittstellen zu anderen am Bau beteiligten Disziplinen. Bei der Verlegung von Leitungen durch Bauteile, oder auch in Bauteilen, sind beispielsweise auch schallschutztechnische Aspekte zu beachten. Die akustische Anregung der Bauteile durch die Leitungen ist einzuschränken, um Schallemissionen in Form von Körperschall zu vermeiden. Um die Leitungen schallschutztechnisch zu entkoppeln sind beispielsweise Umhüllungen der Leitungen innerhalb der Bauteile notwendig, die Einfluss auf die Wirksamkeit der Abschottungen haben können. Weiterhin müssen Abschottungen auch zum Zeitpunkt, zu dem kein Brandereignis stattfindet, dicht sein. Dies ist zum einen wichtig, um die Übertragung von Kaltrauch zu verhindern, zum anderen aber auch um die Übertragung von Luftschall über die Fehlstellen zu verhindern. Auch die Wärmedämmung an Leitungen, die aus Gründen der energetischen Optimierung oder Tauwasservermeidung angebracht wird, beeinflusst die notwendigen Funktionseigenschaften und damit die Wahl des Abschottungssystems. Entscheidend ist dabei vor allem das Brandverhalten der zur Dämmung der Leitungen verwendeten Baustoffe. Im Folgenden werden die Wirkungsweisen von klassifizierten Abschottungen allgemein beschrieben.

4.1.2 Wirkungsweise von Abschottungen

Je nachdem welche Leitungsart abgeschottet werden soll, müssen Abschottungen unterschiedliche Wirkungsweisen haben. Diesbezüglich sind Leitungen grundlegend zu unterscheiden in:

- Kabel,
- brennbare Rohre und
- nichtbrennbare Rohre,

wobei Rohrleitungen aus Aluminium und Glas in Bezug auf ihre Anforderungen bzgl. der Abschottung (Schmelzen/Zerbersten im Brandfall) eher den brennbaren Rohren zuzuordnen sind (vgl. Definition der MLAR). Bei der Durchführung brennbarer Rohre muss das Hauptaugenmerk darauf gelegt werden, die durch das Erweichen bzw. das Verbrennen des Rohres entstehende Öffnung mit Hilfe der Abschottung zu verschließen, um eine Brandweiterleitung zu verhindern. Weiterhin könnte, über das durch den Brand geöffnete Rohr, Rauch in das Rohrleitungssystem gelangen und an einer anderen offenen Stelle wieder austreten. Zur Auswahl der angepassten Abschottung bzw. der entsprechenden Prüfbedingungen ist zu unterscheiden, ob das Rohrsystem unter Druck steht, belüftet (Abwasserrohre) oder nicht belüftet ist (vgl. Anhang H DIN EN 1366-3 [5]). Dies kann großen Einfluss darauf haben, wie sich eingedrungene Brandgase verhalten bzw. wie die Abschottung beansprucht wird. Je nach Rohrwerkstoff und Rohrwandstärke können brennbare Rohre der Hitze/den Flammen des Brandes kürzere oder längere Zeit widerstehen. Bei der Brandbeanspruchung nach ETK im Prüffofen handelt es sich bei diesen Zeitspannen oft nur um wenige Minuten. Entsprechend schnell müssen die in den Abschottungen verwendeten Materialien auf die Hitze reagieren und die entstehende Öffnung verschließen. Nichtbrennbare Rohre (Definition MLAR) bleiben im Brandfall normalerweise intakt, wenn das System, welches diese stützt, nicht versagt. Die Schmelzpunkttemperatur hängt vom Rohrwerkstoff und eventuellen Zusätzen ab. Das Rohrleitungssystem bleibt somit verschlossen, Rauch und Brandgase können nicht eindringen. Für den Fall, dass die Rohrleitung nicht von brennbaren Baustoffen umgeben ist (z. B. brennbarer Wärmedämmung), ergeben sich auch im Bereich der Durchdringung keine Fehlstellen. In diesem Fall muss die Abschottung lediglich dafür sorgen, dass die Weiterleitung des Brandes auf die Kaltseite aufgrund der hohen Temperatur der Leitungsoberfläche verhindert wird. Dies kann durch Entziehen von Energie im Durchführungsbereich geschehen oder durch Anbringen einer Dämmung um die Rohrleitungen, die die Hitze nicht nach außen dringen lässt. Ist die Rohrleitung mit brennbaren Baustoffen gedämmt, können auch diese einer Brandbeanspruchung nicht widerstehen und es ergeben sich Fehlstellen im Durchführungsbereich. Es können sich hierbei deutliche Unterschiede in der Zeitspanne ergeben, die die Dämmstoffe der Brandbeanspruchung widerstehen. Teilweise werden den Dämmstoffen Zusatzstoffe beigemischt, die deren Brandverhalten und somit die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauart positiv beeinflussen. Eine Abschottung für eine nichtbrennbare Leitung mit brennbarer Dämmung muss, entsprechend derer für die Anwendung an brennbaren Rohren, die Bereiche um die Leitung verschließen und teilweise auch die Wärmeleitung entlang des Rohres eindämmen. Kabel verhalten sich als Leitungen in Durchführungen ähnlich zu nichtbrennbaren Rohren mit einer brennbaren Isolierung. Es kommt zu Wärmeleitung über die Kupferleiter innerhalb des Kabels sowie zu Fehlstellen im Durchführungsbereich infolge verbrennender Kabelisolierung. Durch die Kabel selbst können dabei allerdings nur sehr begrenzt heiße Gase und Rauch geleitet werden. Bei Kabelbündeln allerdings ergeben sich Kabelwickel, die vor allem bei der Verhinderung der Weiterleitung von kaltem Rauch berücksichtigt werden müssen. Viele Isoliermaterialien von Kabeln dehnen sich unter zunehmender Wärme aus, bevor der mit Masseverlust verbundene Zersetzungsprozess aufgrund der Temperaturerhöhung einsetzt. Auf diese Weise kommt es bei Kabeln in passgenauen Öffnungen zu Beginn der Brandbeanspruchung zu einer „Selbstabschottung“ der Kabel durch das Aufquellen der Ummantelung. Eigenschaften von Kabeln, die Einfluss auf das Verhalten der Kabel in Abschottungen haben können, sind vor allem [131]:

4 Grundlagen zu Leitungsabschottungen

- Durchmesser,
- Querschnittsverhältnis von Metallkern zu Isolierung/Mantel,
- Werkstoff der Isolierung/des Mantels,
- metallische Abschirmung/konzentrische Leiter,
- Anzahl der Leiter

4.1.3 Arten von Leitungsabschottungen und Abschottungssystemen

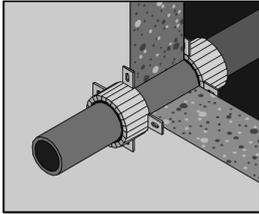
In ETAG 026-2 [132] (deutsche Fassung von 2008 [133]) sind grundlegende Varianten von Leitungsabschottungen beschrieben. Weiterhin können anhand des Produktportfolios namhafter Hersteller gängige Arten von Abschottungen identifiziert werden. Durch den Fortschritt in Forschung und Entwicklung sind ständig neue Produkte auf dem Markt erhältlich. Bei allen Abschottungssystemen gibt es herstellerspezifische Unterschiede, zumindest auf Detailebene. Genaue chemische Zusammensetzungen der verwendeten Komponenten werden von den Herstellern üblicherweise geheim gehalten. Teilweise werden mit gleichen Begriffen unterschiedliche Produktgruppen beschrieben bzw. zusammengefasst. Die folgenden Beschreibungen dienen der Klarstellung der Begrifflichkeiten, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die grundlegende Auswahl der Abschottungssysteme erfolgte auf Grundlage von ETAG 026-2. Teile der Beschreibungen wurden ebenfalls aus ETAG 026-2 übernommen. Nicht mehr zeitgemäße bzw. selten verwendete Varianten wurden vernachlässigt, dafür wurden Varianten ergänzt, die aktuell wichtig, vor allem für den Holzbau, erscheinen oder deren Beschreibung für in dieser Arbeit beschriebene Versuchsreihen relevant ist.

Manschetten

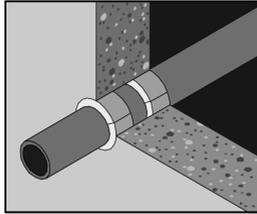
Brandschutzmanschetten (vgl. Abb. 4.1) bestehen im Allgemeinen aus einem Metallgehäuse und einer sich darin befindenden intumeszierenden Einlage. Die Brandschutzmanschette wird um die abzuschottende Leitung angebracht. Bei Hitzeeinwirkung bildet die Einlage eine schaumartige Ascheschicht aus, welche mit einem nennenswerten Druck, gerichtet durch das Metallgehäuse, in Richtung Leitung aufquillt [133]. Öffnungen, die durch schmelzende oder verbrennende Leitungen entstehen, können somit durch die Brandschutzmanschette verschlossen werden. Brandschutzmanschetten werden meist für brennbare Rohre verwendet, es finden sich aber auch Manschetten zur Abschottung von Kabeln. Der Einbau kann aufgesetzt, also vor dem Bauteil, oder innerhalb des Bauteils erfolgen. Aus Schallschutzgründen sind in vielen Systemzulassungen Hüllen bzw. Schläuche inbegriffen, die um die Rohrleitungen gelegt werden können. Soll eine Leitung in Wandbauteilen abgeschottet werden, so ist beidseitig eine Manschette anzubringen. Bei Deckenbauteilen ist im Normalfall eine unterseitig angebrachte Manschette ausreichend.

Brandschutzbandagen

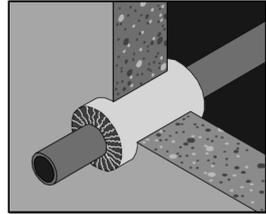
Bandagen (vgl. Abb. 4.1) haben einen zu Manschetten identischen Wirkmechanismus. Der Unterschied liegt darin, dass Bandagen kein Metallgehäuse besitzen. Sie werden daher zumindest teilweise innerhalb des Bauteils angeordnet. Das Bauteil übernimmt so die Funktion des fehlenden Metallgehäuses und gibt die Richtung des Aufquellens vor. Teils ist das Intumeszenzmaterial der Bandagen an ein Trägermaterial (Gewebestreifen) angehaftet. Brandschutzbandagen werden häufig zur Abschottung nichtbrennbarer Rohre mit brennbarer Rohrisolierung verwendet.



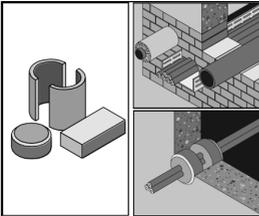
Brandschutzmanschette



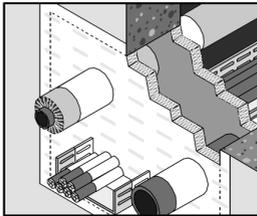
Brandschutzbandage



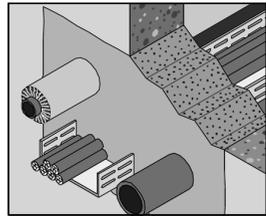
Streckenisolierung



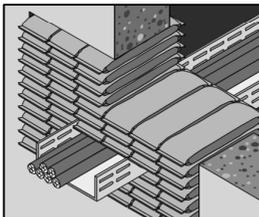
Brandschutzsteine/Stopfen



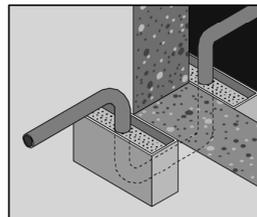
Weichschott



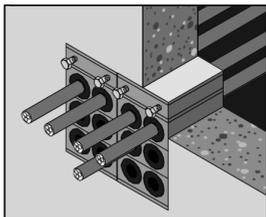
Mörtelschott



Brandschutzkissen



Sandtasse



Modulschott

Abb. 4.1: Unterschiedliche Abschottungssysteme im Einbauzustand [132]

Streckenisolierungen

Dieser Begriff entstammt nicht ETAG 026-2. Dort werden die meisten dieser Produkte unter dem Begriff „Mineralfaserprodukte“ zusammengefasst. Unter Streckenisolierungen (vgl. Abb. 4.1) werden in dieser Arbeit Abschottungssysteme verstanden, die um die Leitung angeordnet werden. Der Raum zwischen Rohr und Bauteil wird somit verschlossen. Zum Verschluss der Restöffnung bei nicht passgenauer Bohrung kommen unterschiedliche Materialien in Frage. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Materials, welches meist nichtbrennbar ist, wird das umgebende Bauteil vor zu großem Wärmeeintrag durch die Leitung geschützt. Da die Leitung in dieser Anordnung auf dem Weg durch das Bauteil nur wenig Wärmeenergie abgeben kann, ist eine weiterführende Isolierung aus nichtbrennbaren Baustoffen auf einer bestimmten Länge nach der Bauteildurchdringung notwendig, um eine Entzündung umliegender Bauteile und anderer Materialien zu verhindern. Die Streckenisolierungen sind oft aus Mineralfaserprodukten hergestellt, sie treten aber beispielsweise auch auf Kautschuk- oder Mörtelbasis auf.

Brandschutzsteine /-stopfen

Brandschutzsteine und -stopfen sind Formteile aus intumeszierendem Material (siehe Abb. 4.1). Sie sind in verschiedenen Größen und Ausformungen erhältlich und komprimierbar. Sie können so recht passgenau in Öffnungen eingefügt werden. Fehlstellen um die Formteile können mit formbaren Materialien verschlossen werden. Im Brandfall schäumen die Materialien auf und bilden eine schützende, wärmedämmende Schicht. Entstehende Öffnungen, die durch schmelzende Leitungen oder Isolierungen entstehen, können verschlossen werden. Teilweise ist, bei Herstellung einer flächigen Abschottung, die Anordnung weiterer Produkte, wie Streckenisolierungen oder Manschetten an den durchgeführten Leitungen notwendig, um die Leistungskriterien einhalten zu können. Vorteile dieser Abschottungsmöglichkeit, die als Kombiabschottung verwendet werden kann, ergeben sich durch die große Flexibilität in Hinsicht auf die Form der Öffnung und die Nachbelegbarkeit des Schotts. Als Nachteil sind die vergleichsweise hohen Materialkosten zu nennen.

Weichschott/beschichtete Mineralfaserplatten

Bei Weichschottsystemen handelt es sich um Kombiabschottungen, die grundlegend aus Mineralfaserplatten bestehen, die in die Bauteilöffnung eingepasst werden (siehe Abb. 4.1). Normalerweise sind für die Systeme eine oder zwei Mineralfaserplatten notwendig. Besteht das System aus zwei Platten, sind diese meist beidseitig bündig mit dem Bauteil einzubauen. Teils ist auch ein asymmetrischer Einbau beider Platten auf einer Bauteilseite möglich. Die Leitungen werden durch zuvor hergestellte Öffnungen in den Platten hindurchgeführt. Anschließend sind Fehlstellen (vor allem um die Leitungen) mit einer Füllmasse zu verschließen. Teils sind weitere Maßnahmen (wie z. B. eine Beschichtung) an Leitungen und der Schottoberfläche notwendig. Wie bei den Systemen mit Brandschutzsteinen kann es für bestimmte Leitungsarten notwendig sein weitere Produkte vorzusehen. Die Funktion der Abschottung beruht grundlegend auf der Nichtbrennbarkeit und der geringen Wärmeleitfähigkeit der Mineralfaserplatten. Hinzu kommt die Brandschutzbeschichtung, welche meist endotherm und carbonisierend wirkt. Weichschottsysteme werden in der Praxis sehr häufig verwendet, da die Materialien kostengünstig sind und eine Nachbelegung der Schotts vergleichsweise einfach möglich ist. Dabei ist der Umgang mit Baustoffen aus Mineralfasern, sowie die Tatsache, dass Weichschottsysteme im Bestand häufig in einem schlechten Zustand vorzufinden sind kritisch zu sehen [134].

Mörtelschott

Auch das Mörtelschott ist eine weit verbreitete Art der Kombiabschottung. Der Raum um die Leitungen wird dabei mit Mörtel verschlossen und die einzelnen Leitungen werden mit

dafür vorgesehenen Produkten abgeschottet (siehe Abb. 4.1). Die verwendeten Mörtel weisen im Brandfall ähnliche Eigenschaften wie Beton auf und sind daher für die Zwecke der Abschottung geeignet. Nachteilig an diesem System ist der Aufwand zum Einbringen des feuchten, im Normalfall fließfähigen Materials. Zudem ist eine Nachbelegung des Schotts nur unter größerem Aufwand möglich. Als positiv ist die Stabilität und Dauerhaftigkeit der Maßnahme zu nennen.

Kabelbox

Eine Kabelbox ist ein vorgefertigtes Produkt mit unterschiedlichen Abmessungen. Die Kabelbox kann geöffnet werden und Leitungen können eingelegt werden. Anschließend wird die Box in eine recht passende Bauteilöffnung eingesetzt und die Restöffnung wird verschlossen. Im Inneren einer Kabelbox befindet sich Material, das im Brandfall intumesziert und so das Innere der Box abdichtet. Die Kabelbox kann sehr leicht nachbelegt werden. Kabelboxen haben traditionell ein Metallgehäuse.

Schäume

Schäume bzw. Brandschutzschäume expandieren während des Verarbeitungsprozesses und härten anschließend bei Zimmertemperatur aus. Sie können als eigenständige Abschottung verwendet werden, aber auch genutzt werden, um kleinere Öffnungen oder Fehlstellen zu verschließen. Schäume können unabhängig von der Form der Öffnung verwendet werden. Nachteilig an Schäumen sind die Gefährdungen für den Verarbeiter durch die enthaltenen Stoffe, die für das Aufquellen und das Aushärten verantwortlich sind.

Kissen

Brandschutzkissen sind kissenförmige, formbare Produkte, die mit teils reaktiven Stoffen gefüllt sind. Die Produkte eignen sich zur vorübergehenden oder dauerhaften Abschottung von Bauteilöffnungen mit und ohne Leitungsdurchführungen (siehe Abb. 4.1)[133].

Sandtassen

Eine Sandtasse ist *„ein offener Metalrahmen, der in einer Wand befestigt und mit einem speziellen Sand gefüllt ist. Die Kabel werden durch den Sand hindurchgeführt“* [133].(siehe Abb. 4.1)

Modulare Systeme/Modulschott

Ein Modulschott ist ein *„System, das aus einem Stahlrahmen und darin eingebauten, um die Leitungen verpressten Elastomer-Formstücken (Module) besteht“* [133](siehe Abb. 4.1). Für die Anwendungsfälle, die in dieser Arbeit behandelt werden sollen, weniger relevant, allerdings weist das Lösungsprinzip Ähnlichkeiten zum Forschungsgegenstand auf.

4.1.4 Prüfung und Klassifizierung von Leitungsabschottungen

Nach MVV TB Anhang 4, Kapitel 6 kann die Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen von Kabel- und Rohrabschottungen auf nationaler Ebene (Bauarten mit Anwendbarkeitsnachweisen nach §16a MBO) nach den Vorgaben der Normenreihe DIN 4102 erfolgen. Für Kabelabschottungen gilt DIN 4102-9 [135], für Rohrabschottungen DIN 4102-11 [136]), siehe Tab. 4.1. Auf nationaler Ebene findet die Klassifizierung und die Beschreibung der Prüfbedingungen innerhalb einer einzelnen Norm statt. Auf europäischer Ebene (Bauprodukte oder Bausätze nach harmonisierten technischen Spezifikationen nach der Verordnung (EU) Nr. 305/2011) erfolgt die Klassifizierung nach der Normenreihe DIN EN 13501, im Speziellen DIN EN 13501-2 [18]. Die

Tab. 4.1: Bauaufsichtliche Anforderung und Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-9 bzw. DIN 4102-11 [137]

Bauaufsichtliche Anforderung	Feuerwiderstandsklasse	
	Kabelabschottung (DIN 4102-9)	Rohrabschottung (DIN 4102-11)
feuerhemmend	S30	R30
hochfeuerhemmend	S60	R60
feuerbeständig	S90	R90
Feuerwiderstands- fähigkeit 120 Minuten	S120	R120

MVV TB Fassung 2018 [137] enthielt auch zu diesen Klassen eine Zuordnungstabelle (Tab. 4.2). Diese Zuordnungstabelle ist in der aktuelleren Fassung der MVV TB [20] nicht mehr enthalten. Die Zuordnung der Klasse ergibt sich nun über die Bauartgenehmigung (siehe dazu Unterabschnitt 4.1.6). Zur Einteilung in das Klassifizierungssystem auf europäischer Ebene nach DIN EN 13501 erfolgt die Prüfung nach DIN EN 1363-1 [5] (Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen) in Verbindung mit DIN EN 1366-3 [131] (Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen).

Die Prüfung von Abschottungen nach Teil C 4 der MVV TB, für die nur ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis verlangt wird (siehe Unterabschnitt 4.1.6), erfolgt nach DIN 4102-11 (1985-12) [136] in Verbindung mit Anlage C 4.1 und C 4.5 der MVV TB [20, 137]. Nach Anlage C 4.1 ist abweichend von 4102-11

- ein Probekörper für die Brandprüfung ausreichend
- kein Brandversuch mit minimaler Beanspruchung notwendig
- keine Messstellen zur Ermittlung der mittleren Temperaturerhöhung in 10 cm und 60 cm Abstand von Wand oder Decke erforderlich
- kein Brandversuch mit Schwelfeuerbeanspruchung notwendig

Alternativ zur Prüfung nach DIN 4102-11 [136] (unter Beachtung der Besonderheiten nach Anlage C 4.1) kann die Prüfung der Rohrabschottungen zur Klassifizierung als R... auch mit modifizierten Prüfbedingungen in Anlehnung an DIN EN 1366-3 (2009-07)[131], Abschnitt 5 durchgeführt werden. Die Druckbedingungen nach DIN EN 1366-3 [131] sind zu beachten. Die Steuerung der Ofentemperatur sowie der Beginn der Prüfung hat nach DIN EN 1363-1 (1999-10)[5] zu erfolgen.

Im Folgenden werden ausgewählte Inhalte hinsichtlich des Prüfaufbaus und der Prüfbedingungen zur Prüfung von Leitungsabschottungen vorgestellt. Für weitere Informationen sei auf DIN EN 1366-3 [131] verwiesen. Betrachtet werden hier die Prüfbedingungen nach DIN EN 1366-3 [131] i.V.m. DIN EN 1363-1 [5], da diese für die Durchführung der Versuche in dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden. Für diese Arbeit wesentliche Unterschiede zu den Prüfanforderungen nach nationaler Prüfnorm werden aufgezeigt. Die Verwendung der europäischen Prüfnorm ist

Tab. 4.2: Bauaufsichtliche Anforderung und Zuordnung der Klassifizierungen nach DIN EN 13501-2:2010-02 [137]

Bauaufsichtliche Anforderung	Feuerwiderstandsklasse		Brandverhalten, mindestens geeignete Klasse nach DIN EN 13501-1:2010-01
	Kabelabschottung (DIN 4102-9)	Rohrabschottung (DIN 4102-11)	
feuerhemmend	EI 30	EI 30-U/U ₁ EI 30-C/U ₂	
hochfeuerhemmend	EI 60	EI 60-U/U ₁ EI 60-C/U ₂	E
feuerbeständig	EI 90	EI 90-U/U ₁ EI 90-C/U ₂	
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Minuten	EI 120	EI 120-U/U ₁ EI 120-C/U	

¹⁾ Für die Abschottung von brennbaren Rohren oder Rohren mit einem Schmelzpunkt < 1000 °C; für Trinkwasser-, Heiz- und Kälteleitungen mit Durchmessern = 110 mm ist auch die Klasse EI ...-U/C zulässig.

²⁾ Für die Abschottung von Rohrleitungen aus nichtbrennbaren Rohren mit einem Schmelzpunkt ≥ 1000 °C, Ausführung der Rohrleitung ohne Anschlüsse von brennbaren Rohren.

zukunftsweisend aufgrund der angestrebten Harmonisierung in Europa. Zudem ist die europäische Prüfnorm aktueller, beschreibt die Prüfbedingungen detaillierter und stellt die kritischere Alternative dar.

Die Prüfung von Leitungsabschottungen erfolgt innerhalb von normierten Wand- oder Deckenkonstruktionen (Normtragkonstruktionen) oder einer spezifischen Tragkonstruktion. Als Normtragkonstruktionen sind Bauteile in Massivbauweise und Leichtbauweise aus nichtbrennbaren Baustoffen beschrieben. Bei Verwendung einer spezifischen Tragkonstruktion ist das Anwendungsgebiet der Produkte anschließend auf die in der Prüfung verwendete Konstruktion begrenzt. Die Normtragkonstruktionen nach nationaler und europäischer Normung unterscheiden sich.

Die Brandbeanspruchung ist durch die Einheitstemperaturzeitkurve definiert. Zur Beurteilung des Feuerwiderstands der Abschottungssysteme werden die Leistungskriterien Raumabschluss (E) und Wärmedämmung (I) betrachtet. Das Leistungskriterium Tragfähigkeit (R) ist für Abschottungen nicht relevant. Weitere Beobachtungen am Probekörper wie Rauchaustritt, Rissbildung, Schmelzen, Erweichen, Abplatzen oder Verkohlen sind aufzuzeichnen, haben aber nach Norm keine direkte Relevanz zur Beurteilung des Prüfergebnisses. Solche Beobachtungen können beispielsweise bei der Beurteilung von Abweichungen relevant sein.

Zur Prüfung des Wärmedämmkriteriums werden Thermolemente an festgelegten Stellen auf den zu untersuchenden Abschottungen und den Leitungen angebracht und anschließend die gemessenen Temperaturänderungen bewertet. Die Anordnung der Thermolemente erfolgt nach

4 Grundlagen zu Leitungsabschottungen

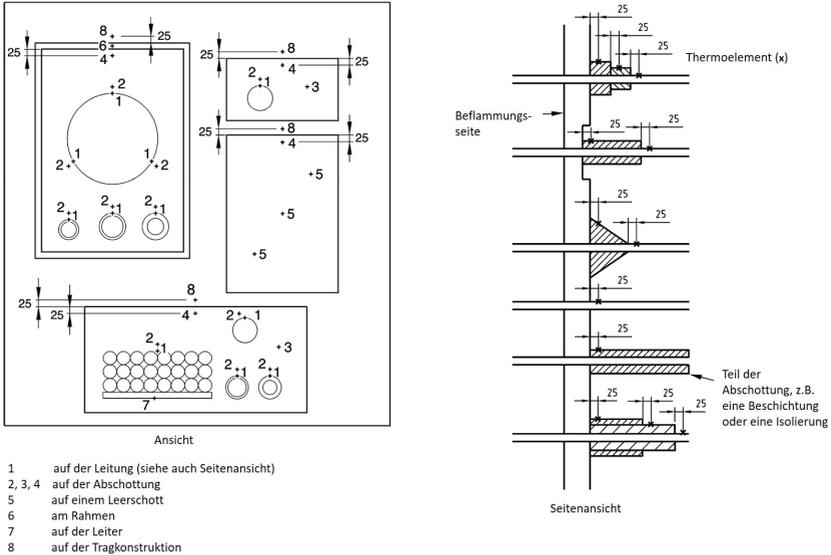


Abb. 4.2: Positionen der Thermoelemente, modifiziert übernommen aus [131]

den Vorgaben der Prüfnorm. Im Allgemeinen wird auf allen unterschiedlichen Oberflächen (auch auf den Leitungen), die im Abschottungsbereich zu finden sind, je 25 mm nach dem Materialübergang bzw. im Abstand von 25 mm neben Unstetigkeitsstellen (z. B. Ende eine Beschichtung, Austritt der Leitung aus der Abschottung, Übergang Schott/Wand) ein Thermoelement angebracht. In Abb. 4.2 sind die Stellen, an denen Thermoelemente nach DIN EN 1366-3 [131] angebracht werden müssen, dargestellt. Zur Beurteilung des Wärmedämmkriteriums wird, abweichend zur Grundnorm DIN EN 1363-1 [5], die auch die durchschnittliche Temperaturerhöhung in Betracht zieht, nur der maximale Temperaturanstieg gewertet, wonach die Temperaturerhöhung an keiner Messstelle 180 K überschreiten darf.

Wichtig ist weiterhin der bei der Brandprüfung vorherrschende Ofeninnendruck. Dieser beeinflusst maßgeblich, wie viel Rauch und Brandgase eine Abschottung bzw. die Leitungen durchdringen, und kann, vor allem durch den damit verbundenen Wärmetransport, deutlichen Einfluss auf das Prüfergebnis haben. Der Ofeninnendruck muss gemäß DIN EN 1366-3 [131] am oberen Rand der am höchsten gelegenen Abschottung 20 Pa, nach nationaler Normung 10 Pa betragen. In Verbindung mit Ofeninnendruck und Rauchdurchtritt ist auch die Leitungs- bzw. Rohrendkonfiguration zu nennen. Die Prüfbedingungen sollen die realen Bedingungen möglichst gut abbilden. Je nachdem, ob zu erwarten ist, dass in Rohrleitungen im Brandfall Öffnungen entstehen und ob diese als System im Gebäude geschlossen sind oder belüftet, werden die Leitungen im Brandraum bzw. auf der unbeflammten Seite offen oder geschlossen geprüft. Auch die Leitungsendkonfiguration hat Einfluss auf die entstehenden Strömungen und den damit verbundenen Wärmetransport in und an den Leitungen.

4.1.5 Rauchdurchtritt durch Leitungsabschottungen

Rauchdichtheit ist DIN EN 13501 [18] zufolge die *„Fähigkeit eines Bauteils, den Durchtritt von heißen und/oder kalten Gasen oder Rauch von einer Seite auf die andere unterhalb eines festgelegten Niveaus zu reduzieren“*. Zudem definiert DIN EN ISO 20484 [138] ein dichtes Objekt als ein *„Objekt mit einer geringeren Leckagerate, als in der Spezifikation festgelegt“*. Öffnungen bzw. Öffnungsverschlüsse sind als ein Leck nach DIN ISO 20484 [138] anzusehen. Somit kann eine Leckagerate zugeordnet werden. Daher ist unter einer bauordnungsrechtlich geforderten Rauchdichtheit nicht zu verstehen, dass kein Rauch durch das Bauteil hindurchdringen darf, sondern dass Rauch bis zu einem gewissen Grenzwert das Bauteil durchdringen darf und das Bauteil dennoch die Anforderung der Rauchdichtheit erfüllt.

Bei Feuerwiderstandsprüfungen ist, wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt, nach DIN EN 1363-1 [5] unter anderem der Rauchaustritt als ein Bestandteil des Kriteriums Raumabschluss zu dokumentieren. Aufgezeichnet werden dabei rein optische Beobachtungen. In DIN EN 1366-3 [131] wird zur Prüfung von Leitungsabschottungen konkretisiert: *„Der Zweck dieser Prüfung besteht nicht darin, quantitative Angaben über die Leckrate von Rauch und/oder heißen Gasen oder die Übertragung bzw. Erzeugung von Rauchgasen zu ermitteln. Derartige Beobachtungen sollten nur bei der Beschreibung des allgemeinen Verhaltens der Probekörper während der Prüfung festgehalten werden“* [131]. Welche Mengen an Rauch bei der Prüfung durch eine Abschottung hindurchdringen dürfen, wird weder qualitativ noch quantitativ beschrieben. In den Schutzziele der MBO ist allerdings festgehalten, dass der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorzubeugen ist. *„Es ist [allerdings] bekannt, dass von Leitungsanlagen Gefährdungen ausgehen, indem sie die Ausbreitung von Rauch und heißen Gasen im Brandfall ermöglichen“* [131]. An dieser Stelle ergibt sich ein gewisser Widerspruch, dessen Diskussion es bedarf. Leitungsabschottungen sollen dafür sorgen, dass ein raumabschließendes Bauteil an der Stelle einer Leitungsdurchführung nicht maßgebend geschwächt wird. In der Realität wird sich an dieser Stelle jedoch eben durch den Rauchdurchtritt, der bei einem öfFnungslosen raumabschließenden Bauteil sicher nicht in einem Maß auftritt, das mit dem Rauchdurchtritt durch gewisse Leitungsabschottungen vergleichbar ist, eine Schwächung des Bauteils ergeben. Leitungsdurchführungen sind für den Gebäudebetrieb ebenso notwendig wie andere Öffnungen und deren Verschlüsse. Türen beispielsweise stellen ebenso eine Schwachstelle in raumabschließenden Wänden dar. Teil 1 der DIN 18095 [139] beziffert zulässige Leckageraten für Rauchschutztüren. Diese werden in raumabschließende Bauteile, auch angrenzend an Rettungswege, eingebaut. Es wird davon ausgegangen, dass die Schutzziele der Bauordnung dennoch erfüllt sind, da der Rauchdurchtritt auf ein solches Maß begrenzt wird, dass die Rettung möglich bleibt. Sofern die Leckagerate von Leitungsabschottungen niedriger ausfällt als bei Türen, bei denen diese quantitativ bewertet werden kann, ist auch dort davon auszugehen, dass die Einhaltung der Schutzziele gewährleistet ist. Durch die Kombination von Türen und Leitungsabschottung auf engem Raum könnte die Schutzzielgewährleistung allerdings in Gefahr sein. Eine Messung der Leckagerate bei Leitungsabschottungen stellt sich vor allem aufgrund der zum Teil deutlich unterschiedlichen und unregelmäßigen Geometrie schwierig dar.

Auf Grundlage ihres Erfahrungsschatzes schätzen Prüfanstalten ab, ob der optisch festgestellte Rauchdurchtritt sich in einem akzeptablen Bereich befindet. Beachtet werden sollte an dieser Stelle, dass es sich bei einem Teil des beobachteten Gasmischs um Wasserdampf handeln kann, der aus dem Bauteil und aufgrund chemischer Reaktionen der Brandschutzmaterialien freigesetzt wird, welche in den Bauprodukten zur Leitungsabschottung verwendet werden.

In Bezug auf Leitungsabschottungen, die direkt in Holzbauteile eingebaut werden, stellt sich die Frage, ob der Einbau in ein brennbares Material die Leckagerate, im Vergleich zur Einbausituation in einem nichtbrennbaren Bauteil, erhöht. Dies könnte der Fall sein, da durch den Abbrand des umgebenden Bauteils Spalte entstehen können, die Rauch durchdringen lassen. Relativiert werden diese Bedenken durch die intumeszierende Eigenschaft der Materialien vie-

ler Abschottungen, die dafür sorgen, dass entstehende Spalte verschlossen werden. Weiterhin können Prüfer in den Materialprüfanstalten aufgrund ihrer Erfahrung erkennen, ob während einer Prüfung einer Abschottung in einem Holzbauteil mehr Rauch durchdringt als bei einem vergleichbaren Produkt in einem nichtbrennbaren Bauteil. Durch die Verwendung brennbarer Baustoffe kann auch das zu betrachtende Brandszenario beeinflusst werden. Durch die größere vorhandene Brandlast könnten (lokal) höhere Temperaturen im Brandraum entstehen und das Rauchvolumen zunehmen. Folglich würde der Druck im Brandraum ansteigen. Diese Thematik betrifft allerdings nicht speziell Leitungsabschottungen, sondern den Holzbau im Allgemeinen. Es muss an anderer Stelle untersucht werden, ob der Bemessungsbrand zur Beurteilung von Holzbauteilen angepasst werden sollte. Das derzeit laufende Forschungsprojekt TIMpuls [140] an der TU München untersucht diese und weitere Fragestellungen hinsichtlich des Brandschutzes im Holzbau. Weiterhin könnten durch höhere Temperaturen, die aufgrund des geringeren Wärmeabflusses durch das Holzbauteil im Vergleich zu einem Betonbauteil in und auf den Leitungen entstehen, mehr Rauchgase freigesetzt werden. Im Laufe einer Brandprüfung, die über 30 bis hin zu 90 Minuten andauert, verbrennen gewöhnlich alle brennbaren Bestandteile der Leitungen innerhalb des Prüfofens. Der eventuell auftretende geringfügige zusätzliche Abbrand innerhalb des Durchführungsbereichs ist dabei vernachlässigbar. Leitungsabschottungen stellen daher im Massiv- und Trockenbau sowie im Holzbau eine Schwachstelle dar, an der es zu verstärkter Rauchweiterleitung kommen kann. Der Rauchdurchtritt ist allerdings, durch die Anzahl und die Größe der gewöhnlich in Gebäuden vorhandenen Leitungsabschottungen, soweit eingegrenzt, dass die allgemeinen Schutzziele der MBO eingehalten werden können. Nimmt die Anzahl der Leitungsabschottungen in Gebäuden deutlich zu, sollte der Rauchdurchtritt durch Leitungsabschottungen gezielt untersucht werden.

4.1.6 Verwendung und Anwendung von Leitungsabschottungen

Auf nationaler Ebene sind Leitungsabschottungen Bauarten. Die darin verwendeten Bauprodukte müssen, sofern erforderlich, ein Ü- oder CE-Zeichen aufweisen. Als Anwendbarkeitsnachweis ist eine allgemeine oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung notwendig, in Ausnahmefällen ist ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis ausreichend. Zur Beurteilung der Brauchbarkeit von Leitungsabschottungen auf europäischer Ebene liegt aktuell noch keine harmonisierte europäische Norm vor. Aus diesem Grund ist zur CE-Kennzeichnung dieser Gruppe von Bauprodukten eine European Technical Assessment/Europäische Technische Bewertung (ETB) (ETA) notwendig. Grundlagen zur Erstellung einer ETA werden im zutreffenden European Assessment Document/Europäisches Bewertungsdokument (EAD) beschrieben. Existiert noch kein EAD für eine Produktgruppe, kann aktuell auf eine entsprechende European Technical Assessment Guideline (ETAG) (ehemaliges Grundlagendokument zur Erstellung einer Europäisch Technischen Zulassung (ETZ)/European Technical Approval (ETA_{alt}) zu Zeiten der Gültigkeit der Bauproduktenrichtlinie) zurückgegriffen werden. Zur Erstellung einer ETA für Abschottungen ist daher zurzeit ETAG 026-2 heranzuziehen. Für Bauprodukte oder Bausätze, die das Ziel der Brandabdichtung oder der Brandhemmung verfolgen, deren Wirksamkeit auf im Brandfall aufschäumenden Produkten fußt, stellt EAD 13-350005-00-1104 *Intumescent products for fire sealing and fire stopping purposes* [141] die Grundlage zur Erstellung einer ETA dar. Da die Wirksamkeit vieler Abschottung zumindest teilweise auf Produkten mit intumeszierender Wirkung beruht, ersetzt das EAD 13-350005-00-1104 Teile von ETAG 026-2.

Nach MVV TB [137] Anhang 4 bedarf es zur Anwendung von Bauprodukten für Abschottungen in feuerwiderstandsfähigen Bauteilen mit ETA nach ETAG 026-1 und -2¹ einer Bauartgenehmigung nach § 16a MBO. Weiterhin gilt für Abschottungen nach diesen Europäischen Technischen Bewertungen², dass sie vom Verarbeiter mit einem Schild zu kennzeichnen sind.

¹ Gilt für Europäische Technische Bewertungen, die nach dem 1.7.2013 erteilt worden sind.

² Gilt für Europäische Technische Zulassungen, die vor dem 1.7.2013 erteilt worden sind.

Dieses ist dauerhaft neben der Abschottung zu befestigen. Bei Ausführung oder Veränderungen an Abschottungen muss der Verarbeiter eine Übereinstimmungsbestätigung ausstellen, mit der er bestätigt, dass die von ihm ausgeführte Abschottung den Bestimmungen der jeweiligen ETA entspricht. Der Bauherr ist nach jeder Ausführung einer Abschottung vom Verarbeiter schriftlich darauf hinzuweisen, dass die Wirksamkeit der Abschottung nur gegeben ist, wenn diese im ordnungsgemäßen Zustand gehalten wird. Kombiabschottungen dürfen nur von Unternehmen ausgeführt werden, die in der Ausführung geschult werden und ihre Fachkunde nachweisen können (vgl. 6.3.2.2/1 Anhang 4 MVV TB). In der aktuellen Fassung der MVV TB [20] sind die Vorgaben hinsichtlich Dokumentation, Ausführung und Instandhaltung nicht mehr enthalten. Diese sind nun in den Bauartgenehmigungen unter dem Punkt *Bestimmungen für Planung, Bemessung und Ausführung* zu finden. Die Geltungsdauer älterer Dokumente, die diese Vorgaben nicht enthielten, ist mittlerweile abgelaufen, weshalb die Vorgabe innerhalb der MVV TB nicht mehr notwendig ist.

Bauarten für Abschottungen für nichtbrennbare Rohrleitungen (teils auch wärmeisolierte), die aus einer Streckenisolierung oder Rohrummantelung bestehen und an die nur Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer gestellt werden, bedürfen (nach Teil C 4 der MVV TB) nur eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses. Gleiches gilt für Bauarten zur Abschottung von thermoplastischen Kunststoffrohren (auch wärmeisolierten). Es gelten die gleichen Bedingungen, mit dem Zusatz, dass bei der Bauart der Abschottung keine dämmschichtbildenden Baustoffe eingesetzt werden dürfen.

4.2 Leitungsabschottungen in Holzbauteilen

Aufbauend auf den grundlegenden Informationen zu Leitungsabschottungen wird in diesem Abschnitt zunächst beschrieben und bewertet, wie Leitungsabschottungen in Deutschland derzeit in Holzbauteilen angewendet werden. Im folgenden Schritt wird der internationale Stand der Technik und Wissenschaft zur Anwendung von Leitungsabschottungen im Holzbau dargestellt. Dazu werden für diese Arbeit relevante Inhalte weltweit bereits abgeschlossener Forschungsarbeiten zur Leitungsführung durch Holzbauteile zusammengefasst.

4.2.1 Gegenwärtige Vorgehensweise zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen in Deutschland

Klassifizierte Abschottungssysteme, die in Holzbauteilen angewendet werden können, sind derzeit kaum auf dem Markt verfügbar. Die Ausnahme stellen Produkte einzelner Hersteller dar, die für die Anwendung in bestimmten Bauteilen zugelassen sind. Der Grund dafür kann darin gesehen werden, dass die Entwicklung von Leitungsabschottungen für Holzbauteile aufgrund des geringen Anteils des Holzbauvolumens am Gesamtbauvolumen in der Vergangenheit kaum relevant war. Der mehrgeschossige Holzbau ist erst seit Einführung der Musterbauordnung 2002 geregelt ermöglicht. Weiterhin enthält die Prüfnorm - wohl aufgrund dieser Tatsachen - ausschließlich Normtragkonstruktionen aus nichtbrennbaren Baustoffen.

Die Durchdringung und Abschottung feuerhemmender Bauteile stellt den einfachsten Fall dar. In vielen Fällen können die Erleichterungen des Abschnitts 4.3 der Muster-Leitungsanlagenrichtlinie angewendet werden. Die Erleichterungen nach Abschnitt 4.2 MLAR können an dieser Stelle nicht angewendet werden, da die Leitungen von brennbaren Bauteilen umgeben sind. Der Einbau klassifizierter Systeme ist jedoch gesondert zu betrachten. Es müssen Systeme vorgesehen werden, die für die Anwendung in Holz geprüft und zugelassen sind. Der Kommentar zur Leitungsanlagenrichtlinie [26] empfiehlt eine Ausleibung angelehnt an die M-HFH HolzR herzustellen und darin, unter einer nicht wesentlichen Abweichung, ein für den Massivbau zugelassenes System zu verwenden. Um die nach MLAR vorgegebene Mindestbauteildicke zu erreichen, können Aufdopplungen notwendig sein.

Die heute gängigste Herangehensweise zur Abschottung von Leitungsdurchführungen in hochfeuerhemmenden Holzbauteilen sieht vor, eine Öffnung mit einer klassifizierten Öffnungsleibung nach M-HFH HolzR herzustellen. Die Öffnung wird mit Beton verschlossen. Es entsteht ein Ausschnitt eines Betonbauteils. Die Leitungen werden durch das Betonbauteil geführt und anschließend mit für den Massivbau zugelassenen Systemen abgeschottet. Um die Ausführung ohne eine Abweichung vom Bauordnungsrecht umzusetzen, müssen innerhalb der klassifizierten Öffnungsleibung nach M-HFH HolzR Abschottungssysteme verwendet werden, die für die Anwendung in hochfeuerhemmenden Holzbauteilen zugelassen sind [23], in der M-HFH HolzR ist geregelt, dass Leitungsdurchführungen durch hochfeuerhemmende Bauteile aus Holz, innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung entsprechend Fenstern, Türen, Verteilern eingebaut werden dürfen. Wird eine Feuerwiderstandsanforderung an den Verschluss der Öffnung gestellt, so ist ein Anwendbarkeitsnachweis notwendig, der den Einbau dieses Abschlusses in hochfeuerhemmende Bauteile aus Holz regelt. Systeme mit solch einer Zulassung sind allerdings kaum am Markt vorhanden. Dem Kommentar zur Muster-Leitungsanlagenrichtlinie [26] zufolge, stellt die Herangehensweise des Einbaus klassifizierter Abschottungssysteme, ohne die Zulassung für die Anwendung in Holzbauteilen, innerhalb der klassifizierten Öffnungsleibung, eine nicht-wesentliche Abweichung vom Ver-/ Anwendbarkeitsnachweis der Abschottungen dar. Die Erleichterungen der MLAR Abschnitt 4.3 können in hochfeuerhemmenden Holzbauteilen, innerhalb einer klassifizierten Öffnungsleibung, ebenfalls angewendet werden (siehe dazu Abschnitt 2.2.2).

Feuerbeständige Bauteile können gemäß MBO³ im Regelfall nicht aus Holz bestehen. Die Feuerwiderstandsklassifizierung für 90 Minuten kann dennoch erreicht werden. Bei der Anwendung von Abschottungen in solchen Bauteilen aus Holz, kann nach [26] äquivalent zum Einbau in hochfeuerhemmende Wände vorgegangen werden. Die Leistung der Bekleidung muss an die höhere Feuerwiderstandsanforderung angepasst werden. Die Anwendungsfälle für dieses Szenario sind derzeit noch sehr selten, da der geregelte Holzbau bislang auf die Gebäudeklasse vier begrenzt war. Das Bauordnungsrecht trifft bezüglich dieser Fälle keine gesonderte Aussage. Allgemein dürfen in Bauteilen nur Abschottungen angewendet werden, die für diese auch zugelassen sind. In allen anderen Fällen liegt eine Abweichung vom Bauordnungsrecht vor, die gesondert zu betrachten und zu beurteilen ist.

Vorteile der gegenwärtigen Methode

Abschottungen in Betonbauteilen sind bekannte Systeme. Es existiert eine Vielzahl im Massivbau zugelassener Systeme, die mit Hilfe einer klassifizierten Öffnungsleibung in Holzbauteilen eingesetzt werden können. Diese Art des Einbaus wird im Allgemeinen als eine nicht-wesentliche Abweichung angesehen. Der Rauchdurchtritt in den Randbereichen wird durch die Holzleisten, die zum anderen das Betonbauteil fixieren, unterbunden. Ein weiterer Vorteil ist, dass auf diese Weise keine weiteren Prüfungen durchgeführt werden müssen. Die Abschottungen können nach den bereits für Massivbauteile vorhandenen Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweisen eingebaut werden.

Nachteile der gegenwärtigen Methode

Da die Vorgehensweise nicht bauordnungsrechtlich geregelt ist, entsteht bei jeder Anwendung eine Abweichung. Für die Anwender hat dies zufolge, dass sie die Verantwortung für die Sicherheit der, von bauordnungsrechtlichen Vorgaben abweichenden, Ausführung übernehmen müssen. Zudem entstehen methodenspezifische Nachteile. Der Werkstoffwechsel, den die Methode mit sich bringt, hat einen Gewerkwechsel zufolge. Das bedeutet einen Abstimmungsaufwand, um festzulegen, wer wann die erforderlichen Arbeiten ausführt. Ein Zeitverlust kann

³ § 26(2) „[...] Abweichend [...] aus brennbaren Baustoffen zulässig [...]“

die Folge sein. Zum anderen werden die Arbeiten möglicherweise langsamer ausgeführt, weil sie von fachfremden Personal betreut werden, um den Koordinationsaufwand zu minimieren. Die Verwendung eines flüssigen, feuchten Werkstoffs führt zu Wartezeiten während des Aushärtens bzw. des Trocknungsprozesses. Eine Öffnungsleibung ist bei Verwendung eines Mörtelschotts im Holzbau zwingend notwendig und macht somit einen zusätzlichen Arbeitsschritt erforderlich. Optisch hebt sich die Betonoberfläche stark von der Oberfläche der Wand-/Deckenkonstruktion ab und stellt somit eine Störstelle dar. Dies wird jedoch in den meisten Fällen durch eine Vorsatzschale, die aus anderen baulichen Gründen notwendig wird, relativiert. Ein Ziel des Bauens in Holz ist es, mineralische Baustoffe, bei deren Herstellung viel CO₂ freigesetzt wird, zu substituieren und stattdessen CO₂ in Form von Holz im Bauwerk zu binden. Das Einbringen von Mörtel in das Bauwerk steht diesem Gedanken grundsätzlich entgegen. Durch die nicht sortenreine Verwendung des Baustoffs Holz kann es in der Rückbauphase zu Mehraufwand in Hinsicht auf die Stofftrennung kommen. Details, die für Mehraufwand bei der Anwendung einer Bauweise sorgen, hemmen Beteiligte, diese Bauweise zu wählen. Soll der Holzbau bestärkt werden, müssen auch kleinere Hemmnisse nach und nach beseitigt werden.

Ein allgemeiner Nachweis, dass die gegenwärtig praktizierte Methode anwendbar ist, wurde bislang nicht erbracht. Somit ist beispielsweise nicht nachgewiesen, ob die Verbindung des Betonbauteils zum jeweiligen Holzbauteil im Brandfall ausreichend standsicher ist. Ebenso sind einzuhaltende Mindestabstände der jeweiligen Abschottung zum umgebenden Holzbauteil nicht festgelegt.

4.2.2 Internationale Untersuchungen zu Abschottungen im Holzbau

Dass die Detailausführung von Leitungsabschottungen im Holzbau einer angepassten Lösung bedarf, wurde weltweit in den vergangenen Jahren bereits von verschiedenen Forschern erkannt und erste Untersuchungen wurden angestellt. Eine abschließende, allgemein anwendbare Lösung existiert allerdings noch nicht. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Inhalte der Forschungsarbeiten, die das Thema Leitungsabschottungen im Holzbau betreffen, zusammengefasst.

Forschungsprojekt „Fire in Timber“

In [36] wird die Aussage getroffen, dass die Versagensmechanismen einer Holzbaukonstruktion mit denen einer Trockenbaukonstruktion vergleichbar sind. Demnach können viele der Dichtmaterialien, die für Öffnungen in der Abschottung oder für Fugen um die Abschottung im Trockenbau verwendet werden, auch für den Holzbau genutzt werden. Nach [142] wurden die Brandtests zur Untersuchung der Dichtmaterialien an OSB-Platten in verschiedenen Dicken (15 mm und 25 mm) durchgeführt. Eine der 15 mm dicken Platten war zusätzlich mit einer Gipskartonplatte bekleidet. Tabelle 4.3 wurde aus [36] entnommen, sie enthält Empfehlungen zur Verwendung von Dichtmaterialien.

Tab. 4.3: Passende Dichtmaterialien für Leitungsdurchführungen gemäß [36]

Art des Dichtmittels	Leitungsart							Passend für		
	Einzelkabel	Kabelbündel	Kabelpritschen	Nichtbrennbare Rohre	Brennbare Rohre	Lüftungsleitungen	Kombination	Massivkonstruktion	Trockenbaukonstruktion	Holzkonstruktion
Mastix, Schaum, Silikon ¹⁾ , Gips, Mörtel ²⁾ , Steinwollstopfen	++	+	+	+	-	-	-	++	++	++

++ geeignet

+ geeignet mit Einschränkungen

- nicht geeignet

¹⁾ Mit Zulassung im Anwendungsgebiet

²⁾ Entsprechend EN 13963 [143]

Weiterhin werden auf Grundlage von Brandversuchen folgende Empfehlungen ausgesprochen:

- Das Verfüllen von Fugen ist in der kompletten Dicke der Bekleidung/Bepankung notwendig.
- Der Abstand d zwischen Kabeldurchführungen soll größer sein als der größte Lochdurchmesser.
- Falls ein Bündel aus mehr als fünf Kabeln besteht, sollte ein spezielles Abschottungssystem verwendet werden oder die Kabel sind in einer nichtbrennbaren Steinwollrohrschale zu führen.
- Um Rauchdichtheit von Anschlüssen, Spalten und Fugen zu erreichen, sollten dauerelastische Dichtmittel oder Kittre verwendet werden.
- Die Dichte der zu durchdringenden Holzplatte sollte $\geq 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ sein.

Tab. 4.4: Eignung von Abschottungen für die Anwendung in Holz gemäß [36]

	Art der Abschottung										
	Mörtel	Beschichtete Mineralwollplatte	Intumeszierende Passteile	Kabelboxen	Rohrmanschetten	Brandschutzkissen	Sandfallen	Mineralwoll-Rohrschale	Schaum/Mastix		
Eignung für Anwendung in Holz	+/-	++	+	+	+	+	+	+	+	+/-	
	++ geeignet + geeignet mit Einschränkungen - nicht geeignet										

Für Kabeldurchführungen werden die folgenden Aussagen getroffen:

- Einzelkabel⁴ mit Ringspalten $\leq 0,5$ mm können ohne Maßnahme durchgeführt werden.
- Für andere Ringspaltabmessungen, größere Kabeldurchmesser oder grundlegend andere Kabel sowie für Kabelbündel (maximal drei Kabel⁵) wird ein Verschluss mit Gipspachtel, intumeszierenden Streifen, intumeszierender Füllmasse/Mastix, Steinwollstopfen oder feuerwiderstandsfähiger Polyurethanschaum für Fugen/Ringspalte mit einer Breite von 5 mm bis 10 mm empfohlen.
- Für Kabelbündel (maximal fünf⁶) wird die Verwendung von Gipspachtel, intumeszierenden Streifen, intumeszierender Füllmasse/Mastix für Fugen/Ringspalte = 5 mm – 10 mm empfohlen. Falls eine brennbare Hohlraumdämmung vorhanden ist, sollte eine nichtbrennbare Steinwollrohrschale um die Kabel angebracht werden.

Weiterhin wurden im Forschungsprojekt „Fire in Timber“ klassifizierte Abschottungssysteme bezüglich ihrer Eignung für die Anwendung im Holzbau untersucht. Das Ergebnis ist in Tab. 4.4 dargestellt [36]. Zu beachten ist bei diesen Empfehlungen, dass die Weichschotts in Brettsperrholzkonstruktionen innerhalb einer Öffnungsleibung aus Gipskartonplatten eingebaut waren. Es wurden vier Kleinbrandversuche und zwei Großbrandversuche durchgeführt[142].

In den Kleinbrandversuchen wurden zwei Holzrahmenkonstruktionen sowie zwei Brettsperrholzkonstruktionen untersucht. Die erste Holzrahmenkonstruktion war für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten ausgelegt. Sie bestand aus 80 mm Holzfaserdämmung und beidseitig einer Beplankung mit einer OSB-Platte (je 15 mm). Die zweite Holzrahmenkonstruktion

⁴ Typ: NYM ($\varnothing \leq (3 \cdot 16 \text{ mm}^2)$)

⁵ Typ: NYM ($1 \cdot \varnothing \leq (5 \cdot 16 \text{ mm}^2) + 2 \cdot \varnothing \leq (3 \cdot 2,5 \text{ mm}^2)$)

⁶ Typ: NYM ($5 \cdot \varnothing \leq (3 \cdot 2,5 \text{ mm}^2)$)

sowie die Brettsperrholzkonstruktionen waren für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten dimensioniert. Die Holzrahmenkonstruktion hatte dabei zusätzlich eine beidseitige nichtbrennbare Beplankung, bestehend aus je zwei 15 mm dicken Gipskartonplatten. Die 120 mm dicken Brettsperrholz Elemente bestanden aus fünf Schichten, waren mit Melaninharz gebunden und hatten keine zusätzliche Beplankung [142].

In den beiden Großbrandversuchen wurde eine Holzrahmenwand- und Deckenkonstruktion mit Leitungsdurchführungen und Kombiabschottungen untersucht. Die Öffnungsleibungen sowie die gesamte beflamte Oberfläche der Bauteile waren mit zwei Lagen je 18 mm dicker Gipskartonplatten bekleidet [142].

„Brandabschottung im Holzbau“

Auch im Projekt „Brandabschottung im Holzbau (Planungsbroschüre Holzforschung Austria)“ [37] wurden zur Untersuchung der Eignung der Systeme und der Befestigung der Abschottungen in Holzelementen zunächst Versuche im Kleinbrandofen durchgeführt. Dabei wurden zwei Weichschotts, zwei Rohrmanschetten sowie eine unbelegte, mit Brandschutzschaum verschlossene, Öffnung in je einer Brettsperrholzwand, ohne und mit Beplankung (12,5 mm Rigips Feuerschutzplatte) untersucht. Die Versuche wurden bis zum Versagen eines der Kriterien E oder I durchgeführt. Die beplankte Wand erreichte eine Versuchsdauer von 121 Minuten. Grund für den Versuchsabbruch war ein Durchbrand im Bereich des Brandschutzschaums. Der unbeplankte Wandaufbau erreichte eine Versuchszeit von 91 Minuten.

In einem weiteren Vorversuch wurde der Anschluss einer unbeplankten Brettsperrholzdecke an eine bekleidete Schachtwand getestet. Nach einer Versuchsdauer von 121 Minuten war sowohl der Anschluss als auch die eingebauten Abschottungssysteme (Weichschott ohne Leibungsverkleidung, Rohrmanschette, Feuerschutzabschluss (Typ: FLI-VE \varnothing 125 mm)) noch funktionsfähig.

In einem Großbrandversuch wurde eine 3-lagige Brettsperrholzwand der Firma Stora Enso mit einer Dicke von 97 mm und einer zusätzlichen beidseitigen Beplankung mit je einer 12,5 mm dicken Rigips Feuerschutzplatte untersucht. In die Wand eingebaut waren

- Weichschotts, mit und ohne Leibungsbekleidung,
- Kunststoffrohre mit Rohrmanschetten,
- eine unbelegte Öffnung, verschlossen mit Brandschutzschaum,
- ein Feuerschutzabschluss (Typ:FLI-VE),
- eine Kabelbox,
- Kabel mit Brandschutzfugenmasse sowie
- eine Steckdose, Verteiler und Lichtschalter.

Die Versuchslaufzeit betrug 100 Minuten. Es kam zu keinem Versagen eines der Abschottungssysteme.

Ein Großbrandversuch an einer 5-lagigen, 165 mm dicken Brettsperrholzdecke der Firma Stora Enso, mit nahezu identischen Einbauten, erbrachte über eine Versuchsdauer von 105 Minuten ebenfalls positive Ergebnisse.

Empfehlungen werden für den Einbau von Abschottungen gegeben, welche in Bauteilen mineralischer Bauweise oder in Gipsständerbauweise geprüft wurden und in Bauteile in Holzmassiv- oder in Holzrahmenbauweise, mit einer entsprechenden Auswechslung eingebaut werden sollen. Die für die Anwendung in Holz spezifischen Hinweise werden im Folgenden wiedergegeben.

Weichschotts

- Einbau ohne Leibungsbekleidung: Die Leibung soll mit einer intumeszierenden oder ablativen⁷ Beschichtung versehen werden.
- Einbau mit Leibungsbekleidung: Ein vollflächiger Anschluss der Gipsbekleidung $\geq 12,5$ mm an die Öffnungsleibung ist herzustellen. Die Gipsverkleidung und der seitlichen Ränder der Mineralfaserplatte müssen mit intumeszierender oder ablativer Beschichtung bestrichen werden. Sollte die Verkleidung nicht vollflächig am Holz anliegen, so sind die Holzoberfläche und die Fuge zwischen Holz und Gipsverkleidung zusätzlich zu beschichten. Nicht scharfkantig ausgeführte Ecken sind anzupassen und ebenfalls zu beschichten.
- Die flächige Beschichtung der Mineralfaserplatte sollte mindestens 2 cm über die Fuge hinaus auf das umfassende Bauteil erweitert werden.

Rohrmanschetten

- Ein Ringspalt von ca. 10 mm ist mit Steinwolle auszustopfen, die Wolle ist zu verdichten und der Ringspalt in einer Tiefe von ≥ 15 mm mit einer intumeszierenden Brandschutzfüllmasse zu verfüllen.
- Die Rohrmanschette muss direkt im Massivholzbauteil befestigt werden. Die Befestigungstiefe soll dabei den größtmöglichen Abbrand um 10 mm überschreiten.
- Bei Wänden mit Vorsatzschalen ist die Manschette auf der Vorsatzschale anzubringen und in der Rohwand zu befestigen.

Streckenisolierungen Zur Abschottung von nichtbrennbaren Leitungen können klassifizierte Streckenisolierungen verwendet werden. Ein vorhandener Ringspalt kann mit Mineralwolle verstopft und entsprechend der Herangehensweise bei Rohrmanschetten in einer Tiefe von ≥ 15 mm mit intumeszierender Dichtmasse verfüllt werden. Auf eine ausreichende Länge der weiterführenden Dämmung in Abhängigkeit des Rohrwerkstoffs ist zu achten.

Abschottungen für Elektroleitungen Klassifizierte Abschottungen können unter Einhaltung der Regelungen aus den Nachweisen auch in Holzbauteilen verwendet werden. Dargestellt sind beispielsweise Abschottungen mit Brandschutzschaum und Weichschott.

Zu beachten ist, dass in Österreich, anders als in Deutschland, keine Bekleidung der Holzoberflächen hochfeuerhemmender Bauteile mit nichtbrennbaren Baustoffen (K₂60-Bekleidung) vorgeschrieben ist. Aus diesem Grund sind nach aktuell geltendem deutschen Baurecht diese Lösungsmöglichkeiten nicht direkt übertragbar. Weiterhin sind die genannten Regeln lediglich Vorschläge, die auf Grundlage der durchgeführten Versuche und der Erfahrungen der Projektbeteiligten beruhen, es handelt sich nicht um geltende Regeln. Anzumerken ist zudem, dass am beschriebenen Projekt starke Industrievertreter aus dem Bereich der Abschottungssystemhersteller als auch der Holzindustrie beteiligt waren.

Lignum Dokumentation Schweiz

Die Dokumentationen von Lignum allgemein und somit auch die hier betrachtete Lignum-Dokumentation Brandschutz Haustechnik - Installationen und Abschottungen [38] sind auf Übereinstimmung mit den schweizerischen Brandschutzvorschriften geprüft und dort als Stand

⁷ aufgrund chemischer Zusammensetzung bei Einwirkung hoher Temperaturen endotherm wirkend

4 Grundlagen zu Leitungsabschottungen

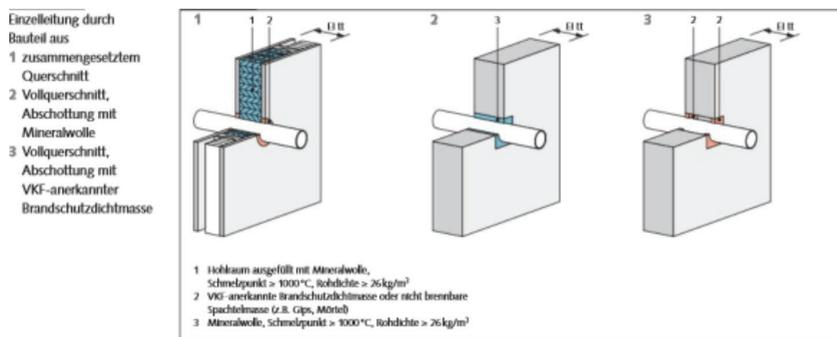


Abb. 4.3: Abschottung von Einzelleitungen nach Vorgaben der Lignum Dokumentation, entnommen aus [38]

der Technik anerkannt. Darin werden Ausführungsmöglichkeiten flächiger Abschottungen und Einzelabschottungen in Holzbauteilen beschrieben. Die Inhalte zu den flächigen Abschottungen wurden bereits in Unterabschnitt 3.1.4 beschrieben. In die so ausgeführten Öffnungen können in der Schweiz zugelassene Abschottungssysteme (z. B. Weichschotts oder Mörtelschotts) eingebaut werden.

Bei der Abschottung einzelner Leitungen in zusammengesetzten Querschnitten kann auf ein umlaufendes Füllholz und die Leibungsbekleidung verzichtet werden, wenn

- der Hohlraum zwischen den Beplankungen sowie Restöffnungen im Durchdringungsbereich mit Mineralwolle (Schmelzpunkt $\geq 1000^{\circ}\text{C}$) und Rohdichte $\geq 26 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ verschlossen ist, sowie
- der Abschluss der Durchdringung mit VKF-anerkannter Brandschutzdichtmasse oder nichtbrennbarer Spachtelmasse (z. B. Gips oder Mörtel) dicht verschlossen wird.

Bei Bauteilen aus Vollholzquerschnitten kann auf eine Bekleidung der Leibung ebenfalls verzichtet werden, wenn

- Restöffnungen im Durchdringungsbereich mit Mineralwolle (Schmelzpunkt $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ und Rohdichte $\geq 26 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) verschlossen ist oder
- die Durchdringung beidseitig mit VKF-anerkannter Brandschutzdichtmasse oder nichtbrennbarer Spachtelmasse (z. B. Gips oder Mörtel) dicht verschlossen wird.

Die beschriebenen Varianten werden in Abb. 4.3 dargestellt.

Untersuchungen von FPIInnovations

Die kanadische Organisation FPIInnovations, welche auf wissenschaftliche Untersuchungen rund um die Forstindustrie spezialisiert ist, hat Leitungsabschottungen in massiven Holzbauteilen untersucht [144, 145]. Grundlage stellte die Annahme dar, dass sich Abschottungen in massiven Holzbauteilen ähnlich wie in massiven Betonbauteilen verhalten. Diese Annahme wurde in einem Versuch [145] mit einer 3-lagigen, unbeplankten Brettsperrholzwand mit einer Dicke von 99 mm in Verbindung mit Rohren aus Gusseisen, Stahl und Elektroinstallationsrohren bestätigt. Es kam zu keinem Versagen des Raumabschlusses, allerdings wurden auf den Rohroberflächen auf der unbeflammten Seite hohe Temperaturen festgestellt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten zum überschreiten des Wärmedämmkriteriums nach DIN EN 1366-3 [11] führen würden.

Weiterhin hat der „American Wood Council“ erfolgreich Versuche mit beplankten Brettsperrholzkonstruktionen durchgeführt. In der Versuchsreihe von FPInnovations wurden die Parameter Rohrmaterial (Metall oder Kunststoff), Ringspaltgröße, Abstände und Exzentrizität der Durchführung im Bohrloch untersucht. Für die Versuche wurde 5-schichtiges Brettsperrholz ohne eine Beplankung verwendet. Die Ringspalte um die nichtbrennbaren Rohre wurden bis zu einem Abstand von 13 mm von der unbeflammten Seite mit Mineralwolle verstopft. Der Rest des Ringspalts wurde mit einer intumeszierenden Brandschutzfüllmasse verschlossen, um den Rauchdurchtritt zu vermindern. Die Rohre wurden exzentrisch eingebaut. Die brennbaren Rohre wurden jeweils ein- oder zweilagig an zwei Stellen des Rohrs mit intumeszierenden Bandagen umwickelt. Die brennbaren Rohre waren in den Öffnungen zentriert. Auch wurde die Verwendung eines Stahl-Hüllrohrs untersucht. Die Ringspalte wurden entsprechend denen der nichtbrennbaren Rohre verschlossen. Auch der Ringspalt zwischen Kunststoffrohr und Hüllrohr wurde mit intumeszierender Dichtmasse verschlossen.

In Kanada wird bei einem sogenannten „F-rating“ nur beurteilt, ob keine Flammen auf der unbeflammten Seite auftreten. Beim „FT-rating“ wird zusätzlich beachtet, dass die Temperaturen auf der unbeanspruchten Seite nicht um mehr als 181 °C ansteigen. Zusätzlich kann für das „H-rating“ ein sogenannter „hose stream test“ notwendig werden. Dabei wird ein identischer Probekörper nach der halben Prüfzeit der Beflammung entzogen und mit einem definierten Wasserstrahl abgelöscht, wobei sich keine Öffnungen ergeben dürfen, die Wasser durchdringen lassen.

Nach einer Brandbeanspruchung von zwei Stunden, welche für eine 1,5 Stunden-Klassifizierung notwendig ist, konnten keine Flammen auf der unbeanspruchten Seite sowohl bei Metall- als auch bei Kunststoffrohren beobachtet werden. Die meisten der Metallrohrdurchführungen erreichten ein 1,5 Stunden-F-rating nach ASTM E814 [146]. Zwei Abschottungen bestanden den „hose stream test“ nicht. Anzumerken ist, dass der „hose stream test“ nach zwei Stunden Brandbeanspruchung, statt nach einer Stunde, wie die Norm vorgibt, durchgeführt wurde. Weiterhin ergaben sich bei den Kupferrohrdurchführungen höhere Temperaturen zu früheren Versuchszeiten im Vergleich zu Gusseisenrohren. Bei der Verwendung von Kupferrohren für Versuche werden daher konservative Ergebnisse erzielt. Es konnte eine stärkere Verkohlung des Holzes bei unisolierten Kupferrohren bei kleineren Abständen der Durchführungen festgestellt werden. Bei einem Abstand von 102 mm war das komplette Holz zwischen den Durchführungen verkohlt. Dennoch entstanden keine Flammen und das verkohlte Holz bestand den „hose stream test“. Die Kunststoffrohrdurchführungen erreichten alle mindestens ein FH-rating nach CAN/ULC-S115 [147]. Es konnte ein unterschiedliches Verhalten der Rohre beobachtet werden - Deformierung bei PEX Rohren und Zerbrechen und Abscheren der PVC Rohre. Das „T-Kriterium“ wurde nur in einigen Fällen erfüllt. Um den Temperaturanstieg zu begrenzen, wären weitere Versuche zur Optimierung der Abschottungen notwendig. Zusammenfassend werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Hauptsächlich muss die Abschottung die Erwärmung durch das Rohr soweit verhindern, dass die Verkohlung im Bereich um die Durchführung der Verkohlung von Bereichen entspricht, die nicht durch die Leitungsdurchführung beeinflusst sind.
- Metallrohre:
 - Verfüllung des maximal 25 mm breiten Ringspalts mit Mineralwolle bis 13 mm unter die BSP Oberfläche. Verfüllung des Restraumes mit intumeszierender Dichtmasse.
 - Bei einem Ringspalt von 25 mm ist eine Exzentrizität von 13 mm akzeptabel.
 - Der Rohr-zu-Rohr-Abstand muss mindestens 102 mm betragen.

- Kunststoffrohre:
 - Ringspaltverfüllung entsprechend der der Metallrohre
 - Für Rohrdurchmesser ≥ 51 mm sollten eine oder zwei Schichten intumeszierenden Bandes um die Leitung, die von einem Stahl-Hüllrohr umschlossen ist, gewickelt werden.
 - Für Rohrdurchmesser zwischen 25 mm und 76 mm war die Umwicklung an zwei Stellen mit je einer Lage eines intumeszierenden Bandes ausreichend.

Die Ergebnisse der Versuche der kanadischen Forscher können aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und Prüfverfahren des kanadischen und des deutschen Prüf- und Klassifizierungssystems nur bedingt übertragen werden.

Produkt-spezifische Herstellerinformationen

Einige Hersteller von Abschottungsprodukten haben bereits Prüfungen mit Produkten in einzelnen Holzbauteilen durchgeführt und konnten diese Bauteile teils in die betreffende Bauartgenehmigung oder das Prüfzeugnis aufnehmen [148–155]. Diese bestandenen Klassifizierungsprüfungen zeigen, dass Abschottungssysteme in Holzbauteilen leistungsfähig sind, können jedoch nur auf einzelne Fälle angewendet werden (siehe dazu Abschnitt 5.1).

4.3 Zwischenfazit

Es existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Leitungsabschottungen, die auf verschiedenen Wirkmechanismen beruhen. Die Prüfung und Klassifizierung ist aufgrund der Vielfältigkeit der Abschottungen, Leitungsarten und Bauteile, die im Zusammenspiel bewertet werden müssen, ein komplexes Thema. Die Prüfnorm enthält keine Normtragkonstruktion für die Prüfung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen. Aus diesem Grund müssen Leitungsabschottungen - sollen sie in Holzbauteilen angewendet werden - in jedem einzelnen Bauteil geprüft werden. Eine Extrapolation von Prüfergebnissen ist derzeit nicht möglich.

Um kostspielige Brandprüfungen zu umgehen wird derzeit in Deutschland meist an der Stelle der Leitungsdurchführung in Holzbauteilen ein nichtbrennbarer, mineralischer Baustoff eingesetzt und die Leitungen darin, unter einer, in aller Regel als nicht wesentlich bewerteten, Abweichung vom Anwendbarkeitsnachweis, abgeschottet. Diese Lösung bringt Nachteile mit sich und stellt somit ein Hemmnis für den Holzbau dar.

Die Ergebnisse von Forschungsarbeiten zeigen, dass viele traditionelle Abschottungssysteme in Holzbauteilen anwendbar sind. Vor allem in massiven Holzkonstruktionen erbringen die Systeme ihre Leistungsfähigkeit. Auch die Durchführung einzelner nichtbrennbarer Rohrleitungen sowie von Einzelkabeln und kleinen Kabelbündeln ohne klassifizierte Abschottungssysteme ist möglich. Die Temperaturen auf den Leitungen auf der brandabgewandten Seite müssen dabei, vor allem bei metallischen Rohrleitungen, Beachtung finden. Deutschland nimmt bei der Vorgehensweise zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen eine Sonderstellung ein, da hochfeuerhemmende Holzbauteile derzeit im Regelfall eine nichtbrennbare Bekleidung aufweisen müssen. Dennoch sind die wenigen vorhandenen, für den Holzbau zugelassenen, Abschottungssysteme kein speziell nationales Problem. Ausnahmen in Form von Produkten einzelner Hersteller, die für die Anwendung in bestimmten Holzbauteilen zugelassen sind, sind auf dem Markt bereits erhältlich.

5 Alternativer Ansatz zur Anwendung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen

Die derzeitige Vorgehensweise bei der Anwendung von Leitungsabschottungen im Holzbau ist nicht auf den Holzbau zugeschnitten und stört den Bauablauf. In diesem Kapitel soll eine neuartige Herangehensweise erarbeitet werden, die eine auf den Holzbau angepasste Lösung darstellt und somit den Holzbau fördert.

5.1 Mögliche alternative Ansätze

Die gegenwärtig meist angewendete Methode zur Anwendung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen bringt Nachteile mit sich (vgl. Abschnitt 4.2.1). Aus den Ergebnissen vergangener Untersuchungen kann gefolgert werden, dass viele unterschiedliche Abschottungssysteme auch in Holzbauteilen einsetzbar sind (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Zudem können geeignete Wirkmechanismen von Abschottungssystemen für den Werkstoff Holz aus bisherigen Tests abgeleitet werden. Jedoch lassen sich aus den Ergebnissen keine allgemeingültigen Verfahrensregeln zusammenfassen bzw. ableiten, die eine sichere direkte Anwendung von Abschottungen in Holzkonstruktionen aufgrund vorhandener Versuchsergebnisse ermöglichen. Es kann gefolgert werden, in welcher Weise ein Abschottungssystem in ein Holzbauteil eingebaut werden muss, sodass die erforderliche Prüfung in diesem Bauteil bestanden werden kann. Es wird dadurch jedoch nicht vermieden, dass Abschottungssysteme, die in unterschiedlichen Holzkonstruktionen Anwendung finden sollen, auch in jeder einzelnen dieser Konstruktionen zu prüfen sind.

Dies führt aufgrund der Vielzahl an verwendeten Holzkonstruktionen (vgl. Unterabschnitt 3.1.2) zu einem großen Prüfaufwand für Abschottungshersteller, da für eine generelle Anwendbarkeit eines Abschottungssystems X Produkte in je Y Holzkonstruktionen zu prüfen sind. Daraus ergeben sich zunächst $X \cdot Y$ Prüfungen, sofern Produkte nicht gemeinsam geprüft werden. Daher ist eine Vorgehensweise zu finden, mit der der Prüfaufwand zur Anwendung von Abschottungssystemen in Holzkonstruktionen bei gleichbleibendem Sicherheitsniveau reduziert werden kann. Im Folgenden werden unterschiedliche mögliche Vorgehensweisen dargestellt und diskutiert.

Ableiten der Anwendbarkeit aus vergangenen Prüfungen in nichtbrennbaren Baustoffen

Die bestmögliche Lösung wäre eine Systematik zu finden, mit der ohne eine weitere Brandprüfung, festgestellt werden kann, ob Abschottungen, die für Beton bzw. Trockenbau zugelassen sind, auch in Holzbauteilen angewendet werden können.

Hinderlich dabei ist die unüberschaubare Zahl von unterschiedlichen Holzwand- und Deckenaufbauten. Obwohl sich diese oft nur in Details unterscheiden, können genau diese Details zur Leistungsfähigkeit oder Versagen eines Abschottungssystems führen. Zudem führt der Abbrand von Holzkonstruktionen und die im Allgemeinen geringere Wärmeleitfähigkeit von Holz im Vergleich zu mineralischen Baustoffen dazu, dass die Temperaturen auf den Leitungen bei der Durchführung durch Holzbauteile höher sein können als bei der Durchführung durch Beton- oder Trockenbaukonstruktionen. Weiterhin gibt es sehr viele Einflussparameter im Abschottungssystem selbst, die Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer Abschottung innerhalb des Bauteils nehmen. Auch an dieser Stelle sind aufgrund unterschiedlicher Geometrien und der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der eingesetzten Materialien, die je nach

Hersteller stark variieren, unüberschaubar viele Varianten möglich. Es ergibt sich beim Einbau von Abschottungssystemen in Holzbauteile eine Schnittstelle zwischen zwei Variablen mit sehr unterschiedlichen Parametern mit unbekanntem Einfluss aufeinander. Da diese Zusammenhänge noch nicht weit genug erforscht sind, ist es mit dem derzeitigen Wissensstand nicht möglich, eine Systematik zu entwickeln, die eine Beurteilung der Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Holzkonstruktionen aufgrund der Prüfergebnisse in nichtbrennbaren Bauteilen zulässt. Invertiert man diesen Ansatz allerdings, wäre eine Ableitung der Leistungsfähigkeit nicht ausgeschlossen. Die Prüfergebnisse von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen könnten zur Beurteilung ihrer Anwendbarkeit in nichtbrennbaren Bauteilen herangezogen werden. Aufgrund der Beständigkeit der nichtbrennbaren Konstruktionen im Brandfall und der im Allgemeinen höheren Wärmekapazitäten bzw. Wärmeleitfähigkeiten (größere Wärmesenke) der nichtbrennbaren Baustoffe (Beton, Stahl, Gipswerkstoffplatten) bieten diese mehr Spielraum zur Erfüllung der Leistungskriterien und Versuchsergebnisse darin sind besser einzuschätzen, auch aufgrund jahrelanger Prüferfahrung. Zur Anwendung dieser Systematik sind zunächst allerdings Vorgaben notwendig, die die Prüfungen von Abschottungssystemen in Holz eindeutig regeln und zu vergleichbaren und damit erweiterbaren Ergebnissen führen. Wie die Regelungen zur Erweiterung der Prüfergebnisse aussehen könnten, ist in zukünftigen Betrachtungen zu behandeln, die anzustellen sind, sobald ausreichend viele Prüfergebnisse von Abschottungssystemen in Holzbauteilen vorliegen.

Erweiterung der Ergebnisse anhand von Konstruktionseigenschaften

Die Prüfnorm für Leitungsabschottungen DIN EN 1366-3 [131] gibt Normtragkonstruktionen in Massivbauweise und Ständerbauweise vor. Prüfergebnisse, die in diesen Konstruktionen erzielt werden, sind nach Regeln der Norm (wie z. B. größere Bauteildicke, höhere Betonfestigkeit) auf andere Bauteilaufbauten erweiterbar. Die Einführung von Holznormtragkonstruktionen und darauf aufbauend die Möglichkeit der Extrapolation der Prüfergebnisse entsprechend formulierter Regeln, wäre ein erster großer Schritt zur Minimierung des Prüfaufwands bei Leitungsabschottungen in Holzbauteilen.

Es könnten grundlegende Konstruktionen, wie Brettspertholzkonstruktionen und Holzständerkonstruktionen als Normtragkonstruktionen definiert werden und zunächst einfache geometrieabhängige Regeln zur Erweiterung des Anwendungsbereichs der Versuchsergebnisse geschaffen werden. Mit zunehmender Prüferfahrung könnten diese verfeinert werden. Bei Holzrahmenkonstruktionen kann evtl. eine Abhängigkeit von der Dicke der Beplankungen und deren Abbrandrate sowie Dämmschichtdicke bzw. Hohlraumabmessungen gefunden werden. Bei massiven Holzkonstruktionen oder Konstruktionen mit massiven Anteilen, wie Brettschichtholz oder Brettspertholz, könnte eine Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Abbrandrate, die vor allem von Holzart, Art der Verklebung und Lamellendicke (siehe dazu Unterabschnitt 3.2.4) abhängt, gefunden werden. Derzeit wurden allerdings erst wenige Abschottungssysteme in Holzbauteilen geprüft. Zudem sind die Konstruktionen, in denen geprüft wurde, sehr unterschiedlich. Die Ergebnisse sind derzeit schlecht vergleichbar und Schlussfolgerungen können kaum gezogen werden. Auch diese Herangehensweise bedarf daher zunächst weiterer strukturierter Prüfungen sowie eine Anpassung der betreffenden Prüfnormen und kann erst zukünftig erarbeitet werden.

Abschottung innerhalb definierter Module aus Holz - Verstetigung der Schnittstelle

Im Forschungsprojekt „LeitHolz“ [98] wurde eine neuartige Methode zur Abschottung von Leitungsdurchführungen im Holzbau erdacht und deren Anwendbarkeit nachgewiesen. Entstanden ist die Methode „Holz-in-Holz“. Dabei wird in Holzbauteile, durch die abzuschottende Leitungen geführt werden, ein massives Holzbauteil mit definierten Eigenschaften (folgend als Holzmodul bzw. Modul bezeichnet) eingesetzt, in welches die Abschottungen eingebaut werden. Das Vorgehen ist in Abb. 5.1 dargestellt.

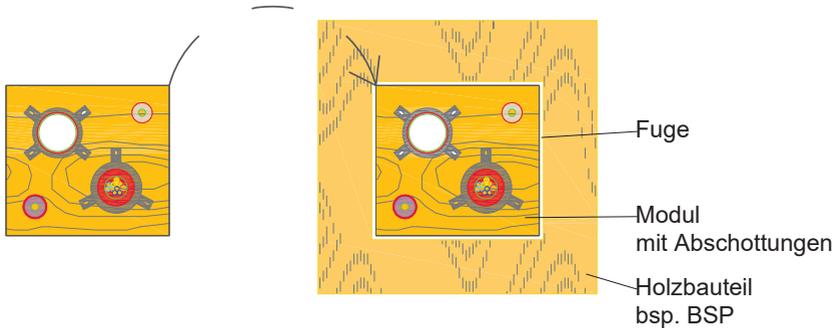


Abb. 5.1: Darstellung der Vorgehensweise bei der Methode „Holz-in-Holz“

Das Modul selbst besteht aus Brettschichtholz und ist so beschaffen und dimensioniert, dass gängige Abschottungssysteme, teils unter geringfügigen Modifikationen, darin anwendbar sind. Abschottungssysteme sollen einmalig in diesem Modul geprüft werden und anschließend, darin eingebaut, in unterschiedlichen Holzkonstruktionen angewendet werden können. Auf diese Weise wird der Prüfaufwand auf die Anzahl zu prüfenden Abschottungssysteme (X) verringert, da die Abschottungssysteme nur in einem einzigen Holzaufbau geprüft werden müssen (vgl. Abschnitt 5.1). Die Holzmodule können mit standardisierten Anschlussausführungen an die unterschiedlichen Holzkonstruktionen angeschlossen werden oder es erfolgt eine Prüfung, die einen Anschluss des Moduls an eine spezifische Konstruktion nachweist. Diese Schnittstelle ist deutlich einfacher zu realisieren, da das Modul eine Konstante darstellt. So werden nicht zwei variierende Bauteile aneinander angeschlossen, sondern lediglich je ein variierendes Produkt bzw. Bauteil mit dem gleichbleibenden Modul verbunden. Zudem kann strukturiert Erfahrung in der Prüfung von Leitungsabschottungen in gleich aufgebauten Holzbauteilen gesammelt werden, um in Zukunft neue Wege (zuvor beschrieben) bei der Prüfung und Zulassung zu gehen. Aufgrund der definierten Eigenschaften der Module können unterschiedliche auftretende Effekte klar auf die Eigenschaften der jeweils geprüften Abschottungssysteme zurückgeführt werden.

5.2 Die Methode „Holz-in-Holz“

Drei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verbesserung der Anwendung von Leitungsabschottungen im Holzbau wurden vorgestellt. Die beiden erstgenannten Varianten können derzeit noch nicht angewendet werden, da weitere Kenntnisse über das Verhalten von Abschottungssystemen in Holzbauteilen notwendig sind. Von daher ist zunächst die letztgenannte Variante anzustreben, und zwar die Abschottung innerhalb definierter Module aus Holz. Im Folgenden werden Vor- und Nachteile der Methode sowie notwendige Schritte zu deren Anwendbarkeit beschrieben.

5.2.1 Vorteile der Methode

In diesem Abschnitt sollen nicht nur die Vorteile der Methode gegenüber der konventionellen Vorgehensweise beschrieben werden, sondern auch die Vorteile gegenüber dem denkbaren direkten Einbau der Abschottungen in Holzwände oder -decken.

Durch die Methode „Holz-in-Holz“ können alle Arbeiten an den Bauteilen, durch die Leitungen hindurchgeführt werden sollen, vom selben Gewerk bearbeitet werden. Holzmodule können vorgefertigt und auf der Baustelle, oder direkt beim Hersteller, eingesetzt werden. Zudem kön-

nen nachträglich, unter geringem Aufwand, weitere Bohrungen im Modul erfolgen. Durch den Einsatz von Holzmodulen entfällt der Koordinationsaufwand, der zwischen den verschiedenen Gewerken durch den Einsatz mineralischer Baustoffe im Durchführungsbereich entsteht. Zudem können weiterführende Arbeiten zur Abschottung nicht direkt am frisch betonierten Öffnungsverschluss erfolgen, der Beton muss eine definierte Zeit (üblicherweise ein bis zwei Tage) aushärten. Durch die Verwendung von Holzmodulen im Bereich der Abschottung ergibt sich kein Werkstoffwechsel, was optische Vorteile impliziert. Es entsteht zwar eine Fuge zwischen Modul und Wandbauteil, eine etwaige sichtbare Holzoberfläche kann aber auch im Bereich der Abschottung fortgeführt werden. Zudem kann durch die Verwendung von Holz anstelle von Beton zusätzlicher Ausstoß von CO₂ vermieden werden.

Für Hersteller von Abschottungen ergibt sich die Möglichkeit mit der Prüfung der Abschottungsprodukte in einem einzigen Modulaufbau, eine Zulassung der Produkte für alle sich auf dem Markt befindlichen Holzbauteile zu erlangen, weil sich das Modul in jedes Holzbauteil einsetzen lässt. Ein ähnlicher Vorteil ergibt sich für die Holzindustrie. Die Module können entweder mit Hilfe bestimmter Anschlussbedingungen im Bereich der Öffnungsleibung eingesetzt werden oder ein spezieller Anschluss der Module kann geprüft werden. Die eingesetzten Module ermöglichen die Verwendung aller im Modul geprüften und zugelassenen Abschottungssysteme in den Holzbauteilen. Weiterhin ergibt sich durch die gleichbleibenden, definierten Eigenschaften der Module die Möglichkeit Regeln zur Leitungsdurchführung durch die Module ohne die Anwendung eines klassifizierten Abschottungssystems (in Anlehnung an die Erleichterungen der MLAR) zu erarbeiten (siehe dazu Abschnitt 2.2.2 sowie Abschnitt 7.1).

Die Methode soll vor allem ökologische und ökonomische Aspekte des Holzbaus durch Zeiterparnis, Gewerktreue und vermehrte Holzverwendung unterstützen.

5.2.2 Limitationen

Bei der Methode „Holz-in-Holz“ werden Holzmodule in Holzkonstruktionen eingesetzt. Die Holzmodule haben definierte Eigenschaften. Beim Einbau in diese Module ist die Funktionsfähigkeit der Abschottungen nachgewiesen. Aus zulassungstechnischen Gründen ist es (nach derzeitigen Gegebenheiten) notwendig, immer ein Holzmodul mit den Eigenschaften zu verwenden, die auch das Holzmodul hatte, in dem die Prüfung stattgefunden hat. So können sich beispielsweise Fälle ergeben, bei denen in eine Wandkonstruktion ein Holzmodul eingesetzt wird, dessen Eigenschaften sehr ähnlich zu denen des Wandbauteils sind. An dieser Stelle kann in der Praxis die Frage auftauchen, warum ein nahezu identisches Holzmodul in ein Bauteil eingesetzt werden muss, wenn die Vermutung nahe liegt, dass die Abschottung ihre Wirkung auch direkt im Bauteil eingebaut erbringen könnte. Dieser Ansatz ist nicht von der Hand zu weisen, muss aber relativiert werden, da unklar ist, an welcher Stelle die Grenze zwischen ähnlichen und nicht ähnlichen Aufbauten zu ziehen ist. Sobald ausreichende Prüferfahrung vorliegt, können Regeln erarbeitet werden, um Prüfergebnisse auch auf andere Modulaufbauten/Holzbauteile übertragen zu können (siehe S. 70). Die Übertragung der Ergebnisse auf Module mit nachweislich günstigeren Eigenschaften kann nach Einzelfallentscheidung bereits heute erfolgen.

Ein weiterer Nachteil der Verwendung von Holzmodulen ist die Brennbarkeit des Holzes. Durch die Verwendung eines brennbaren Baustoffs im Abschottungsbereich ergeben sich bei der Abschottung teilweise Schwierigkeiten, die bei der Verwendung eines Moduls aus nichtbrennbaren Baustoffen nicht zum Tragen kommen würden. Denkbar wäre beispielsweise ein Aufbau aus Platten auf Gipsbasis und Steinwolle, der einer Trockenbauwand ähnelt. Entfallen würden auf diese Weise allerdings teilweise die Vorteile, die sich durch den Verleib beim gleichen Werkstoff ergeben. Zudem lassen übliche nichtbrennbare Baustoffe, deren Verwendung in Frage käme, bei ihrer Herstellung CO₂ entstehen.

Weiterhin ergibt sich eine neue Schnittstelle zwischen Holzmodul und umgebender Konstruktion. Die Ausführung dieser Schnittstelle muss für verschiedenartige Wand- und Deckenaufbauten

beschrieben werden. Die Ausführung dieses Details ist allerdings aufgrund der Definiertheit des Moduls als deutlich einfacher anzusehen als der Einbau variabler Abschottungen in unterschiedliche Holzbauteile.

5.2.3 Notwendige Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Methode „Holz-in-Holz“

Im vorherigen Abschnitt wurde die Methode „Holz-in-Holz“ beschrieben und begründet, warum diese Methode beim vorliegenden Stand der Wissenschaft die Methode ist, die angewendet werden sollte. Untersuchungen von [36] und [37] haben gezeigt, dass Abschottungen auch in Holzbauteilen ihre Leistung erbringen können. Da diese Ergebnisse allerdings nicht auf beliebige Holzaufbauten übertragen werden können, ist die Anwendbarkeit der Abschottungssysteme auch für die zu definierenden Holzmodule nachzuweisen. Zunächst ist durch theoretische Überlegungen und bestätigende Brandversuche ein Holzmodul zu finden, welches sich für den Einbau von Abschottungssystemen eignet. Häufig werden nur einzelne Leitungen durch Bauteile geführt. Um die Baukosten nicht unangemessen zu steigern, sollen auch in Holzbauteilen sichere Einzeleitungsdurchführungen, in Anlehnung an die Erleichterungen der MLAR, ermöglicht werden, die ohne eine klassifizierte Abschottung ausgeführt werden können. Notwendige Abstände zwischen Durchführungen sind in Holzbauteilen aufgrund der Brennbarkeit des Baustoffs gesondert zu betrachten. Mindestabstände für benachbarte Abschottungen, für die der Abstand untereinander nicht geprüft ist, müssen festgelegt werden. Da die Holzmodule in unterschiedliche Holzkonstruktionen eingesetzt werden sollen, ist der Anschluss der Module an unterschiedliche Bauteile zu beschreiben. Zuletzt muss die Methode formal innerhalb Technischer Baubestimmungen verankert werden.

Zusammenfassend ist die Untersuchung folgender Punkte erforderlich:

- Ein Holzmodul, in dem viele typische Abschottungssysteme ihre Leistung erbringen können, ist zu definieren.
- Die Anwendbarkeit typischer klassifizierter Abschottungssysteme im Holzmodul ist zu zeigen.
- Regeln für die sichere Durchführung einzelner Leitungen sind zu beschreiben.
- Notwendige Mindestabstände zwischen Abschottungen bzw. Durchführungen sind zu definieren.
- Der Anschluss des Moduls an die umgebende Konstruktion ist zu beschreiben.
- Implementierbarkeit der Methode über Technische Baubestimmungen

Das Forschungsprojekt LeitHolz bildete die Grundlage der Untersuchungen. Darin wurde ein passendes Holzmodul identifiziert und gezeigt, dass Leitungsabschottungen darin wirksam eingesetzt werden können. Auch konnte die Anwendbarkeit der gesamten Methode an zwei Großbrandversuchen, bei denen Holzmodule mit abgeschotteten Durchführungen in zwei unterschiedliche Holzwandkonstruktionen eingesetzt wurden, belegt werden. Darauf aufbauend wurden weitere Versuchsreihen durchgeführt. Die Durchführung einzelner Leitungen, angelehnt an die Erleichterungen der Muster-Leitungsanlagenrichtlinie, in Holzmodulen mit unterschiedlichen Dichtmitteln sowie ohne Dichtmittel in passgenauen Bohrungen wurde untersucht. Auf Grundlage letzterer Versuchsergebnisse wurde ein FE-Simulationsmodell erstellt. Damit wurde der Abbrand um den Durchführungsbereich einzelner Leitungen untersucht. Unterschiedliche Fugenausbildungen wurden in kleinmaßstäblichen Brandversuchen untersucht. Zudem wurden weitere Fugenausführungen aus der Literatur einbezogen. Zur Ausführung der Öffnungsleitung wurden unterschiedliche Varianten theoretisch betrachtet.

Folgend werden die durchgeführten Versuchsreihen beschrieben, begründet und die jeweiligen Ergebnisse dargestellt. Bei den Untersuchungen, die das Forschungsprojekt LeitHolz betreffen, wird in großen Teilen auf den Abschlussbericht des Forschungsvorhabens verwiesen [98]. Einige Teile werden hier, zur besseren Verständlichkeit dieser Arbeit, erneut beschrieben.

5.3 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde unter Berücksichtigung der dargestellten Grundlagen theoretisch eine neue Herangehensweise zur Anwendung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen erarbeitet. Dazu wurden unterschiedliche Varianten beschrieben, von denen nur eine mit dem derzeitigen Kenntnisstand realisierbar ist: Die Methode „Holz-in-Holz“. Vorteile und limitierende Faktoren dieser Methode wurden aufgezeigt. Abschließend wurde dargestellt, welche weiteren Untersuchungen notwendig sind, um diese Methode zukünftig zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen anwenden zu können. Die dazu durchgeführten Untersuchungen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

6 Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Abschottungssystemen in Holzmodulen

Die in diesem Kapitel enthaltenen Untersuchungen und Ergebnisse stellen Inhalte des Forschungsprojekts „Leitungsdurchführungen im Holzbau - LeitHolz“ dar. Detaillierte Angaben können dem Abschlussbericht [98] entnommen werden. Die hier wiederholten Inhalte sind relevant für diese Arbeit.

Zunächst wurde eine Vorversuchsreihe durchgeführt, um einen passenden Modulaufbau zu finden und Versagensmechanismen von Abschottungen in Holzbauteilen zu identifizieren. Generell ist im Holzbau zwischen einer massiven Bauweise und einer hohlraumbehafteten Bauweise zu unterscheiden. Die Hohlräume können dabei mit Dämmstoffen gefüllt sein. Entsprechend beschaffen waren die untersuchten Module. In Versuchen mit einer möglichst langen Versuchsdauer sollten mögliche Versagensmechanismen für nichtbrennbare Bauteile zugelassener Abschottungen in den Holzmodulen identifiziert werden. Der besser geeignete Modulaufbau sollte ermittelt und gegebenenfalls im Anschluss optimiert werden.

Weiterhin sollte in dieser Vorversuchsreihe eruiert werden, welche der untersuchten Abschottungssysteme sich generell für den direkten Einsatz in Holzbauteilen eignen. Direkt meint dabei ohne die Ausführung einer klassifizierten Öffnungsleibung im Sinne der Musterholzbaurichtlinie und ohne die Substitution des Holzes durch Beton oder andere nichtbrennbare Baustoffe an der Stelle der Leitungsdurchführung. Eine Vorauswahl wurde Anhand einer Literaturrecherche (vgl. vor allem Unterabschnitt 4.2.2) und Überlegungen hinsichtlich der Wechselwirkungen der Funktionsweise der Abschottungen mit den auftretenden Besonderheiten beim Einbau bzw. Einsatz in Holz getroffen. Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Abschottungssystemen werden vor allem in Bezug auf die Brennbarkeit des Baustoffs sowie dessen im Vergleich zu Beton erheblich niedrigeren Wärmeleitfähigkeit gesehen.

6.1 Modulaufbau

Bei der Wahl der Bestandteile der Modulaufbauten wurde auf industriell gefertigte Holzwerkstoffe zurückgegriffen. Auf diese Weise lassen sich die Eigenschaften des inhomogenen Werkstoffs besser kontrollieren und reproduzieren als bei Vollholz. Zudem können beliebige Dimensionen der Bauteile erreicht werden. Untersucht wurde zum einen ein massiver, hohlraumfreier Modulaufbau, zum anderen ein Schichtaufbau aus Holzwerkstoffplatten und Dämmschichten. Die Größe der Module ergab sich aus der vorhandenen Wandöffnung im Kleinbrandofen der TU Kaiserslautern und wurde somit auf 440 mm · 440 mm festgelegt. Der Wandeinbau wurde gewählt, da dort im Normalfall symmetrisch angeordnete Abschottungsmaßnahmen notwendig werden. Zudem wirkt das Eigengewicht der Leitungen im Durchführungsbereich eher auf die Abschottungen ein als beim Deckeneinbau.

Beim massiven Modulaufbau (Abb. 6.1) musste zunächst die Art des Holzwerkstoffs, der verwendet werden sollte, bestimmt werden. Gewählt wurde Brettschichtholz (siehe dazu Abb. 3.4) aus Fichtenholz. In Unterabschnitt 3.2.4 wurde beschrieben, dass Brettschichtholz ein sehr ähnliches Abbrandverhalten wie Vollholz aufweist. An den Leimfugen kann es zu erhöhtem Einbrand kommen. Durch die senkrecht zur beflamten Oberfläche angeordneten Fugen kommt es nicht zur Delamination verkohlter Schichten. Die Fugen sind allerdings durchgehend durch das Bau-

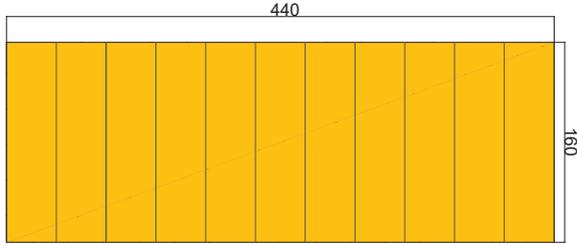


Abb. 6.1: Aufbau des BSH-Moduls

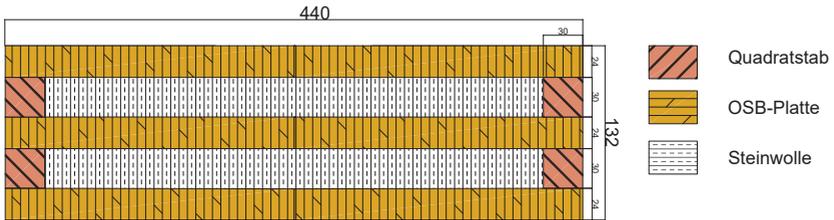


Abb. 6.2: Aufbau des OSB-Moduls

teil angeordnet. Fichtenholz stellt das am häufigsten verwendete Bauholz dar und soll daher auch für die Module verwendet werden.

Für das in Schichten aufgebaute Modul wurden OSB-Platten und Steinwolle verwendet (siehe Abb. 6.2). OSB-Platten weisen zwar ein geringfügig schlechteres Abbrandverhalten als Spanplatten auf (siehe Unterabschnitt 3.2.4), sind dafür im Kaltzustand allerdings formstabiler und beständiger gegen Feuchtigkeit und werden im Holzbau häufig als Bekleidung von Holzrahmenkonstruktionen verwendet.

Die Modulaufbauten bzw. Dimensionen wurden so gewählt, dass sie bei einseitiger Brandbeanspruchung eine Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten erreichen können und eine Leistungsreserve zur Aufrechterhaltung von Raumabschluss und Wärmedämmung verbleibt. Im Bereich einer Leitungsdurchführung ist teilweise mit einem erhöhten Abbrand zu rechnen. Grundlage dafür bildete die Annahme, dass eine OSB-Platte (24 mm) eine Konstruktion erfahrungsgemäß ca. 25 min bis 30 min (vgl. auch Anhang E des Eurocodes 5: $t_{ins,0} = 1,1h_p \rightarrow t_{ins,0(OSB)} = 24 \text{ mm} \cdot 1,1 = 26,4 \text{ min}$) bei einem Brand schützen kann. Die Berechnung des Raumabschlusses nach Eurocode 5 ist nur für Feuerwiderstandsdauern von bis zu 60 Minuten anzuwenden und kann somit nicht als orientierende Größe für diesen Anwendungsfall herangezogen werden. Folgender Schichtaufbau wurde verwendet.

1. OSB-Platte 24 mm
2. Steinwollgedämmung 30 mm
3. OSB-Platte 24 mm
4. Steinwollgedämmung 30 mm
5. OSB-Platte 24 mm

Somit ergab sich eine Gesamtdicke des Aufbaus von 132 mm. Zwischen den OSB-Platten wurde ein Rahmen aus umlaufenden Füllhölzern 30 mm · 30 mm hergestellt. Die Steinwolleplatten wurden dazwischen eingelegt.

Beim BSH-Modul wurde ein verbleibender Restquerschnitt von ca. 80 mm nach 120 min Beflammung angestrebt (vgl. Mindestdicke für ein feuerbeständiges Bauteil bei Erleichterungen nach MLAR in Abschnitt 2.2.2). Bei einer Abbrandrate von $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ergibt sich nach 120 Minuten ein Abbrand von 84 mm. Dies würde zu einem Restquerschnitt von 160 mm – 84 mm = 76 mm führen. In Unterabschnitt 3.2.4 wurde beschrieben, dass sich die Abbrandrate bei langen Branddauern verringert. Daher ist nach 120 Minuten Branddauer von einem verbleibenden Restquerschnitt von mehr als 80 mm auszugehen.

Durch die unterschiedlichen Aufbauten der beiden Module ergeben sich für die Module unterschiedliche Bauteildicken. Die Bauteildicke ist als ein maßgebender Parameter für die Versuchsergebnisse anzusehen, vor allem im Bezug auf das Kriterium Raumabschluss. Es ist zu vermuten, dass ein Schichtaufbau mit teilweise nichtbrennbaren Schichten (Steinwolle) auch bei geringeren Schichtdicken dem Feuer ausreichend lang Widerstand leisten kann. In Bezug auf das Wärmedämmkriterium ist auch der Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils ein wichtiger Parameter. Steinwolle hat im Vergleich zu Holz einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten, was einen geringeren Wärmedurchgangskoeffizienten des gesamten Aufbaus zur Folge hat (siehe folgende Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten). Die orientierende Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten lässt nur bedingt Rückschlüsse auf die wärmedämmenden Eigenschaften im Brandfall zu, da Schichten durch den Abbrand ihre Dimension verändern und die thermischen Eigenschaften der Materialien temperaturabhängige Größen sind. Zudem werden Spalte nicht berücksichtigt. Dennoch lässt der geringere Wärmedurchgangskoeffizient und die Nichtbrennbarkeit der Steinwolle im OSB-Modul die Vermutung zu, dass mit diesem Modul, auch bei einer geringeren Dicke eine ähnliche Feuerwiderstandsfähigkeit erreicht werden kann wie durch das BSH-Modul.

$$R = \text{Wärmedurchgangswiderstand in } \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}$$

$$U = \text{Wärmedurchgangskoeffizient in } \frac{\text{W}}{\text{K m}^2}$$

$$\lambda = \text{Wärmeleitfähigkeit in } \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$d = \text{Schichtdicke in m}$$

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (6.1)$$

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (6.2)$$

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6.3)$$

Für das Brettschichtholzmodul ergibt sich mit $\lambda = 0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ und einer Dicke $d = 160 \text{ mm}$:

$$R_{T,BSH} = 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} + \frac{0,16 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}$$

$$R_{T,BSH} = 1,4 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}$$

$$U_{BSH} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1,4 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}} = 0,71 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Für das OSB-Modul ergibt sich mit $\lambda = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ für OSB und $\lambda = 0,035 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und einer Dicke $d = 24 \text{ mm}$ der OSB-Lagen und einer Dicke $d = 30 \text{ mm}$ der Steinwolllagen, beim beschriebenen Modulaufbau:

$$R_{T,OSB} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 3 \cdot \frac{0,024 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 2 \cdot \frac{0,03 \text{ m}}{0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{T,OSB} = 2,44 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$U_{OSB} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{2,44 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,41 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Die ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit der Modulaufbauten wurde für beide Module im jeweils ersten Brandversuch bestätigt, sodass die Modulaufbauten nicht angepasst werden mussten. Es kam zu keinem Versagen des Raumschlusses auf der Modulfläche bis zum Versuchsende nach 120 Minuten.

6.2 Identifikation von Versagensmechanismen

Relevant für das Versagen von Abschottungen in Holzbauteilen sind vor allem die Brennbarkeit sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials. Durch den Abbrand des umgebenden Bauteils können Abschottungen hinterbrannt (siehe Definitionen) werden oder können sich lösen. Zusätzlich kann die Verringerung der Bauteildicke während des Brandverlaufs zum Versagen von Raumabschluss und Wärmedämmung bei intakter Abschottung führen. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Holzes im Vergleich zu Beton wird vom umgebenden Bauteil eine geringere Wärmemenge von der Leitung abgeführt. Es verbleibt somit mehr Wärmeenergie in den Leitungen selbst. Dies kann zu einer früheren Überschreitung der Grenztemperatur auf und um die Leitungen auf der feuerabgewandten Seite führen.

In den Vorversuchen sollten speziell die Versagensmechanismen von Abschottungssystemen untersucht werden, die durch den Einbau dieser in Holzbauteile hervorgerufen werden. Ein Versagen der Probekörper wurde daher teils angestrebt. Die Versuchsaufbauten wurden aus diesem Grund teilweise so gewählt, dass diese nicht dem Anwendbarkeitsnachweise des jeweiligen Abschottungssystems entsprachen. Es sollten damit besonders kritische Situationen erzeugt werden. Ein Versagen eines oder mehrerer Leistungskriterien wurde provoziert, um die Versagensmechanismen identifizieren und untersuchen zu können.

Es wurden 16 Kleinbrandversuche mit Abschottungen in Kombination mit den beschriebenen Holzmodulen durchgeführt. Untersucht wurden vier Modulbelegungen, die je zweimal in beiden Modulen getestet wurden. Die Wahl der zu untersuchenden Abschottungen fiel auf solche, die häufig in der Praxis vorkommen sowie Produkte, die für die Anwendung in Holz als geeignet angesehen werden. Grundlegende Informationen zu unterschiedlichen Abschottungen bzw. Abschottungssystemen und deren Funktionsweise sind in Unterabschnitt 4.1.3 zu finden. Als Beispiele für kritische Einbausituationen sind zu nennen:

- Kabelbündel aus Kabeln mit größeren Einzeldurchmessern als nach allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) zulässig
- kein vollständiger Ringspaltverschluss über die Bauteiltiefe bei Rohrmanschetten
- Verwendung eines Weichschottsystems mit zwei Platten und mittigem Hohlraum sowie keiner Maßnahmen an der Leibung



Abb. 6.3: Darstellung der im Projekt LeitHolz untersuchten Abschottungssysteme

6.2.1 Untersuchte Abschottungssysteme

Im Folgenden werden die Bestandteile und der Aufbau der untersuchten Abschottungen beschrieben. Mit Ausnahme der Abschottungen für Kupferrohre, die gemeinsam in einem Modul eingesetzt wurden, wurden die Abschottungen jeweils einzeln in einem Modul untersucht. Eine detaillierte Dokumentation der Versuchsaufbauten ist in [156–171] zu finden.

Brandschutzkabelmanschette

Die verwendete Brandschutzkabelmanschette Hilti CFS-CC [172, 173] (siehe Abb. 6.3) bestand aus einem Metallgehäuse, in welchem sich Intumeszenzmaterial befand. Das Intumeszenzmaterial konnte aus dem Gehäuse entnommen und mit einem Messer bearbeitet werden. Zur Durchführung der Leitungen wurde im Intumeszenzmaterial eine passende Öffnung hergestellt. Die Kabel wurden hindurchgeführt und die Manschette verschlossen. Verbleibende Spalte wurden mit auspressbarem Intumeszenzmaterial verschlossen. Das Intumeszenzmaterial innerhalb der Manschette war so in die Manschette eingelegt, dass sich auch zwischen dem umlaufenden Manschettengehäuse und dem Bauteil Intumeszenzmaterial befand. Die Manschette wurde mit mehreren Schrauben über eingehängte Laschen mit dem Bauteil verschraubt. Durch die Anwendung in einem Wandbauteil wurde auf beiden Seiten der Wand eine Manschette angebracht. Für die Befestigung der Manschette wurden Schrauben gewählt, die länger waren als die rechnerische Abbrandtiefe bei der angestrebten Feuerwiderstandsdauer und zwar so lang, dass die Manschette sich während der Branddauer nicht vom Bauteil lösen kann. Die Länge wurde gewählt, um zu verhindern, dass die Manschette sich während der Branddauer vom Bauteil lösen kann. Der Abbrand des Holzes kann durch das in die Manschette eingelegte Intumeszenzmaterial kompensiert werden. Abweichend vom Anwendbarkeitsnachweis der Brandschutzkabelmanschette wurde diese in ein Holzbauteil eingebaut und zur Durchführung ein Kabelbündel aus der mittleren Kabelkonfiguration nach DIN EN 1366-3 [131] Anhang B verwendet. Es erfolgte keine Beschichtung der Kabeloberflächen. Die Kabeldurchmesser überschritten die nach dem Anwendbarkeitsnachweis [173] zulässigen.

Weichschott

Das verwendete Weichschottsystem Hilti Brandschutz-System CP 673 - Kombi S 90 [174] bestand aus zwei Mineralfaserplatten (siehe Abb. 6.3) und einer Brandschutzbeschichtung. Die Mineralfaserplatten wurden zunächst mittig geteilt. Anschließend wurden Öffnungen für die durchzuführenden Leitungen in den Plattenhälften hergestellt, sodass die Leitungen zentriert durchgeführt werden konnten. Alle Schnittkanten der Platten wurden mit einer Brandschutzbeschichtung versehen. Zum Verschluss der Öffnung wurden die beiden Teile der Mineralfaserplatte in die Öffnung um die Leitungen eingesetzt. Die Platten wurden beidseitig bündig zur Moduloberfläche eingesetzt. Die Platten müssen dabei ausreichend groß sein, sodass sie fest in der Öffnung sitzen. Fehlstellen, die durch zu großes Ausschneiden entstanden sind, wurden mit Mineralwolle oder Brandschutzfüllmasse verschlossen. Abschließend wurden Fehlstellen und Randbereiche der Mineralfaserplatten mit der zugehörigen Brandschutzbeschichtung versehen. Weiterhin wurden die Leitungen auf der im Anwendbarkeitsnachweis angegebenen Länge auf beiden Seiten des Bauteils ebenfalls mit der Brandschutzbeschichtung CP 673 beschichtet. In diesem Versuchsaufbau wurden Kabel des gleichen Typs durch das Weichschottsystem geführt, wie auch durch die Brandschutzkabelmanschette. Die Kabelbelegung entspricht auch hierbei nicht dem Umfang der aBG.

Rohrmanschette

Die Rohrmanschette Hilti CP 644 [175–177] bestand aus einem Metallgehäuse, in welches Intumeszenzmaterial eingebettet war (siehe Abb. 6.3). Das Intumeszenzmaterial befand sich, anders als bei der Brandschutzkabelmanschette, nur im Bereich innerhalb des Metallgehäuses. Es war von drei Seiten vom Gehäuse umschlossen, die zum Rohr weisende Seite war offen. Die Rohrmanschette dient zur Abschottung von brennbaren Rohren. Der verbleibende, maximal 15 mm große, Ringspalt um die Rohrleitung ist gemäß dem Anwendbarkeitsnachweis 10 mm tief mit Brandschutzacryl [178] zu verfüllen und im Inneren mit Mineralwolle fest zu verstopfen. Anschließend wird die Manschette um das Rohr gelegt und mit mehreren Schrauben am Bauteil befestigt.

Abweichend vom Anwendbarkeitsnachweis der Rohrmanschette wurde in den durchgeführten Versuchen der umlaufend 1 mm breite Ringspalt zwar mit Brandschutzdichtmasse verschlossen, allerdings wurde der Ringspalt zuvor nicht mit Mineralwolle verstopft. Es verblieb somit ein Freiraum zwischen Rohr und Bohröffnung innerhalb des Bauteils. Diese Einbauvariante stellt ein Erschwernis dar. Bei den ersten beiden Versuchsaufbauten wurde statt Brandschutzacryl eine intumeszierende Füllmasse zum Verschluss des Ringspalts verwendet. Die Ringspaltverfüllung erfolgte bei den ersten drei der vier Versuche mit Hilfe eines Auspressgerätes, als sich das Rohr bereits in der Öffnung befand. Da der Ringspalt kleiner war als die Düse der Kartusche konnte das Material nur schwer in den Ringspalt eingebracht werden. Dieser Punkt ist als kritisch anzusehen. Im Anwendbarkeitsnachweis ist bezüglich des Ringspaltes ein Höchstmaß für den Ringspalt angegeben, ein Mindestmaß wird nicht genannt. Zur Verfüllung des Ringspalts in der entsprechenden Tiefe bzw. zum Verstopfen des Spalts im Bauteilinneren ist jedoch ein gewisses Mindestmaß erforderlich. Ist an dieser Stelle kein Mindestmaß angegeben, liegt es in der Verantwortung des Anwenders, das Maß entsprechend groß zu wählen, um den Einbau entsprechend dem Anwendbarkeitsnachweis zu ermöglichen. Beim letzten Versuchsaufbau wurde das Rohr brandseitig vor dem Einschieben in die Öffnung mit Brandschutzacryl bestrichen, sodass die geforderte Verfülltiefe sicher eingehalten werden konnte. Diese Herangehensweise ist nur unter Laborbedingungen möglich. Befestigt wurde die Rohrmanschette entsprechend der Brandschutzkabelmanschette mit Schrauben, deren Länge die rechnerische Abbrandtiefe für die angestrebte Versuchsdauer überstieg, sodass die Rohrmanschette bis zum Versuchsende nicht abfallen konnte.

Brandschutzbandage

Die Brandschutzbandage Hilti CFS-B [179] bestand aus Intumeszenzmaterial, das auf ein Gewebe auf Glasfaserbasis aufgebracht ist (siehe Abb. 6.3). Zur Abschottung der nichtbrennbaren Rohre mit (brennbarer) Rohrisolierung wurden zwei Lagen der Brandschutzbandage um die brennbare Rohrisolierung gewickelt. Die Bandage war so angeordnet, dass sie sich hälftig innerhalb der Durchführung und zur anderen Hälfte vor dem Bauteil befand. Die Brandschutzbandage wurde mit Drahtwickelungen gesichert. Zur richtigen Anwendung der Brandschutzbandage darf die Bohrung nur geringfügig größer als der Außendurchmesser der Isolierung sein, sodass das durch Wärmeeinwirkung aufschäumende Intumeszenzmaterial die Öffnung im Brandfall komplett verschließen kann. Der verbleibende Ringspalt ist mit Brandschutzacryl zu verschließen. Dies dient aus brandschutztechnischer Sicht vor allem dem Kaltrauchverschluss. Auch aus schallschutztechnischer Sicht ist der komplette Verschluss der Öffnung ein wichtiges Detail. Beim Einbau der Brandschutzbandage wurde nicht vom Anwendbarkeitsnachweis abgewichen.

Brandschutzrohrschale

Die Brandschutzrohrschale Rockwool Conlit 150U [180] besteht aus verdichteter Mineralwolle und einer dünnen Kaschierung aus Aluminiumfolie. Weiterhin beinhaltet das System eine nichtbrennbare Anschlussdämmung in Form einer weiteren Rohrschale (siehe Abb. 6.3). Die Rohrschale wurde zur Montage aufgeklappt, um die Rohrleitung gelegt und mit dem Klebestreifen der Kaschierung verschlossen. Die Rohrschale wurde in den Bauteilquerschnitt eingebracht. Außerhalb des Bauteils wurde die weiterführende Dämmung angebracht. Diese bestand ebenfalls aus Steinwolle, hatte allerdings eine geringere Dichte. Die weiterführende Dämmung wurde stumpf an die Brandschutzrohrschale gestoßen. Um zu verhindern, dass die weiterführende Dämmung sich öffnen und abfallen kann, wurde sie in vorgegebenen Abständen mit einer Drahtwicklung gesichert. Der Einbau der Brandschutzrohrschale erfolgte in Übereinstimmung mit dem Anwendbarkeitsnachweis in einer passgenauen Bohrung.

6.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [181] der TU Kaiserslautern durchgeführt. Die Versuche wurden, soweit möglich, in Übereinstimmung mit den Anforderungen nach DIN EN 1366-3 [131] durchgeführt. Abweichungen von den dortigen Vorgaben gab es, abgesehen von der Ofengröße, vor allem in Bezug auf die Leitungslänge im Ofen und die Normtragkonstruktion. Die Leitungslänge im Ofen konnte aufgrund der Ofengeometrie höchstens ca. 300 mm betragen. Weitere Details zur Versuchsdurchführung können [98] bzw. den Versuchsberichten [156–171] entnommen werden.

6.2.3 Versuchsergebnisse

Die Versuche bestätigten großteils die Ergebnisse von [36] und [37] und zeigten, dass die untersuchten Abschottungssysteme auch in den untersuchten Holzmodulen ihre Leistung erbringen können. Bessere Ergebnisse wurden dabei innerhalb der BSH-Module erzielt. Vermutlich erfolgt in den OSB-Modulen eine stärkere Verteilung der Wärme innerhalb des Moduls ausgehend vom Durchführungsbereich bzw. nach Versagen einer Bauteilschicht vom Punkt des Versagens aus. Das Modul wird dadurch insgesamt geschwächt. Zudem können die stärkeren Temperaturerhöhungen auf den Leitungen teils durch die geringere Dicke des OSB-Moduls bedingt sein. Die Abschottungen der Kupferrohre, mit der Brandschutzbandage als auch mit der Brandschutzrohrschale, zeigten keine nennenswerten Auffälligkeiten. Ebenfalls konnten bei den Kabelmanschetten keine Schwierigkeiten festgestellt werden, die auf den Einbau in Holz zurückzuführen sind. Die durch die großen Kabelquerschnitte hervorgerufenen starken Temperaturerhöhungen führten zur Überschreitung des Wärmedämmkriteriums, induzierten allerdings kein Versagen

des Raumabschlusses. Bei den Versuchen mit dem Weichschottsystem [162, 163, 170, 171] kam es zusätzlich zu starken Temperaturerhöhungen auf der feuerabgewandten Seite zu starkem Rauchdurchtritt während mehrerer Zeitspannen in den Versuchen. Bei Versuchen mit Rohrmanschetten kam es in drei von vier Fällen bereits zu einem frühen Zeitpunkt zum Versagen des Raumabschlusskriteriums [160, 161, 168, 169].

Im Folgenden werden die Gründe für das Versagen dieser beiden Abschottungen in den Versuchen genauer betrachtet und bewertet.

Weichschott

In Abb. 6.4 ist das Holzmodul mit dem Weichschottsystem vor, während und nach dem Brandversuch zu sehen. Bei den Versuchen mit dem Weichschottsystem wurde die kritische Tempera-



Abb. 6.4: Weichschottsystem vor, während und nach dem Brandversuch

turerhöhung an je einer Messstelle bereits nach knapp 60 bis 75 Minuten erreicht. Im Hinblick auf den Zeitpunkt des Versagens des Wärmedämmkriteriums liefern die Versuche in BSH- und OSB-Modulen ähnliche Ergebnisse. Bei genauerem Vergleich der gesamten Versuchsdaten ist zu erkennen, dass bei den Versuchen mit den OSB-Modulen an vielen Messstellen etwas höhere Temperaturen erreicht wurden als bei den BSH-Modulen. Die maßgebende Messstelle für das Überschreiten des Temperaturkriteriums lag bei allen Versuchen auf einem der durchgeführten Kabel. Die starke Temperaturerhöhung ist größtenteils auf die gewählte Kabelkonfiguration zurückzuführen, die nicht vom Anwendbarkeitsnachweis des Abschottungssystems abgedeckt war. Das umgebende Holzbauteil kann die Wärmeleitung innerhalb der Kabel nicht maßgeblich beeinflussen, da die Mineralwollplatte für Abstand zwischen Leitungen und umgebendem Bauteil sorgt. Im Unterschied zu einem massiven Bauteil aus nichtbrennbaren Baustoffen verringert sich beim Holzbauteil der Querschnitt mit zunehmender Versuchsdauer durch die Einwirkung der Brandbeanspruchung. Die Strecke zwischen beflammt und unbeflammter Seite, auf der Wärme aus den Leitungen vom Bauteil aufgenommen werden kann, wird somit bei steigender Brandraumtemperatur stetig kleiner. Während der Versuche kam es in verschiedenen Zeitspannen zum Rauchdurchtritt durch die Abschottungen. Während der ersten ca. zehn Versuchsmi-
nuten dringt der Rauch vor allem durch die Kabelwickel. Dieses Phänomen ist bekannt, da es so auch bei Anwendung von Weichschotts in massiven nichtbrennbaren Bauteilen zu beobachten ist. Das Material des umgebenden Bauteils hat darauf keinen Einfluss. Nach dieser Zeit bewirkt das Aufquellen der Kabelisolierung im Zusammenspiel mit der Brandschutzbeschichtung des Weichschottsystems, dass der Rauchaustritt zum Erliegen kommt. Weiterhin kam es nach einer

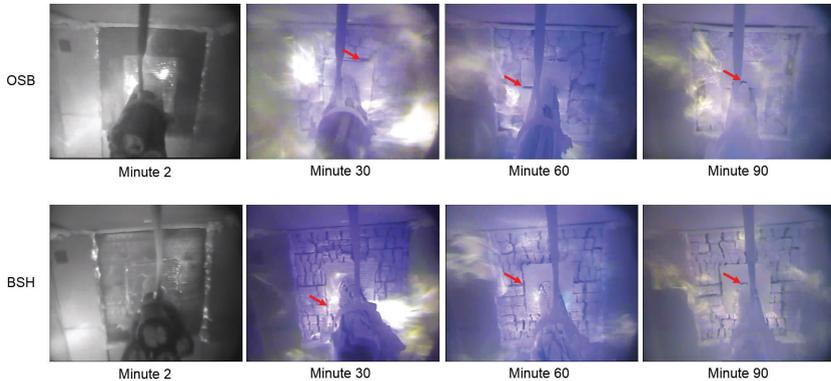


Abb. 6.5: Verhalten des Weichschotts während des Brandversuchs

Versuchsdauer von ca. 40 bis 60 Minuten erneut zum Rauchaustritt. Nach 70 Minuten Versuchsdauer nahm der Rauchaustritt bis zum Versuchsende kontinuierlich zu.

Durch den Abbrand des Holzes und die damit verbundene Querschnittsreduzierung des Bauteils kommt es zu einem Zeitpunkt, der sich mithilfe der Abbrandrate grob bestimmen lässt, dazu, dass die Mineralwollplatte, welche bündig mit der Bauteiloberfläche abschließt, hinterbrannt wird. In Abb. 6.5 ist sowohl bei dem in das OSB-Modul eingebauten Weichschott als auch bei dem im BSH-Modul eingebauten Weichschott (in der Darstellung ab Minute 30) zu erkennen, dass sich ein Spalt im Bereich des Anschlusses des Weichschotts an das umliegende Holzbauteil bildet. Die Spaltbildung beginnt bereits vor der 30. Versuchsminute und schreitet mit zunehmender Versuchsdauer fort. Bei den OSB-Modulen ist zusätzlich (in der Darstellung ab Minute 60) eine horizontale Spaltbildung zwischen den beiden Teilen der aneinandergesetzten Weichschottplatten zu beobachten. Der Zeitpunkt der Darstellungen stellt lediglich ein Beispiel für einen Zeitpunkt dar, zu dem die beschriebenen Effekte gut sichtbar sind. Er gibt nicht den Beginn des Auftretens der Beobachtung an. Heiße Brandgase können durch die entstehenden Spalte in den Hohlraum zwischen den beiden Mineralfaserplatten vordringen. Es ist demnach nur noch eine Mineralfaserplatte maßgebend, die den Durchtritt von Feuer und Rauch auf die unbeflammte Seite verhindert (vgl. Definition Hinterbrennen). Die wärmedämmende Wirkung der Mineralfaserplatte auf der Brandseite und die der Pufferzone zwischen den Platten wird deutlich vermindert. Die Folge sind Temperaturerhöhungen auf der Oberfläche der Mineralfaserplatte sowie auf den Leitungen auf der unbeflammten Seite. Die hinterbrannte Platte sitzt nicht mehr passend in der Öffnung, kann sich also leicht verschieben. Das Gewicht der Leitungen drückt die Mineralfaserplatte nach unten. Risse entstehen auch an der Austrittsstelle der Leitungen auf der unbeflammten Seite. Heiße Gase und Rauch können durch diese hindurchdringen.

Das Abschottungssystem Weichschott wurde in den Großbrandversuchen nicht weiter betrachtet. Grund ist die Instabilität des Abschottungssystems aufgrund des Abbrandes im Leibungsbereich und daraus resultierender Rauchaustritt sowie die heiße Oberfläche des Weichschotts infolge des Hinterbrennens. Zudem kann der Brand in das Innere des Bauteils eindringen. Die Temperatur auf den Kabeln war für diese Entscheidung nicht ausschlaggebend, da die zu stark erhöhte Temperatur auf den Kabeln vermutlich größtenteils auf die für das Abschottungssystem zu großen Kabeldurchmesser zurückzuführen ist. In der durchgeführten Versuchsreihe wurde das Weichschottsystem direkt, also ohne die Ausbildung einer Öffnungsleibung, in die Holzmodule

eingebaut. Die aus der Entscheidung, das Weichschottsystem nicht weiter zu betrachten hervorgehende Aussage, dass Weichschottsysteme in Holzbauteilen nicht anzuwenden sind, bezieht sich daher nur auf den Fall, dass der Einbau ohne Ausbildung einer Öffnungsleibung bzw. vergleichbarer Maßnahmen erfolgt. Weiterhin bestanden die betrachteten Weichschottsysteme aus je zwei Steinwolleplatten, die jeweils bündig mit einer Seite des Wandbauteils eingebaut wurden. Durch diese Einbauart entsteht ein Hohlraum zwischen den Platten. Dass dieser Hohlraum für die Nachteile bei der Anwendung des Weichschottsystems in Holzbauteilen ausschlaggebend ist, ist eindeutig. Weichschottsysteme ohne Hohlräume sollten daher in Bezug auf ihre Anwendbarkeit in Holz untersucht werden. Andere Forschungsvorhaben, z. B. [36, 37], zeigen, dass Weichschottsysteme innerhalb einer klassifizierten bzw. ertüchtigten Öffnungsleibung in Holz anwendbar sind. In den dort durchgeführten Versuchen wurde, im Gegensatz zu dem hier beschriebenen Versuchsaufbau, eine klassifizierte Öffnungsleibung ausgebildet oder die Holzoberfläche wurde mit einer Brandschutzbeschichtung beschichtet, sodass das Weichschott nicht direkt mit dem eigentlichen Holzbauteil in Berührung kam bzw. der Abbrand am Holzbauteil bzw. an der Öffnungsleibung eingeschränkt wurde. Die als kritisch anzusehende Schnittstelle wurde somit gelöst. Zudem wiesen die dort untersuchten Aufbauten teils keine Hohlräume zwischen den Mineralfaserplatten auf.

Rohrmanschette

Bei allen Versuchen mit den Rohrmanschetten kam es zu Versuchsbeginn zu starkem Rauchaustritt aus dem Kunststoffrohr. Dies ist bis zu einer Versuchsdauer von ca. 10 Minuten der Fall. Dies entspricht der Zeitspanne, die das Intumeszenzmaterial der Rohrmanschette benötigt, um den Rohrquerschnitt vollständig zu verschließen. Das Rohr war im Versuch auf beiden Seiten unverschlossen. Bei den ersten drei der vier Versuche [160, 168, 169] kam es zu relativ frühen Zeitpunkten im Versuch zum Verlust des Raumabschlusses (Zeitpunkte: 48 min, 24 min, 46 min). Dem Versagen in Form von Flammenbildung auf der unbeflammten Seite ging jeweils starker Rauchaustritt aus dem Rohr sowie eine starke Deformation desselben voraus. Beim vierten Versuch (BSH-Modul) [161] konnten alle Leistungskriterien über 120 Minuten hinweg aufrechterhalten werden. Im Laufe des Versuchs kam es zwar zu Verformungen am Kunststoffrohr auf der Kaltseite sowie zur Bildung einer Öffnung in der 80. Versuchsminute aufgrund des schmelzenden Rohrs, die Öffnung blieb allerdings durch das Intumeszenzmaterial der brandseitigen Rohrmanschette verschlossen. Die Manschette auf der Kaltseite hatte noch nicht reagiert. In Abb. 6.6 ist das Holzmodul mit der Rohrmanschette, die nicht versagte, vor, während und nach dem Brandversuch zu sehen. Der Grund des Versagens der drei Rohrabschottungen ist im Bereich des Anschlusses der Abschottung an das Holzbauteil zu sehen. Die Rohrmanschette war zum jeweiligen Versagenszeitpunkt komplett verschlossen (vgl. beispielhaft Abb. 6.7). Dies deutet darauf hin, dass der Brand an der Rohrmanschette vorbei in die Öffnung vorgedrungen ist. Ebenfalls ist in Abb. 6.7 zu erkennen, dass sich direkt nach dem Versagen verstärkt Flammen am Manschettenrand zeigen. Dies weist auf einen Spalt, durch den Sauerstoff eindringt, hin und bestätigt damit die Annahme, dass die Manschette hinterbrannt wurde (siehe Definition). Kommt es dazu, dass der Abbrand des Holzes um die Rohrmanschette herum so weit fortschreitet, dass die Abbrandebene tiefer liegt als der Ringspalt mit Brandschutzacryl oder einer anderen Füllmasse verschlossen wurde, kann der Brand in die Öffnung, durch die die Leitung hindurchgeführt ist, eindringen. Es kommt zu einer starken Erwärmung innerhalb der Bohröffnung. Das Kunststoffrohr schmilzt und Flammen können auf die unbeflammte Seite vordringen, noch bevor die außenliegende Rohrmanschette reagieren kann. Zu bedenken ist an dieser Stelle, dass der Ringspaltverschluss bei diesen Versuchsaufbauten nur beidseitig mit Brandschutzacryl erfolgte. Der innere Bereich, der laut Anwendbarkeitsnachweis mit Steinwolle zu füllen ist, blieb luftgefüllt. Dennoch konnten in einem der vier genannten Versuche alle betrachteten Leistungskriterien für die volle Versuchsdauer von 120 Minuten aufrechterhalten werden. Dies zeigt, dass



Abb. 6.6: Rohrmanschette vor, während und nach dem Brandversuch

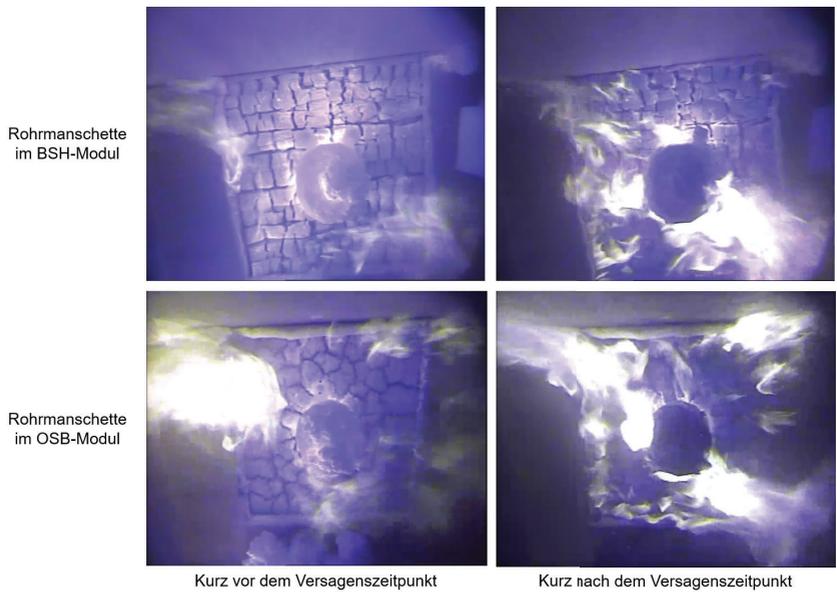


Abb. 6.7: Darstellung des Versagenszeitpunkt einer Rohrmanschette im Brandofen

die Abschottung von brennbaren Rohren mittels einer Rohrmanschette grundsätzlich möglich ist. Bei diesem einen Versuch wurde der Versuchsaufbau, wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, geringfügig modifiziert. Es ist anzunehmen, dass diese Veränderung, die zu einer umlaufend tieferen Verfüllung des Ringspalts führt, der Grund für das positive Ergebnis des letzten Versuchs ist.

Nach der Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse der Versuche mit den Rohrmanschetten ist zu vermuten, dass die Ausführung des Ringspalts bzw. die Verfüllung des Ringspalts das entscheidende Detail zur Anwendung in Holzbauteilen darstellt. In den Kleinbrandversuchen wurde die Bohrung zur Durchführung des Rohrs so passend wie möglich ausgeführt, sodass sich ein umlaufender Ringspalt von 1 mm ergab. Eine Mindestbreite des Ringspalts ist im Anwendbarkeitsnachweis der Rohrmanschette nicht angegeben. Allerdings ist eine Mindestverfülltiefe des Ringspalts mit Brandschutzfüllmasse bzw. Mineralwolle vorgeschrieben. Wie tief das Material in den Ringspalt eingebracht wurde, kann selbst direkt beim Einbau nicht sicher nachvollzogen werden. Die Füllstoffe können zudem nur entsprechend tief eingebracht werden, wenn der Ringspalt eine gewisse Mindestbreite hat. Bei nichtbrennbaren Bauteilen ist die Verfülltiefe weniger relevant. Die Dicke des Bauteilquerschnitts verringert sich bei diesen Bauteilen während des Brandes nicht bzw. nur geringfügig, durch eventuell auftretende Abplatzungen. Deshalb muss dort die Füllmasse nur das Eindringen des Brandes über die Dauer der Beanspruchung verhindern.

6.3 Untersuchungen zur Bestätigung der Anwendbarkeit der Methode „Holz-in-Holz“

Um zu überprüfen, ob die Methode „Holz-in-Holz“ in der Praxis anwendbar ist, wurden Versuche unter Prüfbedingungen durchgeführt, wie sie bei Brandprüfungen zur Erlangung eines Anwendbarkeitsnachweises üblich sind [182, 183]. Darin konnten zum einen die Ergebnisse der Kleinbrandversuche bzgl. der Abschottungen in den Holzmodulen bestätigt werden, zum anderen konnte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie der Anschluss der Module an unterschiedliche Holzkonstruktionen möglich ist.

6.3.1 Versuchsaufbauten

Brettschichtholzmodule, wie bereits aus den Vorversuchen bekannt, wurden in zwei unterschiedliche Holzwandkonstruktionen eingesetzt. Bis auf das Modul mit dem Weichschott wurden dieselben Module wie auch in den Vorversuchen verwendet. Anstelle des Moduls mit dem Weichschott trat ein Modul in dem alle Leitungsarten und Abschottungssysteme beinhaltet waren. Bei den Modulen mit Rohrmanschetten wurde die Ringspaltbreite soweit vergrößert, dass der Ringspalt ausreichend tief verfüllt werden konnte. Angepasst an die Bauart der Kartusche der Brandschutzfüllmasse und die zugehörige Düse wurde eine Ringspaltbreite von 5 mm gewählt. Zudem wurde das Rohr in der Bohrföffnung zentriert eingebaut, sodass der Ringspalt umlaufend die gleiche Breite aufweist. Auf das Verschließen des inneren Bauteilbereichs zwischen dem beidseitigen Verschluss mit Brandschutzacryl mit Mineralwolle wurde weiterhin verzichtet. Zur Belegung der Brandschutzkabelmanschetten wurde statt der mittleren Kabelkonfiguration die kleine Kabelkonfiguration nach DIN EN 1366-3 [131] verwendet.

Als Wandkonstruktionen wurden eine Holzrahmenkonstruktion und eine Brettsperrholzkonstruktion gewählt. Diese Wandaufbauten stellen typische, im modernen Holzbau verwendete Konstruktionen dar (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Beide Wandaufbauten wurden ohne eine nicht-brennbare Bekleidung ausgeführt. Die Konstruktionen sollten dabei eine Feuerwiderstandsdauer von 90 bzw. 120 Minuten erreichen können. Der Brettsperrholzaufbau (CLT 160 L5s) der Firma Stora Enso, der als Deckenbauteil als REI 90 klassifiziert ist [184], hatte einen 5-lagigen Aufbau und eine Gesamtdicke von 160 mm (siehe dazu Abb. 6.9). Der Aufbau der Holzrahmenwand

6.3 Untersuchungen zur Bestätigung der Anwendbarkeit der Methode „Holz-in-Holz“

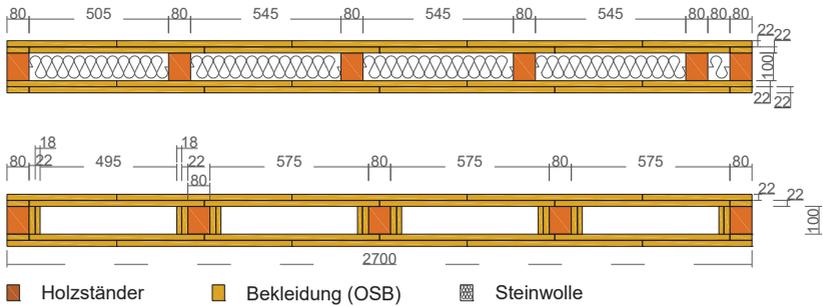


Abb. 6.8: Aufbau der Holzrahmenwand, oberer Bildteil: Bereich ohne Öffnungen, unterer Bildteil: Bereich mit Öffnungen für Module

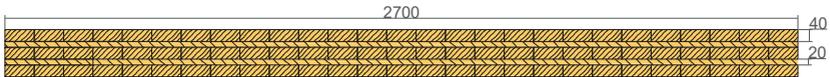


Abb. 6.9: Aufbau der Brettsperrholzwand

wurde nach DIN 4102-4 (1994) Tabelle 51, Zeile 10 [41] ausgeführt. Die Feuerwiderstandsklasse des Wandaufbaus ist in der Norm mit F 90-B angegeben. Die zur doppelten Beplankung verwendeten OSB-Platten wurden aus produktionstechnischen Gründen in einer Dicke von 22 mm statt 19 mm gewählt, das Maß der Ständer betrug 80 mm · 100 mm (Mindestmaß nach DIN 4102-4 [41] 40 mm · 80 mm). Der Schnitt des Wandaufbaus ist in Abb. 6.8 (oberer Bildteil) dargestellt. Im oberen Bereich der Wand waren acht Öffnungen zum Einsetzen der Brettstichholzmodule vorgesehen. Die Leibungen der Öffnungen wurden doppelt mit OSB-Platten in den Dicken 22 mm und 18 mm beplankt. Der Aufbau des oberen Bereichs der Wand ist im Schnitt in Abb. 6.8 (unterer Bildteil) zu sehen. Die Module wurden von der Brandseite und der unbeflammten Seite mit je einer Schraube pro Modulkante mit der Holzkonstruktion verschraubt. Die Schrauben wurden in einem Winkel von 45° eingebracht, sodass sie im Versuch B1 das Modul mit den Holzständern bzw. den Füllhölzern verband. Die 7,5 mm breite Fuge zwischen Modul und Wandöffnung wurde beidseitig 50 mm tief mit einer intumeszierenden Füllmasse verschlossen und mittig 60 mm mit Mineralwolle verfüllt. Abbildung 6.10 zeigt beispielhaft den Versuchsaufbau der Brettsperrholzwand mit eingesetzten Holzmodulen mit Abschottungen.

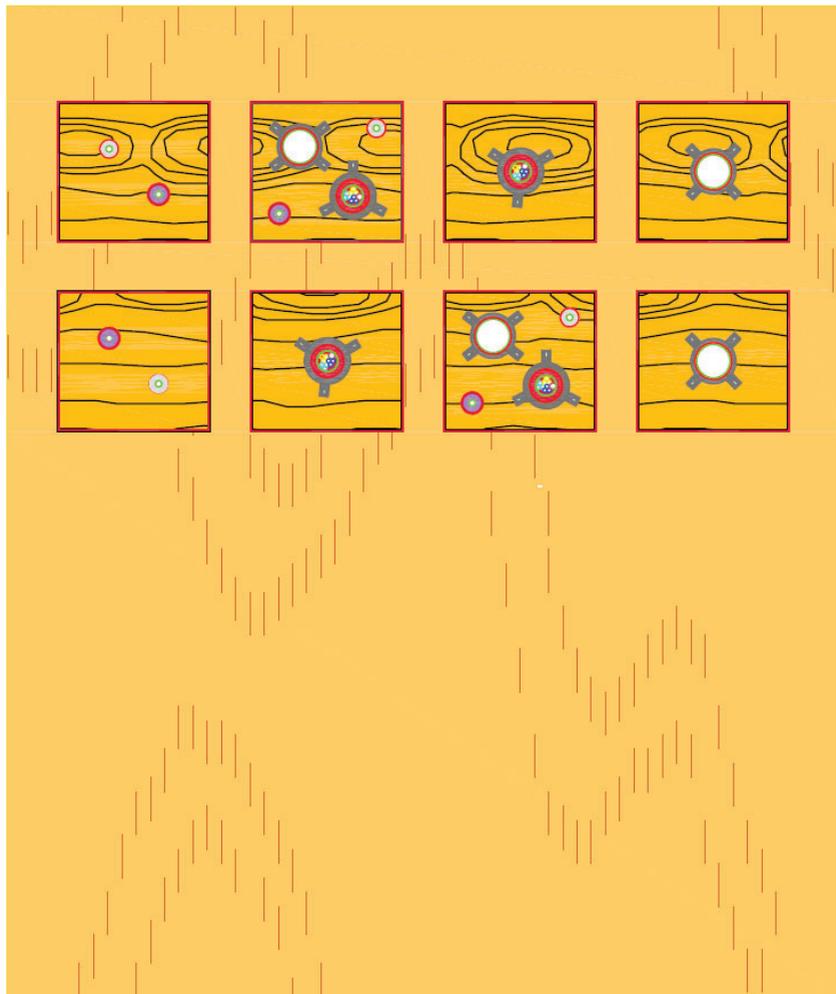


Abb. 6.10: Wandprobekörper Brettsperrholzwand mit Holzmodulen mit Abschottungen

6.3.2 Versuchsdurchführung

Die Großbrandversuche [182, 183] wurden im Kombiprüfofen der TU Kaiserslautern durchgeführt. Die Brandbeanspruchung erfolgte gemäß ETK. Angestrebt wurde eine Versuchsdauer von 120 Minuten. Die Prüfbedingungen nach DIN EN 1366-3 [131] in Verbindung mit DIN EN 1363-1 [5] wurden, soweit möglich, eingehalten. Das Holzbauteil war an vier Seiten am Prüfrahmen befestigt. Dies hat allerdings keinen nennenswerten Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Beim Versuch mit der Holzrahmenwand [182] kam es aufgrund einer technischen Störung zu Abweichungen der Vorgaben aus DIN EN 1366-3 [131] bezüglich des Ofeninnendrucks. In den ersten 30 Versuchsminuten wurden teils starke Druckerhöhungen sowie Druckabfälle in Bezug auf den Nenndruck von 20 Pa verzeichnet. Weitere Details können dem Forschungsbericht [98] bzw. den Versuchsberichten [182, 183] entnommen werden.

6.3.3 Ergebnisse der Großbrandversuche

Mit den Ergebnissen der beiden Großbrandversuche wurde gezeigt, dass die Methode „Holz-in-Holz“ anwendbar ist. Der Großteil der untersuchten Abschottungssysteme konnte alle Leistungskriterien über die volle Versuchsdauer aufrechterhalten. Die Befestigung der Abschottungen mit Schrauben in Länge der zu erwartenden Abbrandtiefe war ausreichend. Die Temperaturen auf den Moduloberflächen waren durchweg unbedenklich. Die Ausführung der Fuge zwischen Modul und Wandöffnung kann als sicher beurteilt werden.

Im Versuch B1 [182] wurden die eingebauten Rohrmanschetten durch die Druckschwankungen stark beansprucht. Die Kunststoffrohre schmolzen bereits in den ersten Versuchsminuten. Die Rohrmanschetten konnten den Raumabschluss nur für ca. 30 - 40 Minuten aufrechterhalten. Rohrmanschetten sind aufgrund der Porosität des aufgeschäumten Materials zum Verschluss der Öffnung empfindlich gegenüber Druckschwankungen. Das Versagen der Manschetten ist nicht auf den Einbau in Holz zurückzuführen. Während des Versuchs brachen zwei Kupferrohre innerhalb des Ofens ab, dies führte zu einer starken Erwärmung dieser Rohre und zur Überschreitung der maximalen Temperaturerhöhung auf der unbeflammten Seite an den Messstellen auf der Rohrdämmung. Auch dieses Versagen ist nicht mit dem Einbau der Abschottungen in Holz in Verbindung zu bringen.

Beim Brandversuch mit der Brettspertholz wand (Versuch B2) [183] kam es lediglich zum Versagen zweier Rohrmanschetten, wobei das Versagen einer der Rohrmanschetten im direkten Zusammenhang mit dem Versagen der anderen steht. Die modifizierte Verfüllung des Ringspaltes in den Großbrandversuchen hat demnach zu einer Verbesserung der Leistung der Rohrmanschetten im Vergleich zu den Kleinbrandversuchen geführt. Ein vollständiger Verschluss des Ringspaltes, wie im Anwendbarkeitsnachweis gefordert, führt vermutlich zu einer weiteren deutlichen Verbesserung. Die Ergebnisse sind demnach nicht negativ hinsichtlich der Leistung des Produkts auszulegen. In anderen Forschungsvorhaben [36],[37] und internen Test des Herstellers [185–187], wurde die Anwendbarkeit von Rohrmanschetten in Holzbauteilen bestätigt (siehe dazu auch Unterabschnitt 4.2.2). Es ist anzunehmen, dass sich die Manschetten entweder untereinander in Details unterscheiden, die für die Anwendbarkeit der jeweiligen Rohrmanschette in Holzbauteilen ausschlaggebend sind und/oder, dass die vollständige bzw. unvollständige Verfüllung des Ringspaltes entscheidend ist.

Der verbleibende Restquerschnitt von ca. 8 cm unverbrannten Holzes der BSH-Module deckt sich mit den Erwartungen aufgrund der angegebenen Abbrandrate des Fichten-Brettschichtholzes von $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ [188] bzw. [39]. Dies bestätigt die ausreichende Genauigkeit der Annahme einer linearen Abbrandrate für lange Branddauern, hier 120 Minuten (vgl. Unterabschnitt 3.2.4). Auf der freien Wandfläche verblieb ein Restquerschnitt unverbrannten Holzes von ca. 7 cm. Laut Angaben von Stora Enso [189] soll der Abbrand berechnet werden, indem für die erste Schicht eine Abbrandrate von $0,63 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ angesetzt wird und für alle folgenden Schichten eine Abbrandrate von $0,86 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Zur besseren Vergleichbarkeit wird auch diese Abbrandrate als durchschnittliche

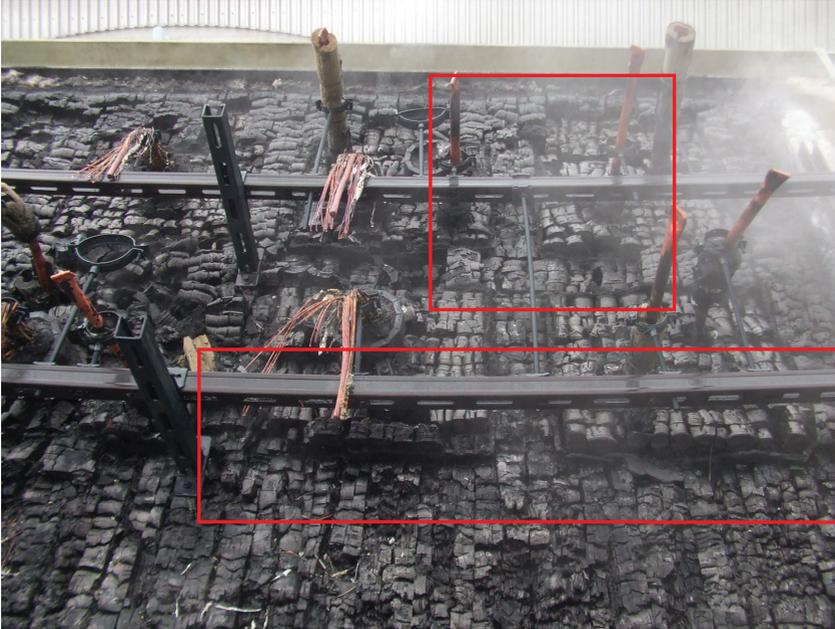


Abb. 6.11: Unterschiede in der verbleibenden Kohleschichtdicke bei BSH und BSP

lineare Abbrandrate berechnet. Die Abbrandrate würde sich im Fall der verwendeten Wand (bei einem Abbrand von 9 cm des Holzes [183]) durchschnittlich zu $\frac{4}{9} \cdot 0,63 \frac{\text{mm}}{\text{min}} + \frac{5}{9} \cdot 0,86 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 0,76 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ errechnen. Nach dieser Rechnung müssten nach 120 Minuten $0,76 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 120 \text{ min} = 91,2 \text{ mm}$ des Holzes verbrannt sein, was dem gemessenen Wert entspricht. Die Herstellerangabe der Firma Stora Enso zur Abbrandrate kann somit für den durchgeführten Versuch bestätigt werden. Die Unterschiede im Abbrand von Brettschichtholz und Brettspertholz waren nicht nur am verbleibenden Querschnitt unverbrannten Restholzes zu erkennen, sondern zeigten sich auch an unterschiedlichen Dicken der am Ende vorhandenen Kohleschicht (vgl. Abb. 6.11, Übergang Wand/Modul). Beobachtungen im Nachgang zeigten eine dickere Holzkohleschicht auf den BSH-Modulen im Vergleich zur Brettspertholzoberfläche. Da die Bildung der Kohle durch die gleiche Holzart in gleicher Weise stattfindet, muss der Grund für die unterschiedliche Kohleschichtdicke das Abfallen von Kohle sein. Ein Teil der Kohle ist mit großer Sicherheit beim Löschvorgang abgefallen und somit nur bedingt relevant. Dennoch fiel beim BSH-Modul folglich (auch) beim Löschvorgang weniger Holzkohle ab. Eine beständigere Kohleschicht ist als positiv im Hinblick auf die Berechenbarkeit des Abbrandes und das Versagensrisiko zu werten.

Im direkten Einflussbereich der Leitungsdurchführungen ergab sich ein veränderter Abbrand des Holzes im Vergleich zur unbeeinflussten Moduloberfläche. Um den Einbrand im Durchführungsbereich (senkrecht zum Ringspalt) beurteilen zu können, wurden einige Module nach dem Brandversuch aus der Wandkonstruktion ausgebaut und Schnitte durch die Bohrungen hergestellt. Bei allen Querschnitten ist ein unterschiedlich ausgeprägter, trichterförmiger Einbrand um den Durchführungsbereich zu erkennen (folgend *Abbrandtrichter* genannt). Der Abbrand senkrecht zum Ringspalt nimmt mit zunehmendem Abstand zur Abbrandebene ab. Die größte

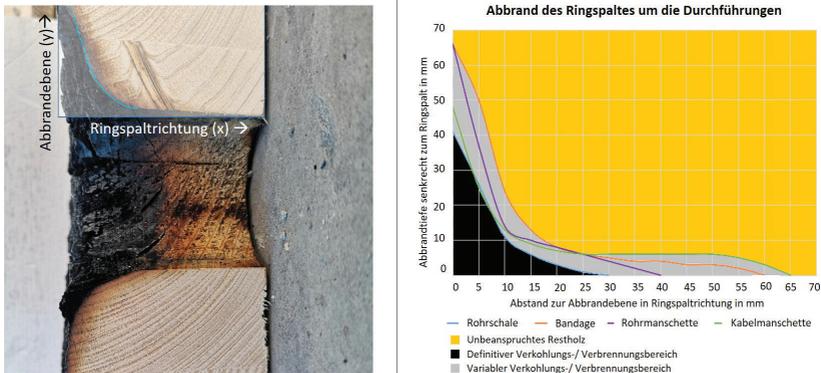


Abb. 6.12: Links: Beispielhafte Darstellung des Abbrandtrichters einer Brandschutzrohrschale, rechts: Darstellung der unterschiedlichen Abbrandtrichter von verschiedenen Durchführungen [98]

Abnahme ergibt sich bei allen Abbrandtrichtern auf den ersten 10 mm bis 20 mm unterhalb der Abbrandebene. Abbildung 6.12 stellt im linken Bildteil beispielhaft einen solchen Abbrandtrichter dar und soll das Beschriebene bzgl. der Richtungsangaben verdeutlichen. Wie stark der Abbrand mit dem Abstand zur ursprünglichen Bohrkante abnimmt, ist abhängig von der jeweils durchgeführten Leitungsart sowie dem verwendeten Abschottungssystem.

Die entstandenen Abbrandtrichter wurden vermessen und in Graphen übertragen. In Abb. 6.12 (rechte Bildseite) sind die unterschiedlichen Formen der Abbrandtrichter der untersuchten Abschottungssysteme dargestellt. Die Abszissenachse stellt die Bohrkante dar, die Ordinatenachse die Abbrandebene. Der linke Bildteil soll auch zum besseren Verständnis der Graphen im rechten Bildteil beitragen. Der schwarz dargestellte Verkohlungs Bereich war unabhängig vom betrachteten Abschottungssystem verkohlt. Gleiches gilt für den Bereich des unverbrannten Restholzes. Die Verkohlung im grauen Bereich variiert je nach betrachtetem Abschottungssystem. Am Diagramm ist abzulesen, dass bereits in ca. 25 mm Entfernung zur Bohrkante der Abbrand lediglich um ca. 10 mm weiter fortgeschritten ist als der auf der Moduloberfläche im Bereich ohne Durchführungen. Zu beachten ist, dass die Verkohlung des Holzes auch nach Ende des Versuchs und nach dem Ablöschen bis zur vollständigen Abkühlung noch weiter fortgeschritten sein kann. Die Messungen wurden erst durchgeführt, als der Probekörper komplett abgekühlt war. Verkohlungen im Nachgang zur eigentlichen Brandbeanspruchung während des Versuchs sind daher in den Messergebnissen, die zur Erstellung der Grafik verwendet wurden, enthalten. Der Einfluss der späteren Messung wird als gering erachtet. Die Ergebnisse liegen auf der konservativen Seite, auch unter Beachtung der größeren Beanspruchung durch die Druckschwankungen im Brandversuch B1.

6.4 Zwischenfazit

Die Untersuchungen haben offen gelegt, dass es zum Versagen von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen kommen kann, wenn die Abschottung Hohlräume aufweist, die im Verlauf des Versuchs durch den fortschreitenden Abbrand des Holzes von der Brandbeanspruchung erreicht werden können. Die Abschottung kann in diesen Fällen hinterbrannt werden.

Die beiden Großbrandversuche haben gezeigt, dass die Methode „Holz-in-Holz“ anwendbar ist.

Es ist gelungen, Holzmodule mit definierten Eigenschaften, in die verschiedene Abschottungssysteme eingebaut waren, in unterschiedlichen Holzwandkonstruktionen einzusetzen und somit die Feuerwiderstandsfähigkeit der Wandkonstruktion mit Leitungsdurchführungen aufrechtzuerhalten. Die verwendeten Holzmodule sind für den Einbau verschiedener Abschottungssysteme mit unterschiedlichen Wirkungsweisen geeignet. Die in den Versuchen angewendete Ausführung der Fuge zwischen Holzmodulen und Holzwandkonstruktion kann als eine sichere Variante beurteilt werden. Der Großteil der untersuchten Abschottungssysteme konnte in den Versuchen die angestrebte Leistung erbringen.

Um die Methode „Holz-in-Holz“ in der Praxis anwendbar zu machen, muss vor allem die Ausbildung der Fuge zwischen Modul und unterschiedlichen Wandkonstruktionen definiert werden. Untersuchungen dazu werden in Abschnitt 8.1 vorgestellt. Zudem sollen Einzelleitungsdurchführungen und Durchführungen kleiner Kabelbündel in Anlehnung an die Erleichterungen der MLAR untersucht werden, um Leitungsdurchführungen im Holzbau beschreiben zu können, die ohne eine klassifizierte Abschottung ausgeführt werden können (siehe Abschnitt 7.1). Notwendige Abstände zwischen Leitungsdurchführungen sowie zum Modulrand sollen auf Grundlage von Brandversuchen an metallischen Rohren (siehe Abschnitt 7.3) in passenden Bohrlöchern und darauf basierenden Parameterstudien innerhalb FE-Simulationen abgeleitet werden.

Für Wandkonstruktionen mit geringeren Feuerwiderstandsanforderungen sind Module in geringeren Bauteildicken ausreichend. Die erforderlichen Modulldicken werden im Laufe der Arbeit anhand weiterer, in dieser Arbeit durchgeführter Untersuchungen festgelegt (siehe vor allem Abschnitt 7.1 und Abschnitt 7.4.2). Der Einbau der Module in Deckenbauteile wurde nicht untersucht. Aufgrund der positiven Ergebnisse in Wandbauteilen ist allerdings auch von der Anwendbarkeit der Methode in Deckenbauteilen auszugehen. Unterschiede durch die sich ändernde Orientierung der Brandbeanspruchung müssen, beispielsweise beim Abbrand der Holzmodule, berücksichtigt werden (siehe dazu Unterabschnitt 3.2.4 hinsichtlich Delamination verkohlter Schichten). Zudem kann die Brandbeanspruchung bei horizontaler Bauteilausrichtung (leicht) höher sein. Modifikationen beim Einbau der Abschottungssysteme können erforderlich werden. Ein sicherer Anschluss der Module an das umgebende Deckenbauteil muss gewährleistet sein. Beim Einbau in Decken sind dabei bei der Dimensionierung der Verankerung auch Lasten, von Leitungen und ggf. Personen einzubeziehen.

Die weiteren Untersuchungen werden zur besseren Vergleichbarkeit weiterhin an vertikal ausgerichteten Bauteilen durchgeführt.

7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien

Die MLAR enthält für die Durchführung einzelner Leitungen sowie für kleine Kabelbündel Regelungen, die beschreiben, wie diese ausgeführt werden können, ohne auf klassifizierte Abschottungssysteme zurückzugreifen (siehe dazu Abschnitt 2.2.2). Die dort beschriebenen Erleichterungen für feuerhemmende Wände sind innerhalb brennbarer Bauteile nicht anwendbar. Erleichterungen für die Durchführung einzelner Leitungen können direkt nur für feuerhemmende Holzbauteile angewendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die vereinfachte Nachweisführung - Ausführung nach einer technischen Baubestimmung, statt Übereinstimmungserklärung mit einem Anwendbarkeitsnachweis - hilft, mittels einer technisch gleichwertigen Lösung, Baukosten zu reduzieren. Aus diesem Grund sind entsprechende Regelungen auch für Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile anzustreben.

Um Erkenntnisse hinsichtlich der Führung von Leitungen durch Bauteile zu erlangen, ohne klassifizierte Abschottungssysteme zu verwenden, wurden Versuche [190] durchgeführt und dabei die Leistungskriterien entsprechend DIN EN 1366-3 [131] beobachtet. Ziel dieser Versuchsreihe war es, Empfehlungen hinsichtlich der Verwendung von Dichtmaterialien zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile formulieren zu können. Zudem sollten Rückschlüsse auf die dazu erforderlichen Moduldicken und Ringspaltabmessungen gezogen werden können.

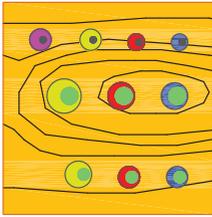
7.1.1 Versuchsaufbauten

Die Konzeption der Versuchsaufbauten entstand in Anlehnung an die Erleichterungen der MLAR Abschnitt 4.2 und 4.3 (siehe dazu Abschnitt 2.2.2). Einzelkabel und Kabelbündel wurden entsprechend den in [36] durchgeführten Untersuchungen gewählt, um damit vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Stellvertretend für metallische Leitungen wurden Kupferrohre verwendet, da Untersuchungen an diesen [144] zufolge zu konservativen Ergebnissen hinsichtlich anderer metallischer Leitungen führen. Die Rohrdurchmesser wurden ähnlich den Kabeldurchmessern angepasst an die Probekörpergröße gewählt, wobei der Durchmesser der größeren brennbaren Rohrleitung der maximal zulässigen Größe nach Abschnitt 4.2 MLAR entspricht. Die Art der Dichtmaterialien wurde ebenfalls auf Grundlage der Untersuchungen aus [36] gewählt. Die exzentrische Anordnung der Leitungen erfolgte in Anlehnung an [144]. Für weitere Informationen zu Untersuchungen in [36] und [144] siehe Unterabschnitt 4.2.2. Bei Leitungen, die mit Intumeszenzmaterial und Brandschutzacryl abgedichtet wurden, wurde in Anlehnung an MLAR Abschnitt 4.3.2 ein kleineres Ringspaltmaß angestrebt als bei Verwendung von Mineralwolle und Gips als Dichtmaterial. Zu begründen ist diese Entscheidung auch damit, dass bei den Brandschutzfüllmassen von einer höheren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Steinwolle auszugehen war und somit die Lage der Leitung näher zur Öffnungsleibung als kritischer beurteilt wurde. Bei Steinwolle und Gips wurden größere Ringspaltmaße als kritisch beurteilt, da ein Herausfallen des Dichtmaterials aufgrund der Brandbeanspruchung nicht auszuschließen war. Bei der Abdichtung mit Intumeszenzmaterial konnte somit das in der MLAR geforderte maximale Ringspaltmaß von 15 mm planmäßig eingehalten werden. Die

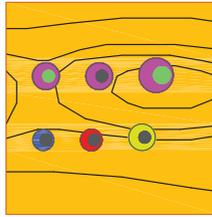
Realisierung des Ringspaltmaßes von maximal 50 mm bei Abdichtung mit Steinwolle hätte zu deutlich größeren Bohrlochdurchmessern und damit zu einer größeren Anzahl an erforderlichen Versuchen geführt und wurde deshalb nicht realisiert. Zusätzlich wurde ein Versuch vorgesehen, in dem Leitungen in passgenauen Bohrlöchern ohne zusätzliche Abdichtung durch die Module geführt wurden. Die Aussage aus [36], dass die Durchführung bestimmter Kabel in passenden Öffnungen auch ohne gesonderte Abdichtung möglich ist, sollte auch für andere Leitungsarten untersucht werden und das Verhalten der Leitungen mit direktem Kontakt zur Bohrlochoberfläche aus Holz untersucht werden.

Die unterschiedlichen Leitungen wurden durch vertikal angeordnete Module in den Dicken 60 mm und 160 mm geführt. Die Moduldicke 160 mm wurde gewählt, da diese bereits aus den vorangegangenen Versuchen bekannt war. Die Moduldicke 60 mm lässt sich aus der Mindestbauteildicke für feuerhemmende Bauteile zur Anwendung der in der MLAR beschriebenen Erleichterungen ableiten. Für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten forderten die Erleichterungen der MLAR eine Bauteildicke von 80 mm. In den Versuchen soll eruiert werden, ob die Mindestbauteildicke, die in der MLAR genannt wird, auch für Holzbauteile angemessen ist, oder diese erhöht werden muss, wie beispielsweise beim Modul mit der Dicke 160 mm. Durch den Abbrand des Moduls beim Brandversuch ergibt sich gegen Ende der Versuchsdauer ungefähr die erforderliche Mindestbauteildicke nach MLAR. Die Ringspalte wurden - bis auf jene in Modul neun - mit unterschiedlichen Dichtmaterialien verschlossen. Die Leitungen waren innerhalb der Bohrlöcher exzentrisch angeordnet. Vorgesehen war jeweils eine Aufteilung des Abstands der Leitung zur Öffnungsleibung zu $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$. Im realen Versuchsaufbau konnten diese allerdings, vor allem aufgrund gebogener Kabel und des Trocknungsprozesses der Dichtmaterialien, nicht genau erreicht werden. Auf diese Weise können Aussagen bezüglich der Eignung der einzelnen Dichtmaterialien zur Abschottung in Holzbauteilen in Abhängigkeit der Leitungsart getroffen werden. Zusätzlich lässt sich daraus schließen, ob ein größeres oder ein kleineres Ringspaltmaß als kritischer zu beurteilen ist. Die untersuchten Kombinationen aus Leitungen und Dichtmaterialien sind in Abb. 7.1 dargestellt. Zusätzlich wird die jeweilige Moduldicke angegeben. Die Maße der Bohrlochdurchmesser sowie die nach dem Aufbau gemessenen minimalen und maximalen Ringspaltmaße, die sich durch die exzentrische Anordnung der Leitungen in den Bohrlöchern ergaben, können Tab. 7.1 entnommen werden.

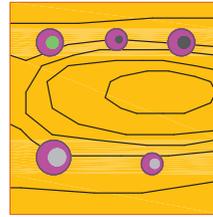
7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien



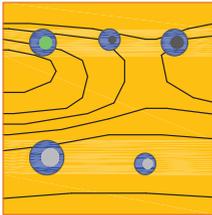
Modul 3, 60 mm



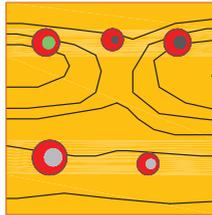
Modul 4, 60 mm



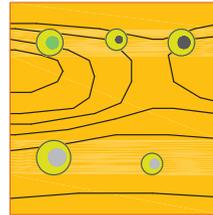
Modul 5, 160 mm



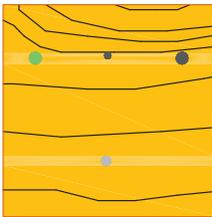
Modul 6, 160 mm



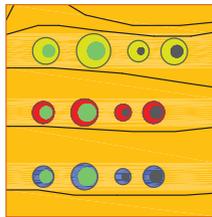
Modul 7, 160 mm



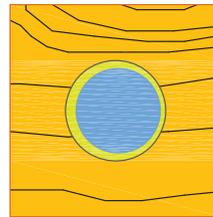
Modul 8, 160 mm



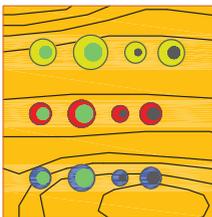
Modul 9, 60 mm



Modul 10, 60 mm



Modul 11, 60mm



Modul 12, 160 mm

Legende

- Kupferrohr Ø 12mm
- Kupferrohr Ø 22mm
- Einzelkabel
- Kabelbündel
- PVC-Rohr Ø 17mm
- PVC-Rohr Ø 32mm
- Brandschutzacryl Hilti CFS-ACR
- Gips
- Steinwolle
- Intumeszierende Füllmasse Hilti CFS-FIL
- Brettschichtholz
- Stahl-Rohr Ø 160mm

Abb. 7.1: Untersuchte Probekörper der Versuchsreihe

Tab. 7.1: Bohrloch- und Leitungsdurchmesser der Versuchsaufbauten

Modul	Leitung	Ø in mm	Dichtmaterial	Lochgröße in mm	min. Abstand in mm	max. Abstand in mm
3	Kupferrohr	12	BS-Acryl ₁₎	32	4	16
3	Kupferrohr	12	Intum. Masse ₂₎	32	9	11
3	Kupferrohr	12	Steinwolle	41	12	18
3	Kupferrohr	12	Gips	41	11	19
3	Kabelbündel ₃₎	32	BS-Acryl	51	6	15
3	Kabelbündel	32	Intum. Masse	51	5	14
3	Kabelbündel	32	Steinwolle	65	11	22
3	Einzelkabel ₄₎	22	BS-Acryl	41	6	14
3	Einzelkabel	22	Intum. Masse	41	7	13
3	Einzelkabel	22	Steinwolle	51	8	20
4	Einzelkabel	22	Gips	51	10	20
4	Kupferrohr	22	Gips	51	9	21
4	Kabelbündel	32	Gips	65	13	17
4	Kupferrohr	22	BS-Acryl	41	6	14
4	Kupferrohr	22	Intum. Masse	41	7	13
4	Kupferrohr	22	Steinwolle	51	9	21
5	Einzelkabel	22	Gips	51	7	23
5	Kupferrohr	12	Gips	41	7	23

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien

Fortsetzung von Tab. 7.1

Modul	Leitung	Ø in mm	Dichtmaterial	Lochgröße in mm	min. Abstand in mm	max. Abstand in mm
5	Kupferrohr	22	Gips	51	13	17
5	PVC-Rohr	32	Gips	65	10	20
5	PVC-Rohr	17	Gips	41	3	19
6	Einzelkabel	22	BS-Acryl	41	6	14
6	Kupferrohr	12	BS-Acryl	32	7	13
6	Kupferrohr	22	BS-Acryl	41	8	12
6	PVC-Rohr	32	BS-Acryl	51	7	13
6	PVC-Rohr	17	BS-Acryl	32	4	10
7	Einzelkabel	22	Intum. Masse	41	3	17
7	Kupferrohr	12	Intum. Masse	32	4	16
7	Kupferrohr	22	Intum. Masse	41	6	14
7	PVC-Rohr	32	Intum. Masse	51	5	15
7	PVC-Rohr	17	Intum. Masse	32	4	10
8	Einzelkabel	22	Steinwolle	51	9	21
8	Kupferrohr	12	Steinwolle	41	8	22
8	Kupferrohr	22	Steinwolle	51	7	23
8	PVC-Rohr	32	Steinwolle	65	12	18
8	PVC-Rohr	17	Steinwolle	41	9	15

Fortsetzung von Tab. 7.1

Modul	Leitung	Ø in mm	Dichtmaterial	Lochgröße in mm	min. Abstand in mm	max. Abstand in mm
9	Einzelkabel	22	-	25	0	3
9	Kupferrohr	22	-	22		
9	Kupferrohr	12	-	12		
9	PVC-Rohr	17	-	17		
10	Einzelkabel	22	BS-Acryl	41	9	11
10	Kabelbündel	32	BS-Acryl	51	6	14
10	Kupferrohr	12	BS-Acryl	32	7	13
10	Kupferrohr	22	BS-Acryl	41	10	10
10	Einzelkabel	22	Intum. Masse	41	4	16
10	Kabelbündel	32	Intum. Masse	51	5	15
10	Kupferrohr	12	Intum. Masse	32	4	16
10	Kupferrohr	22	Intum. Masse	41	7	13
10	Einzelkabel	22	Steinwolle	51	12	18
10	Kabelbündel	32	Steinwolle	65	7	23
10	Kupferrohr	12	Steinwolle	41	11	19
10	Kupferrohr	22	Steinwolle	51	13	17
11	Stahlrohr	160	Steinwolle	190	11	19

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien

Fortsetzung von Tab. 7.1

Modul	Leitung	Ø in mm	Dichtmaterial	Lochgröße in mm	min. Abstand in mm	max. Abstand in mm
12	Einzelkabel	22	BS-Acryl	41	8	12
12	Kabelbündel	32	BS-Acryl	51	5	15
12	Kupferrohr	12	BS-Acryl	32	7	13
12	Kupferrohr	22	BS-Acryl	41	7	13
12	Einzelkabel	22	Intum. Masse	41	6	14
12	Kabelbündel	32	Intum. Masse	51	5	15
12	Kupferrohr	12	Intum. Masse	32	9	11
12	Kupferrohr	22	Intum. Masse	41	8	12
12	Einzelkabel	22	Steinwolle	51	11	19
12	Kabelbündel	32	Steinwolle	65	8	22
12	Kupferrohr	12	Steinwolle	41	10	20
12	Kupferrohr	22	Steinwolle	51	10	20

¹⁾ Brandschutzacryl (BS-Acryl): Hilti Firestop Acrylic Sealant CFS-S ACR [178]

²⁾ Intumeszierende Füllmasse (Intum. Masse): Hilti Firestop Filler Mastix CFS-FIL [191]

³⁾ 1 x NYM-J 5X16 PVC Mantelleitung + 2 x (N)YM(St)-J 3X2,5/1,5 PVC Mantelleitung

⁴⁾ NYM-J 5X16 PVC Mantelleitung

Die Abstände zwischen den Bohrungen waren bei den Modulen drei bis neun zwischen nicht-brennbaren Rohren und Kabeln mindestens 5 cm groß und zwischen brennbaren Rohren entsprach der Abstand in Anlehnung an die MLAR mindestens dem Fünffachen des Durchmessers der größeren Leitung. Innerhalb der Module zehn (60 mm) und zwölf (160 mm) wurden aus den vorherigen Modulen bereits bekannte Kombinationen aus Leitungen und Dichtmaterialien erneut mit einem geringeren Abstand zueinander untersucht. Die Abstände zwischen den Bohrungen wurden gemäß den Mindestabstandsvorgaben nach MLAR 4.3.1 gewählt. Die Abstände wurden aufgrund der Brennbarkeit des Baustoffs Holz abweichend von den Vorgaben der MLAR nicht zwischen den Leitungen sondern zwischen den Bohrlöchern gemessen. Die genaue Lage

der Leitungen zueinander zeigt Abb. 7.1. Das Dichtmaterial Gips wurde in diesen Versuchen nicht weiter untersucht, da aus den vorherigen Versuchen ersichtlich wurde, dass der dauerhafte Verbund zwischen Gips und Holz nicht sichergestellt werden kann.

Bei einem zu geringen Abstand der Bohrlöcher im Holz untereinander kann es durch die gegenseitige Beeinflussung zu verstärktem Abbrand zwischen den Bohrlöchern kommen. Geschieht dies, kann ein verfrühtes Versagen eintreten. Eine Festlegung des Abstandes der Leitungen untereinander in beliebig großen eigenen Bohrlöchern ist daher nicht zielführend. In [36] wird für Kabeldurchführungen ein Abstand zwischen zwei Bohrlöchern empfohlen, der mindestens dem größeren Bohrl Lochdurchmesser entspricht. Auch hier wird die Lochgröße bzw. der Lochabstand zugrunde gelegt und nicht der Abstand zwischen den Leitungen. Durch die Wahl des Leitungsdurchmessers statt des Lochdurchmessers als Mindestabstand in diesen Versuchen ergeben sich kritischere Situationen bzgl. der Abstände, da die Bohrlochgröße immer mindestens dem Leitungsdurchmesser entspricht.

7.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [181] der TU Kaiserslautern in Anlehnung an DIN EN 1366-3 [131] durchgeführt. Die Beflammung erfolgte nach ETK. Die Versuchsdauer betrug bei Modulen der Dicke 60 mm 30 Minuten und bei Modulen der Dicke 160 mm 90 Minuten. Die Enden metallischer Rohre waren innerhalb des Prüfofens mit Stahlkappen verschlossen. Die Kunststoffrohre waren beidseitig offen. Kabelenden wurden auf der Kaltseite verschlossen. Nach Versuchsende wurden die Probekörper schnellstmöglich ausgebaut und direkt mit Wasser abgelöscht, um weiteres Verkohlen nach Versuchsende möglichst zu beschränken. Abbildung 7.2 zeigt in der linken Bildseite den allgemeinen Versuchsaufbau. Auf der rechten Bildseite der Abbildung sind die beiden Messstellen gekennzeichnet, an denen an jeder Leitung die Temperaturen über die Versuchsdauer aufgezeichnet wurden. Weitere Beobachtungen an den Probekörpern wurden während der Versuche schriftlich festgehalten bzw. per Video oder Foto aufgezeichnet.

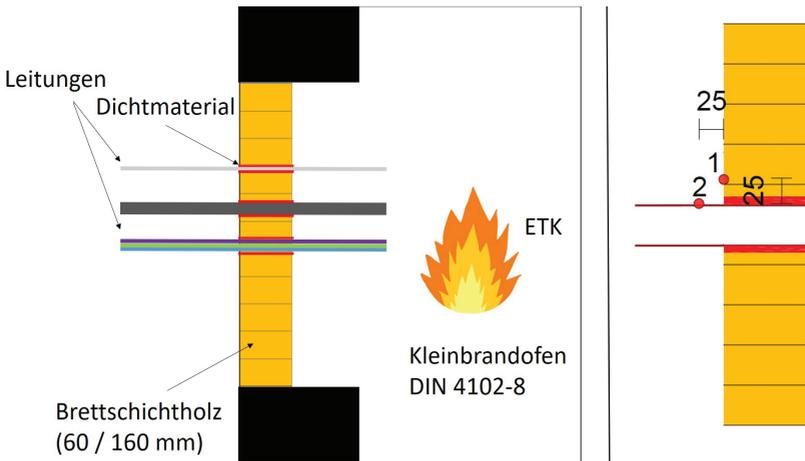


Abb. 7.2: Einzelne Leitungen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf und oberhalb der Leitungen

7.1.3 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchsreihe beschrieben und bewertet. Zunächst wird dabei auf die Ergebnisse der Temperaturmessung auf und oberhalb der Leitungen eingegangen. Folgend wird die Verkohlungs bzw. der Abbrand innerhalb der einzelnen Bohröffnungen beurteilt. Dazu wurden Schnitte durch alle Bohrungen hergestellt. Anschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und bewertet sowie Ausführungsempfehlungen aufgrund der Versuchsergebnisse formuliert.

Temperaturerhöhungen auf den Leitungen

In [192] wurden die Ergebnisse der Versuche an Modul drei und Modul vier, welche die in der MLAR Abschnitt 4.2 enthaltenen Erleichterungen für feuerhemmende Bauteile abbilden, hinsichtlich der Temperaturerhöhungen auf den Leitungen und der Holzoberfläche oberhalb der Leitungen analysiert (Messdaten in Anhang A). Es konnte festgestellt werden, dass vorwiegend die Art der Leitungen entscheidend dafür ist, wie hoch die Temperatur auf der brandabgewandten Seite auf der Leitung ansteigt. Die Art des Dichtmaterials beeinflusste die Temperaturen lediglich zweitrangig. Die untersuchten Kabel und Kabelbündel wiesen dabei in allen Fällen, bis auf die Kombination aus Kabelbündel und Steinwolle, unkritische Temperaturerhöhungen auf. Die gemessenen Temperaturerhöhungen auf der Holzoberfläche oberhalb der Leitungen waren generell unbedenklich. Die gemessenen Temperaturanstiege (ca. 300 K - 400 K) auf den Kupferrohren sind als kritisch anzusehen. Im Versuch kam es nicht zur Flammenbildung auf der brandabgewandten Seite. Eine Möglichkeit, diesen hohen Temperaturen zu begegnen, ist beispielsweise die Anordnung einer nichtbrennbaren Rohrdämmung auf einer Länge von je 500 mm beidseits des Bauteils, wie auch in der MLAR Abschnitt 4.3.3 für Rohrleitungen mit brennbaren Dämmstoffen gefordert.

Die gemessenen Temperaturerhöhungen der Module fünf bis acht, die die Erleichterungen der MLAR Abschnitt 4.3.2 repräsentieren, sind ebenfalls in Anhang A zu finden. Auch bei diesen Modulen wurden bei den Einzelkabeldurchführungen durchgehend unkritische Temperaturerhöhungen verzeichnet. Bei den Kupferrohrdurchführungen überschritt auch in diesen Versuchen die gemessene Temperaturerhöhung auf den Leitungen in allen Fällen zumindest geringfügig 180 K. Die Abdichtung mit Steinwolle führte auch hier zu besonders hohen Temperaturen auf den Leitungen. Bei den Durchführungen von PVC-Rohren ist zu erkennen, dass die Abdichtung mit dem starren Material Gips zu unvorhersehbaren Temperaturschwankungen auf der Leitungsoberfläche führt. Zudem versagte während des Versuchs der Raumabschluss (siehe [193]). Die Abdichtung mit Steinwolle und Brandschutzacryl führten beim PVC-Rohr mit größerem Durchmesser (\varnothing 32 mm) während des Versuchsverlaufs ebenfalls zu kritischen Temperaturerhöhungen auf der unbedeckten Seite. Einzig die Abdichtung mittels Intumeszenzmaterial lieferte ein positives Ergebnis. Der sich ergebende Temperaturverlauf ähnelt jenen von klassifizierten Rohrmanschetten zur Abschottung von brennbaren Rohren (vgl. [98]). Die Temperaturerhöhungen auf der Oberfläche des kleineren PVC-Rohrs (\varnothing 17 mm) waren durchweg unkritisch. Die beschriebenen Ergebnisse hinsichtlich der Temperaturerhöhungen auf den Leitungen in den Modulen drei bis acht sind in Tab. 7.3 dargestellt. Konstellationen bei denen das Temperaturkriterium überschritten wurde sind mit einem „X“ markiert.

In Modul 9 wurden Leitungen in passgenauen Bohrungen untersucht. Die gemessenen Temperaturdifferenzen auf den Rohrleitungen zeigen bei den Kupferrohren mit dem Durchmesser 12 mm ähnliche bzw. leicht geringere Werte im Vergleich zu den Durchführungen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien. Auf den größeren Kupferrohren (22 mm) ergaben die Messungen niedrigere Temperaturdifferenzen als bei den Rohren mit Ringspalt und Ringspaltverschluss. Die Temperatur auf der Kabeloberfläche ist ebenfalls vergleichbar mit den abgedichteten Varianten, lediglich die Abdichtung mit Intumeszenzmaterial führte zu höheren Temperaturen auf der Leitung. Die Temperaturerhöhungen auf dem PVC-Rohr waren unbedenklich. Auf der Hol-

Tab. 7.3: Überschreitung des Temperaturkriteriums auf den Leitungen in den Modulen drei bis acht

Modul	Leitung	Intumeszenzmaterial	Brandschutzacryl	Steinwolle	Gips
3 und 4	Kupferrohre	X	X	X	X
	Einzelkabel				
	Kabelbündel			X	
5 bis 8	Kupferrohre	X	X	X	X
	Einzelkabel				
	PVC 17 mm				
	PVC 32 mm		X	X	X

zoberfläche ergaben sich Temperaturerhöhungen von 33 K bis 87 K. Diese liegen teils unterhalb der festgestellten Temperaturerhöhungen bei den Modulen mit Dichtmaterialien. In diesem Zusammenhang ist die Position der Messstelle zu berücksichtigen, die sich immer 25 mm oberhalb der Leitung befand und somit an dieser Stelle die teils höhere Wärmeleitfähigkeit der Dichtmaterials im Vergleich zu Holz erkennen lässt.

Das Ergebnis des Moduls elf kann nicht unmittelbar bewertet werden, da während des Versuchs der Verschluss des Rohrs im Ofeninnenraum versagte. Die heißen Gase aus dem Ofenraum konnten ungehindert in das Rohr eindringen, was das Versuchsergebnis unvergleichbar werden ließ. Es traten starke Temperaturerhöhungen auf der Rohroberfläche auf, ca. 700 K nach 30 Minuten Versuchsdauer. Die Messstelle auf der Holzoberfläche oberhalb des Rohres zeigte eine Temperaturerhöhung von ca. 200 K. Es traten keine Flammen auf der unbeflammten Seite auf. Die Anordnung der Durchführungen in den Modulen zehn und zwölf in kleinerem Abstand zueinander führte in beiden Modulen teils zu stärkeren Temperaturerhöhungen auf den Leitungen. Dies ist vor allem an den Kupferrohren erkennbar. Bei der Einzelkabeldurchführung in Modul zehn, die mit Steinwolle abgedichtet wurde, stieg die Temperaturerhöhung gegen Versuchsende geringfügig über 180 K an. Gleiches war bei der Durchführung des Kabelbündels zu beobachten, welches mit Intumeszenzmasse abgedichtet wurde. Auf der Holzoberfläche oberhalb der Leitungen waren stärkere Temperaturerhöhungen nur bei Kupferrohren in Verbindung mit Brandschutzacryl oder intumeszierender Dichtmasse zu beobachten, wobei diese Abweichungen auch durch andere geringfügig veränderte Parameter bedingt sein können. Insgesamt ergaben sich keine bedeutenden Änderungen in den Temperaturverläufen. Eine Systematik ist anhand der Ergebnisse der Temperaturmessungen nicht zu erkennen.

Abbrand um die Bohröffnungen

Zur weiteren Beurteilung der Ergebnisse wurden Schnitte durch die teilweise verkohlten Probekörper hergestellt, jeweils horizontal mittig durch die Bohrlöcher. Ein Schnitt ist beispielhaft in Abb. 7.3 dargestellt. Alle Schnitte (Ober- und Unterseite der Bohrungen) sind in Anlage B zu finden. Anhand der Schnitte kann der Abbrand um die Bohrung im Holzquerschnitt betrachtet werden. Die Tiefe und Ausbreitung dieses Parameters in den einzelnen Bohrlöchern kann in Abhängigkeit von Leitungsart und Dichtmaterial bewertet werden. Die Parameter können

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien



Abb. 7.3: Beispielhafte Darstellung eines Schnittes nach dem Brandversuch durch Bohrungen eines Probekörpers

somit zusätzlich zur Temperaturmessung herangezogen werden, um die Eignung der verschiedenen Dichtmaterialien für die Abdichtung der unterschiedlichen Leitungsarten zu beurteilen. Zur Auswertung wurde die Verkohlungs- und der Abbrand in den Bohröffnungen systematisch beurteilt. Mit den Kennungen X, XX und XXX wurde der Einbrand über die Tiefe der Bohrkante beurteilt, von X \Rightarrow gerade Bohrkante, zu XXX \Rightarrow seitlicher Einbrand über die gesamte Bauteiltiefe. Mit den Zahlen eins bis drei wurde bewertet, wie weit die Verkohlungs- in der Bohröffnung fortgeschritten war. Bewertet wurde von eins \Rightarrow keine Verkohlungs- bis drei \Rightarrow komplett schwarz verfärbte Bohröffnung. Tabelle 7.4 enthält für alle möglichen Bewertungen ein Bewertungsbeispiel. Eine Tabelle mit den Bewertungen aller Bohröffnungen ist in Anlage C, Tabelle 1 zu finden. In den Fällen, in denen sich links und rechts (Draufsicht auf die Schnittkante bei nach unten angeordneter unbeflammter Probekörperseite) in der Bohröffnung unterschiedliche Bewertungen ergaben, sind beide angegeben und durch „/“ getrennt. Die Bewertungen der ursprünglich gleichen Lochseite sind daher bei Betrachtung der Oberseite und Unterseite der Bohrungen gespiegelt. Die Bewertungen wurden anschließend entsprechend der Stärke des Einbrandes bzw. der Verkohlungs- farblich gekennzeichnet. Bei unterschiedlichen Bewertungen der Seiten einer Bohrung wurde die kritischere Bewertung als Grundlage für die Kennzeichnung verwendet. Anhand der farblichen Kennzeichnung ist zu erkennen, dass sich die Abbrand- und Verkohlungserscheinungen der Ober- und Unterseite der Bohrungen nur wenig unterscheiden. Weiterhin ist zu erkennen, dass kleinere Abstände zwischen den Bohrungen, vor allem bei längerer Branddauer, zu stärkeren Abbrand- und Verkohlungserscheinungen führen. Die Vergleichbarkeit der Verkohlungserscheinungen und des Abbrands in den Bohröffnungen wird dadurch teilweise eingeschränkt, dass die Bohrlöcherdurchmesser je nach Dichtmaterial angepasst wurden (vgl. Tab. 7.1). Es wurden für Abdichtungen mit Intumeszenzmaterial und Brandschutzacryl kleinere Bohröffnungen und daraus resultierend kleinere Ringspaltabmessungen, als für Abdichtungen mit Steinwolle und Gips untersucht. Durch kleinere oder größere Entfernung der Leitung zur Öffnungsleibung, können sich Unterschiede bei deren Abbrand bzw. Verfärbung ergeben. Zu beachten ist ebenfalls, dass Verfärbungen in Bohröffnungen auch durch chemische Reaktionen der Dichtmaterialien mit der Holzoberfläche hervorgerufen werden können. Beispielsweise kann Ammoniumpolyphosphat, welches häufig in Brandschutzprodukten verwendet wird, Braunverfärbungen von Holz hervorrufen [98].

In einem weiteren Auswertungsschritt wurde überprüft, ob die exzentrische Anordnung der Leitungen einen stärkeren seitlichen Einbrand auf der Seite mit dem geringeren Abstand der Leitung zur Bohrkante verursacht, siehe dazu Anhang C Tabelle 2. Anhand der farblichen Kennzeichnung der Tabelle ist deutlich zu erkennen, dass bis auf wenige Ausnahmen der geringere Abstand der Leitung zur Bohrkante zu stärkeren Einbrand- und oder Verkohlungserscheinungen geführt hat.

Tab. 7.4: Bewertung des Abbrandes in der Bohröffnung

Beispiel	Bewertung	Beschreibung
	X1	(nahezu) kein zusätzlicher Einbrand; (nahezu) keine Verfärbung
	X2	Kein zusätzlicher Einbrand; teilweise schwarz verfärbt
	X3	(nahezu) kein zusätzlicher Einbrand; vollständige Schwarzverfärbung
	XX2	seitlicher Einbrand nicht über die volle Höhe, teils gerade Bohrkante verblieben; teilweise schwarz verfärbt
	XX3	seitlicher Einbrand nicht über die volle Höhe, teils gerade Bohrkante verblieben; vollständige Schwarzverfärbung
	XXX3	seitlicher Einbrand über die volle Höhe; vollständige Schwarzverfärbung

Bewertungen, bei denen eine größere Anzahl an X zur Bewertung des Einbrandes als die Höhe der Zahl zur Bewertung der Verfärbung vorliegt, sind nicht möglich, da Abbrand immer eine Schwarzverfärbung vorhergeht.

Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Zur Bewertung der Ergebnisse werden zunächst die Bewertungskriterien nach DIN EN 1366-3 [131] i. V. m. DIN EN 1363-1 [131] herangezogen. Die Bewertung des Abbrandes innerhalb von Bohröffnungen stellt kein Bewertungskriterium bei der Beurteilung von Raumabschluss und Wärmedämmung dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen daher nachrangig herangezogen werden. Dies gilt insbesondere für die Formulierung von Empfehlungen hinsichtlich der Eignung von Dichtmaterialien für unterschiedliche Leitungsarten und möglicher Ringspaltabmessungen.

Raumabschluss Das Leistungskriterium Raumabschluss wurde bei allen Durchführungen aufrechterhalten. Eine Ausnahme besteht hinsichtlich der Durchführung des $\varnothing 32$ mm PVC-Rohrs in Modul fünf, die mit Gips abgedichtet wurde. Aufgrund der Betrachtung des Raumabschlusses sind zunächst alle untersuchten Dichtmaterialien als geeignet anzusehen, bis auf die genannte Kombination von Gips und PVC-Rohr.

Wärmedämmung Das Leistungskriterium Wärmedämmung wurde an der Messstelle auf der Holzoberfläche oberhalb der Leitungen in jedem Fall eingehalten. Auf den Leitungen selbst wurde es teils überschritten (vgl. Tab. 7.3 und Anhang A). Deutliche Überschreitungen der kritischen Temperaturerhöhung von 180 K traten bei den Kupferrohrdurchführungen auf. Die Überschreitungen waren dabei bei den 60 mm dicken Modulen nach 30 Minuten deutlich stärker als bei den 160 mm dicken Modulen nach 90 Minuten. Bei den 60 mm dicken Modulen, die 30 Minuten beansprucht wurden, kam es zudem zur Temperaturerhöhung um 195 K bei der Durchführung eines Kabelbündels, das mit Steinwolle abgedichtet wurde. In den 160 mm dicken Modulen wurden Kabelbündel nicht untersucht. Die Temperaturdifferenzen auf den Einzelkabeln in den 160 mm-Modulen waren geringfügig höher als die bei den 60 mm Modulen und liegen nahe bei der maßgebenden Temperaturdifferenz von 180 K. Zusammenfassend ist, wie in [192], für 30-minütige Beanspruchung auch bei 90-minütiger Beanspruchung von nicht-brennbaren Rohren in 160 mm dicken Modulen eine zusätzliche Maßnahme an den Leitungen zu empfehlen. Weiterhin wird empfohlen Kabelbündel in 60 mm dicken Modulen nicht mit Steinwolle abzudichten.

Die Moduldicke von 160 mm ist hinsichtlich der Temperaturen auf den Kabeloberflächen angepasst an die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Die Moduldicke weiter zu erhöhen, mit dem Ziel die kritische Temperatur auch an der Messstelle auf den Kupferleitungen einzuhalten, würde zu sehr großen Querschnitten führen und erscheint im Hinblick auf die Temperaturen auf den anderen Leitungen unverhältnismäßig. Andere Maßnahmen um die Entzündung nahegelegener Gegenstände auf der brandabgewandten Seite zu verhindern, wie z. B. die Anordnung einer nichtbrennbaren Rohrdämmung, erscheinen sinnvoller. Fraglich ist allerdings, ob in Hinblick auf die aktuell geltenden Regelungen hinsichtlich Einzelleitungsdurchführungen überhaupt eine zusätzliche Maßnahme an den Leitungen erforderlich ist.

Die in der MLAR für feuerbeständige Bauteile vorgegebene Mindestbauteildicke zur Anwendung der Erleichterungen beträgt 80 mm. Die betrachteten Module (160 mm) wiesen einen Abbrand der Querschnitte von 70 mm - 100 mm auf, also Restquerschnitte von 70 mm - 90 mm [193]. Nach der Versuchsdauer von 90 Minuten und dem Abbrand des Holzquerschnitts ergibt sich eine Restquerschnittdicke, die etwa der in der MLAR geforderten Mindestdicke feuerbeständiger Bauteile für die Anwendung der dort beschriebenen Erleichterungen (vor dem Brand) gefordert wird. Auch aus diesem Grund erscheint die Ausgangsmoduldicke der Module von 160 mm sinnvoll, wenn eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht werden soll. Es ist dennoch anzunehmen, dass die Führung der Leitungen durch Holzbauteile anstelle von Betonbauteilen zu höheren Temperaturen auf den Leitungen führt, da Holz eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt und deshalb weniger Wärme aus dem Durchführungsbereich vom Bauteil aufgenommen

wird. Teilweise relativiert wird dieser Effekt durch die anfangs größere Bauteildicke (Wärmekapazität und Distanz zur Messstelle auf der Kaltseite).

Die Moduldicke von 60 mm erscheint, um eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten zu erreichen, bei Beurteilung anhand der Temperaturen auf den Kabeloberflächen ebenfalls passend. Bei der Durchführung von Kabelbündeln kam es allerdings in einem Fall zur geringfügigen Überschreitung des Temperaturkriteriums. Es ist daher in Erwägung zu ziehen die Moduldicke zu erhöhen. Bei Anwendung des gleichen Ansatzes, der für die dickeren Module zuvor beschrieben wurde, ergibt sich Folgendes:

Die MLAR gibt für nichtbrennbare feuerhemmende Bauteile zur Anwendung der dort beschriebenen Erleichterungen eine Mindestbauteildicke von 60 mm vor. Bei Annahme eines Abbrandes des ungeschwächten Holzquerschnitts von ca. $0,7 \text{ mm/min} \cdot 30 \text{ min} = 21 \text{ mm}$, würde sich zur Erhaltung der Mindestdicke nach dem Brand eine anfängliche Moduldicke von ca. $60 \text{ mm} + 21 \text{ mm} \approx 80 \text{ mm}$ ergeben. Nach Erfahrungswerten von den durchgeführten Versuchen ergibt sich ein leicht stärkerer Abbrand. Die ursprünglich 60 mm dicken Module wiesen Restquerschnitte von ca. 35 mm auf, was einen Abbrand von ca. 25 mm ergibt. Aufgrund des leicht erhöhten Abbrands ist eine Moduldicke von 90 mm für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer von 30 min aufgrund dieser Ergebnisse als sinnvoll zu erachten.

Bei den Durchführungen brennbarer Rohre, in diesem Fall aus PVC, ist die Überschreitung bzw. Einhaltung des Wärmedämmkriteriums weniger auf die Dicke des Moduls als auf die Fähigkeit des verwendeten Dichtmaterials, die entstehende Öffnung zu verschließen, zurückzuführen. Dies gilt vor allem für größere Rohrdurchmesser. Beim PVC-Rohr $\varnothing 32 \text{ mm}$ wurde das Wärmedämmkriterium nur bei Abdichtung mit intumeszierenden Dichtmaterialien eingehalten. Basierend auf den vorliegenden Versuchsergebnissen sollte für die Abdichtung brennbarer Rohre ab einem Durchmesser von mehr als 17 mm intumeszierendes Material verwendet werden.

Infolge der geringeren Abstände zwischen den Leitungen in den Modulen zehn und zwölf kam es teils zu stärkeren Temperaturerhöhungen. Dies zeigt, dass die Leitungsdurchführungen sich gegenseitig beeinflussen. Es kann gefolgert werden, dass die in den beiden genannten Modulen untersuchten Abstände zwischen den Leitungsdurchführungen als nicht ausreichend zu beurteilen sind.

Abbrand/Verfärbung innerhalb der Bohröffnung Die Beobachtungen an den Bohröffnungen nach Versuchsende stellen kein Beurteilungskriterium zur Leistungsfähigkeit einer Leitungsdurchführung gemäß DIN EN 1366-3 [131] dar. Um die Wechselwirkungen von Leitungen sowie Dichtmaterialien und Holz zu untersuchen, sind diese Beobachtungen allerdings geeignet.

Anhand Tabelle 1 in Anlage C ist zu erkennen, dass sich innerhalb der Bohrlöcher die Verkohlungserscheinungen an der Oberseite und der Unterseite nur geringfügig unterscheiden. Bei künftigen Betrachtungen ist es daher ausreichend, eine Seite des Schnittes durch die Bohrung unter der Prämisse zu beurteilen, dass die Leitung vertikal zentriert in der Öffnung verlegt ist. Ebenfalls ist an der Bewertung des Abbrandes zu erkennen, dass die Durchführung von Kabeln und nichtbrennbaren Rohrleitungen durch passgenaue Bohrungen hinsichtlich des Einbrandes und der Verkohlung zu kritischeren Ergebnissen führt als die Durchführungen der Leitungen, die mit Dichtmaterial innerhalb der Bohrungen umschlossen wurden. Die Abbränderscheinungen in diesen Bohrlöchern ohne Dichtmaterial erhielten jeweils die kritischste Bewertung XXX3.

Die Auswertung der Abbrand- und Verkohlungserscheinungen in horizontaler Ebene zeigt eine deutliche Abhängigkeit zwischen exzentrischer Anordnung und festgestellter Ausprägung des Abbrands bzw. der Verkohlung. Ein kleinerer Abstand der Leitung zur Bohrkante führte zu stärkeren Abbrand- und/oder Verkohlungserscheinungen.

Durch diesen stärkeren Abbrand kann es zu unterschiedlichen Bewertungen des Abbrands links und rechts der Leitungen kommen. Es ist bei Betrachtung der Ergebnisse im Einzelfall zu beurteilen, ob die kleinere Ringspaltabmessung zu einer maßgeblichen Verschlechterung des Verhaltens der Durchführung im Brandfall beiträgt. Betrachtet werden müssen nur die Kombinationen

aus Leitungen und Dichtmaterial, die aufgrund der Ergebnisse der Temperaturmessung und der Verkohlungs- und Abbranderscheinungen empfohlen werden können. Bei der Bewertung der Abbrand- und Verkohlungserscheinungen der Durchführungen in den Modulen zehn und zwölf ergaben sich aufgrund der geringeren Abstände zwischen den Durchführungen kritischere Bewertungen, mit Ausnahme der Durchführungen von Kabeln und Kabelbündeln, die mit Brandschutzacryl abgedichtet und für 30 Minuten beflammt wurden. Daher sind insgesamt, auch aufgrund der Abbranderscheinungen in den Bohröffnungen, die kleineren untersuchten Abstände zwischen den Leitungen als nicht ausreichend zu beurteilen.

Allgemeine Erkenntnisse und Empfehlungen aufgrund der Versuchsreihe Beim Dichtmaterial Gips zeigen kürzere Versuchsdauern positivere Ergebnisse. Dies könnte auf das im Gips chemisch gebundene Wasser zurückzuführen sein, welches bei Erwärmung freigesetzt wird und somit zu einem Kühleffekt im Durchführungsbereich führt. Bei einer längeren Branddauer ist das Wasser zu einem gewissen Zeitpunkt komplett verdampft und der Kühleffekt entfällt. Bei verschiedenen Versuchen [193] konnte eine Spaltbildung im Holz zwischen den Bohrungen beobachtet werden. Es ist zu vermuten, dass durch Dichtungsmaterialien, die bei Erwärmung Druck im Öffnungsbereich erzeugen, die Entstehung oder Vergrößerung von Rissen im Holz um den Durchführungsbereich begünstigt wird. Intumeszierende Materialien sollten daher in Holzbauteilen nicht eingesetzt werden, wo sie nicht benötigt werden um einen Abbrand von Material zu kompensieren.

Weiterhin zeigen die Versuchsergebnisse, dass nichtbrennbare Rohrleitungen aus Metall mit hoher Wärmeleitfähigkeit zum größten Wärmeeintrag in den Bereich der Öffnungsleibung führen. Das umgebende Dichtmaterial hat durch seine thermischen Eigenschaften Einfluss darauf, wie viel Wärmeenergie von der Rohrleitung an das Dichtmaterial bzw. das umgebende Bauteil abgegeben wird. Wird wenig Wärmeenergie vom Dichtmaterial aufgenommen bzw. vom Bauteil absorbiert verbleibt folglich mehr Wärmeenergie in der Rohrleitung und diese weist höhere Temperaturen auf der unbeflammten Seite auf.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Versuchsreihe sollte die Moduldicke zur Leitungsdurchführung für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten 90 mm und für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten 160 mm betragen. Mit dem gleichen Ansatz wäre für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten, ausgehend von einer in der MLAR geforderten Mindestbauteildicke von 70 mm eine Moduldicke $\geq 70 \text{ mm} + 0,7 \text{ mm}/\text{min} \cdot 60 \text{ min} = 112 \text{ mm}$ ergeben. Daher ist eine Moduldicke von 120 mm zu empfehlen.

Zusammenfassend werden folgende Moduldicken für die unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern empfohlen.

- Feuerwiderstandsdauer 30 Minuten \Rightarrow 90 mm
- Feuerwiderstandsdauer 60 Minuten \Rightarrow 120 mm
- Feuerwiderstandsdauer 90 Minuten \Rightarrow 160 mm

Da für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten bisher noch keine Untersuchungen durchgeführt wurden, muss die Moduldicke von 120 mm noch bestätigt werden (siehe dazu Abschnitt 7.4.2). Nach einer entsprechenden Bestätigung der Moduldicke, können die für die Feuerwiderstandsdauer 90 Minuten geeigneten Dichtmaterialien auch für die Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten empfohlen werden.

Die Abstände zwischen den Bohrungen wurden in den Modulen drei bis acht mit jeweils 50 mm realisiert. Hierbei konnte keine gegenseitige Beeinflussung der Durchführungen festgestellt werden. Ein Abstand von 50 mm zwischen den Bohrungen kann daher für die betrachteten Fälle als ausreichend erachtet werden. Die in den Modulen zehn und zwölf untersuchten geringeren Abstände, die in Anlehnung an die MLAR geplant wurden, haben zur gegenseitigen Beeinflussung

der Durchführungen und somit zu teilweise stärker erhöhten Temperaturen und zum verstärktem Abbrand des Holzquerschnitts geführt. Diese untersuchten Abstände sind damit als nicht ausreichend zu bewerten. Aufgrund dieser Versuchsreihe kann für die untersuchten Leitungen in Verbindung mit den jeweiligen Dichtmaterialien ein Abstand von ≥ 50 mm zwischen den Bohrungen empfohlen werden.

Hinweise zur Verwendung von Dichtmaterialien Aufgrund der gemessenen Temperaturerhöhungen auf den Leitungen sowie den beobachteten Verkohlungs- und Abbranderscheinungen innerhalb der Bohröffnungen wird für die unterschiedlichen untersuchten Leitungsarten die Verwendung folgender Dichtmaterialien empfohlen. Grundlage für die Empfehlung ist die Einhaltung des Raumabschlusses sowie des Wärmedämmkriteriums nach DIN EN 1366-4 [194] und eine Bewertung der Abbrand- und Verkohlungserscheinungen innerhalb der Bohrung von mindestens XX2. Mit dieser Bewertung kann sichergestellt werden, dass Abbranderscheinungen nur innerhalb der Bohröffnung auftreten und die Temperaturen um die Austrittsstelle der Leitungen in einem akzeptablen Bereich liegen.

1. Zum Erreichen einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten wird unabhängig von der Art der Leitung die Abdichtung mit Steinwolle (ausgenommen Kabelbündel) oder Brandschutzacryl empfohlen. Für die Abdichtung von Kabeln kann auch Intumeszenzmaterial verwendet werden. Für nichtbrennbare Rohre dagegen ist die Verwendung von Intumeszenzmaterial ungeeignet.
2. Für die Abdichtung von brennbaren Rohren bis $\varnothing 32$ mm ist Intumeszenzmaterial zu empfehlen. Auch für Branddauern bis 90 Minuten.
3. Ringspalte um PVC-Rohre $\varnothing \leq 17$ mm können bis zu einer Branddauer von 90 Minuten mit einem beliebigen der verwendeten Dichtmaterialien (ausgenommen Gips) verschlossen werden, zudem können die Rohre in passgenauen Bohrungen geführt werden.
4. Bei einer Branddauer von 90 Minuten sollte für die Abdichtung von Kupferrohren ebenfalls Steinwolle oder Brandschutzacryl verwendet werden.
5. Für die Abdichtung von Kabeln sollte bei einer Branddauer von 90 Minuten Brandschutzacryl verwendet werden.
6. Das Dichtmaterial Gips sollte aufgrund der möglichen Spaltbildung zwischen Gipsverschluss und Holz nicht verwendet werden. Bei der Abdichtung von Kabeln, Kabelbündeln und Kupferrohren ($\varnothing \leq 12$ mm) wurden allerdings bei einer Branddauer von 30 Minuten positive Ergebnisse erzielt.

Tabelle 7.5 fasst die Empfehlungen zusammen.

Im Folgenden sollen die empfohlenen Kombinationen hinsichtlich der Bewertung des Abbrandes innerhalb der Bohröffnung analysiert werden, um erforderliche Ringspaltabmessungen abzuleiten. Diskutiert werden nur Konstellationen, bei denen sich hinsichtlich des Abbrandes unterschiedliche Bewertungen auf den beiden Seiten der jeweiligen Leitung ergeben haben und somit eine dieser Ringspaltabmessung festgelegt werden muss. Für die Fälle, in denen sich beidseits der Leitung dieselbe Bewertung ergeben hat, ist keine Abwägung erforderlich. Das kleinere realisierte Maß der Ringspaltabmessung im Versuch kann zu Grunde gelegt werden.

Aufzählungspunkt 1 empfiehlt die Verwendung von Steinwolle oder Brandschutzacryl unabhängig von der Leitungsart. Die Betrachtung der Abbranderscheinungen der zuvor empfohlenen Kombinationen aus Leitung und Dichtmaterial zeigt, dass bei der Durchführung des Einzelkabels die kleinere Abmessung von 6 mm im Vergleich zur Abmessung von 14 mm zur Bewertung XX2 bzw. XX3 anstatt zur Bewertung X1 bzw. X3 geführt hat. Dies ist nach Meinung des Autors und aufgrund der weiter oben genannten Entscheidungsregel als eine maßgebliche

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien

Tab. 7.5: Zusammenfassung der Empfehlungen hinsichtlich der Verwendung von Dichtmaterialien bei den untersuchten Leitungen

Feuerwiderstandsdauer	Leitung	Intumeszenzmaterial	Brandschutzacryl	Steinwolle	Ohne (passgenau)
30 Minuten	Kupferrohre		X	X	
	Einzelkabel	X	X	X	
	Kabelbündel		X		
	PVC $\varnothing \leq 17 \text{ mm}$	X	X	X	X
90 Minuten	Kupferrohre		X	X	
	Einzelkabel		X		
	PVC $\varnothing \leq 17 \text{ mm}$	X	X	X	X
	PVC $\varnothing \leq 32 \text{ mm}$	X			

Verschlechterung zu werten, da zum einen der Abbrand und zum anderen die Verfärbung bis zur unbeflammten Seite weiter fortgeschritten ist. Es wird daher eine Mindestabmessung des Ringspalts von 10 mm bei der Abdichtung mit Brandschutzacryl empfohlen. Bei einer Versuchsdauer von 90 Minuten ergaben sich unterschiedliche Bewertungen hinsichtlich des Abbrandes um Kupferrohre bei Abdichtung mit Brandschutzacryl sowie Steinwolle. Bei Verwendung von Brandschutzacryl wurde beim Versuchsaufbau das vorgesehene Maß des kleineren Abstands von 5 mm um 3 mm überschritten. Dennoch ergab sich eine Bewertung von XX3 im Vergleich zu einer Bewertung von X2 auf der anderen Rohrseite, welche folglich einen Abstand von 12 mm zum Holz aufwies. Im Versuchsaufbau sollte der größere Abstand mit 15 mm realisiert werden, der daher empfohlen wird. Bei der Verwendung von Steinwolle ergaben sich ebenfalls unterschiedliche Bewertungen (XX3 und X2). An dieser Stelle wurde der angestrebte kleinere Abstand der Leitung zur Bohrungsleitung von 10 mm im Versuch um 3 mm unterschritten. Empfohlen wird folglich eine Mindest Ringspaltabmessung von 20 mm. Bei der Abdichtung von Einzelkabeln mit Brandschutzacryl für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten wurde ein minimales Ringspaltmaß von 6 mm realisiert. Oberhalb der Leitung wurde der Abbrand beidseits mit XX2 bewertet, unterhalb der Leitung mit X3 und XX2. Die Bewertung XX2 wäre nach der zugrundeliegenden Entscheidungsregel ausreichend und damit auch das Ringspaltmaß von 6 mm zu empfehlen. Bei Kabeldurchführungen, die für die Versuchsdauer von 30 Minuten untersucht wurden, ergaben sich allerdings für solch kleine Ringspaltmaße kritische Bewertungen. Es wird daher auch für die Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten ein umlaufendes Mindest ringspaltmaß von 10 mm empfohlen.

Zusammenfassend können aufgrund der beobachteten Abbranderscheinungen folgende Empfehlungen hinsichtlich erforderlicher Ringspaltabmessungen gegeben werden:

1. Bei der Abdichtung von Leitungen zum Erreichen einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten sollte der Ringspalt ein Mindestmaß von 10 mm aufweisen. Abweichend ist bei der Verwendung von Intumeszenzmaterial zur Abdichtung von Ringspalten um Kabel und Kabelbündel ein Ringspalt von 5 mm ausreichend.
2. Zur Abdichtung brennbarer Rohre $\varnothing \leq 32$ mm mit Intumeszenzmaterial ist eine Mindestringspaltabmessung von 5 mm ausreichend.
3. Zur Abdichtung von brennbaren Rohren $\varnothing \leq 17$ mm ist keine Mindestringspaltabmessung einzuhalten. Ist die Bohrung nicht passgenau, muss die Restöffnung vollständig über die volle Bauteiltiefe (mit einem beliebigen der hier verwendeten Dichtmaterialien) verschlossen werden.
4. Zur Abdichtung von Kupferrohren bei einer Branddauer von 90 Minuten sollte der Ringspalt umlaufend ein Mindestmaß von 15 mm bei Verwendung von Brandschutzacryl bzw. von 20 mm bei Verwendung von Steinwolle aufweisen.
5. Bei der Abdichtung von Einzelkabeln für die Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten wird ein umlaufendes Mindestmaß des Ringspalts von 10 mm empfohlen.

Tabelle 7.5 fasst die Empfehlungen zusammen.

Die Abmessung des Ringspalts ist jeweils umlaufend einzuhalten. Die Höchstmaße der Ringspaltabmessungen für die jeweiligen Dichtmaterialien werden in Anlehnung an die MLAR empfohlen. Bei der Leitungsführung durch feuerhemmende Module darf das maximale Ringspaltmaß 50 mm betragen. Bei Führung der Leitungen durch Module mit einer Feuerwiderstandsanforderung von bis zu 90 Minuten darf die maximale Ringspaltabmessung bei Verwendung intumeszierender Dichtmaterialien 15 mm betragen, bei der Verwendung von Mineralwolle (Schmelzpunkt ≥ 1000 °C) 50 mm. Bei der Abdichtung mit Brandschutzacryl ist in Anlehnung an die Maßgabe zu Steinwolle ebenfalls ein maximales Ringspaltmaß von 50 mm vorzusehen.

7.1 Durchführung einzelner Leitungen in Holzbauteilen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien

Tab. 7.6: Zusammenfassung der Empfehlungen hinsichtlich Ringspaltabmessungen bei den untersuchten Leitungen

Feuerwiderstandsdauer	Leitung	Mindestring-spaltabmessung in mm ¹⁾	Besonderheit	Maximale Ringspaltabmessung in mm ¹⁾
30 Minuten	Kupferrohre	≥ 10 mm		≤ 50 mm
	Einzelkabel	≥ 10 mm	≥ 5 mm bei Verwendung von Intumeszenzmaterial	≤ 50 mm
	Kabelbündel	≥ 10 mm	≥ 5 mm bei Verwendung von Intumeszenzmaterial	≤ 50 mm
	PVC $\varnothing \leq 17$ mm	kein Mindestmaß		≤ 50 mm
90 Minuten	Kupferrohre	≥ 15 mm bei Verwendung von Brandschutzacryl, ≥ 20 mm bei Verwendung von Steinwolle		≤ 50 mm
	Einzelkabel	≥ 10 mm		≤ 50 mm
	PVC $\varnothing \leq 17$ mm	kein Mindestmaß		≤ 15 mm
	PVC $\varnothing \leq 32$ mm	≥ 5 mm		≤ 15 mm

¹⁾ Umlaufend einzuhalten

7.2 Zwischenfazit

Für den Massivbau existieren Erleichterungen für die Ausführung bestimmter Leitungsdurchführungen, die darauf abzielen die brandschutztechnische Nachweisführung zu erleichtern. Soll der Holzbau weiter etabliert werden, sind solche Erleichterungen auch für diese Bauweise anzustreben. Hinsichtlich des Baustoffs Holz ist zur Formulierung von Erleichterungen dessen Brennbarkeit sowie die geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Beton oder Mörtel zu beachten.

Die durchgeführten Versuche haben ergeben, dass grundsätzlich alle untersuchten Dichtmaterialien geeignet sind, um die Brandweiterleitung an Leitungen durch Bauteile zu verhindern. Unterschiedliche Dichtmaterialien führen zu unterschiedlich starkem Einbrand in das Holz um die Durchführung, je nach Kombination mit Leitungsarten. Der Einsatz eines Dichtmaterials um die Leitung führte in allen Fällen zu einem geringeren Abbrand um die Bohrkante als die Führung der Leitung durch eine passgenaue Bohrung. Aufgrund der beobachteten Verkohlungs- und Abbranderscheinungen in den einzelnen Öffnungen wurden Empfehlungen gegeben, die Materialien für die einzelnen Leitungsarten verwendet werden sollten. Das Material Gips ist aufgrund des schlechten Verbunds zur Öffnungsleibung aus Holz und der möglichen Spaltbildung aufgrund des unterschiedlichen Schwind- und Quellverhaltens der beiden Materialien nicht zu empfehlen. Teilweise sind weitere Maßnahmen an Leitungen zu empfehlen, um starke Erhöhungen der Oberflächentemperaturen auf Leitungen auf der brandabgewandten Seite unschädlich zu machen und somit Sekundärbrände zu verhindern. Die Ergebnisse mit den Dichtmaterialien Steinwolle und Gips sind als allgemeingültig anzusehen. Bei der Verwendung von Steinwolle ist allerdings als kritisch anzusehen, dass die Stopfdichte beim Einbau nur schwer zu kontrollieren ist. Zudem ist es möglich, dass sich im Einbauzustand über Jahre hinweg die Stopfung lockert und die Wolle im Brandfall weniger dicht ist oder gar aus der Öffnung fällt. Bei Versuchsergebnissen von Versuchen bei denen spezielle Brandschutzmaterialien verwendet wurden (vgl. Abb. 7.1 bzw. Tab. 7.1), ist zu bedenken, dass sich die Materialzusammensetzung herstellerspezifisch stark unterscheiden kann. Beispielsweise unterscheiden sich intumeszierende Brandschutzfüller deutlich hinsichtlich Schaumfaktoren und des Blähdrucks, was das Ergebnis maßgeblich beeinflussen kann. Ähnliches gilt für Brandschutzfüllmassen, deren Inhaltsstoffe sich stark unterscheiden können und somit zu einem unterschiedlichen Verhalten im Brandfall führen (z. B. endotherm wirkend, carbonisierend). Die Ergebnisse sollten daher anhand weiterer Versuche mit intumeszierenden und nicht intumeszierenden Brandschutzfüllmassen anderer Hersteller bestätigt werden. Um die Empfehlungen auf weitere Leitungsarten und größere Durchmesser zu erweitern, können auf Grundlage der hier vorliegenden Ergebnisse weitere Untersuchungen angestellt werden. Die Versuche haben zudem gezeigt, dass bei der Führung von Leitungen durch Holzbauteile und der Abdichtung der Leitungen nicht nur die maximale Ringspaltabmessung relevant ist, sondern zudem die minimale Ringspaltabmessung. Der Einbrand in das Holzbauteil wird durch einen gewissen Abstand der Leitung zum Holz und die Dämmwirkung des dazwischenliegenden Materials eingeschränkt. Der notwendige Abstand ist dabei abhängig von der Leitungsart, dem Dichtmaterial, der Intensität und Dauer der Brandbeanspruchung sowie den Eigenschaften des Holzbauteils.

Die Abstände zwischen den Bohrungen haben sich als ausgesprochen relevant hinsichtlich der Abbranderscheinungen in den Bohröffnungen erwiesen. Zu kleine Abstände führen zur gegenseitigen Beeinflussung der Durchführungen und so teils zu starken Temperaturerhöhungen im Durchführungsbereich sowie Verkohlung und Abbrand. Raumabschluss und Wärmedämmung können verfrüht versagen. Da aufgrund der bisher durchgeführten Versuche nur die Aussage getroffen werden kann, dass ein Abstand von mindestens 50 mm zwischen den Bohrungen ausreichend ist, sollen die Abstände auf Grundlage weiterer Untersuchungen festgelegt werden (siehe dazu Abschnitt 7.4.2).

7.3 Versuchsreihe an metallischen Leitungen in passgenauen Bohrungen

Um die Methode Holz-in-Holz anwenden zu können, sind einzuhaltende Mindestabstände zwischen Leitungsdurchführungen in Holzmodulen festzulegen. Zur Untersuchung der Abstände zwischen allen relevanten Leitungsarten in allen relevanten Durchmessern in Verbindung mit unterschiedlichen Ringspaltabmessungen wäre eine große Anzahl an Brandversuchen notwendig. Dies stellt einen unverhältnismäßig hohen Aufwand dar. Daher sollen auf Grundlage einer Versuchsreihe konservativ die notwendigen Abstände zwischen Leitungsdurchführungen festgelegt werden. Weiterhin sollen mit Hilfe der Ergebnisse die in Abschnitt 7.1 ermittelten Moduldicken für unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern überprüft werden. Zudem soll allgemein untersucht werden, wie sich die Führung von metallischen Leitungen durch Holzbauteile auf den Abbrand des Holzes im umliegenden Bereich in Abhängigkeit von Leitungsdurchmesser und Rohrmaterial auswirkt. Der dazu verwendete Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse werden folgend zusammenfassend beschrieben. Details können [195] entnommen werden. Im daran anschließenden Kapitel werden aufbauend auf den Versuchsergebnissen weiterführende Untersuchungen anhand numerischer Simulationen durchgeführt.

7.3.1 Versuchsaufbau

Aus [144] ist bekannt, dass Versuche an Kupferrohren hinsichtlich der Wärmeübertragung als konservativ im Vergleich zu anderen Leitungsarten anzusehen sind. Dies wurde durch eigene Ergebnisse der zuvor beschriebenen Versuchsreihe (siehe Abschnitt 7.1) bestätigt. Zudem konnte in Abschnitt 7.1.3 festgestellt werden, dass die Führung von insbesondere metallischen Leitungen in passgenauen Bohröffnungen den kritischen Fall in Bezug auf die Verkohlungs- und Abbranderscheinungen im Bereich der Öffnungsleibung darstellt. Um die Abbrand- und Verkohlungserscheinungen im Bereich um Leitungsdurchführungen in Holzbauteilen beschreiben zu können, wird dies aus vorgenannten Gründen an Kupferleitungen und Stahlrohren unterschiedlicher Durchmesser in passgenauen Bohrungen untersucht. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass bei der Abdichtung von Ringspalten mit Brandschutzdichtmaterialien eine geringfügigere Schwächung des umgebenden Holzbauteils resultiert. Die zusätzlichen Untersuchungen an Stahlrohren sind notwendig, um die Abhängigkeit der Beanspruchung des Durchführungsbereichs von der Wärmeleitfähigkeit der durchgeführten Leitung beschreiben zu können. In den Brandversuchen wurden jeweils drei Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm desselben Rohrwerkstoffs horizontal in einer Reihe angeordnet durch die Module geführt. Die Bohrungen wurden für die Rohre mit den Durchmessern 12 mm und 22 mm mit einem Metallbohrer bzw. einem Flachfräsbohrer in derselben Größe hergestellt. Die Bohrung für das Rohr mit dem Durchmesser 42 mm wurde mit einem Forstnerbohrer mit einem Durchmesser von 41 mm hergestellt. Das Loch wurde teils zusätzlich ausgefeilt bzw. die Rohre wurden in die Bohrungen eingeschlagen. Das Rohr mit dem kleinsten Durchmesser wurde im Versuch jeweils auf der dem Brenner zugewandten Seite des Kleinbrandofens platziert. Auch bei passgenauen Bohrungen liegt die Rohrleitung nicht an allen Stellen an der Bohrleibung an. Dies ist mit Ungenauigkeiten beim Bohrprozess zu begründen. Aus diesem Grund wurde der (minimale (< 1 mm) Ringspalt der Rohre in den betrachteten Versuchen auf der brandabgewandten Seite oberflächlich mit Hilti CFS-ACR [178] verschlossen, um das Durchströmen heißer Gase zu verhindern. Zwei Referenzversuche wurden in Modulen aus Beton durchgeführt, um den Einfluss des umgebenden Materials auf die Temperaturdifferenzen auf den Leitungen zu untersuchen. Die Moduldicken wurden entsprechend denen aus Unterabschnitt 7.1.1 gewählt, um die Ergebnisse vergleichbar zu halten. Der Versuchsaufbau ist beispielhaft anhand eines Holzmoduls in Abb. 7.4 dargestellt. Tabelle 7.7 gibt eine Übersicht über die Konfigurationen aller durchgeführten Versuche. Die Versuchsbezeichnung ergibt sich aus dem Modulmaterial, der Moduldicke,

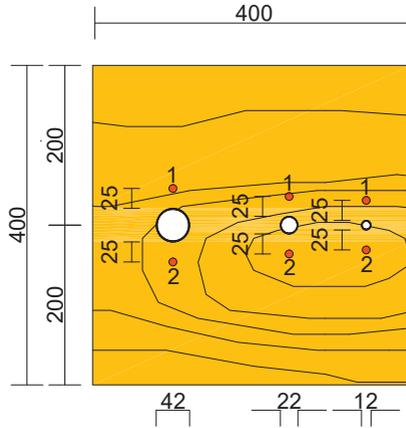


Abb. 7.4: Darstellung eines Moduls mit Temperaturmessstellen (rot).

dem Rohrmaterial sowie einem „V“ für den Ringspaltverschluss. Weitere Details können [195] entnommen werden.

Tab. 7.7: Versuchskonfigurationen

Versuchsbezeichnung	Modulmaterial	Dicke in mm	Rohrwerkstoff
H60CuV	BSH	60	Kupfer
H60StV	BSH	60	Stahl
H160CuV	BSH	160	Kupfer
H160StV	BSH	160	Stahl
B60CuV	Beton	60	Kupfer
B160CuStV	Beton	160	Kupfer und Stahl

7.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu der in Unterabschnitt 7.1.2 beschriebenen. Die Rohre wurden jeweils durch passgenaue Bohrlöcher geführt. Die Versuchsdauer betrug bei Modulen mit der Dicke 60 mm 30 Minuten und bei Modulen mit der Dicke 160 mm 90 Minuten. Der detaillierte Versuchsaufbau sowie Materialparameter können [195] entnommen werden. Abbildung 7.5 zeigt in der linken Bildseite den allgemeinen Versuchsaufbau und im rechten Bildteil die Lage der Temperaturmessstellen auf der Rohr- und Moduloberfläche.

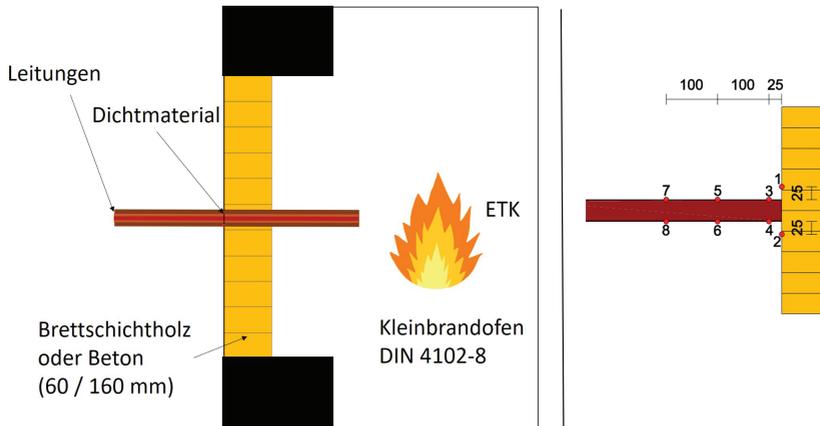


Abb. 7.5: Metallische Leitungen in passgenauen Bohrungen: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf und oberhalb der Leitungen

7.3.3 Versuchsergebnisse

Zur Auswertung der Versuche wurden im ersten Schritt die beim Brandversuch aufgezeichneten Temperaturen an den unterschiedlichen Messstellen herangezogen. Im zweiten Schritt wurde ausgewertet, wie weit sich die Bohröffnung in Folge des Einbrands um die Rohrleitung vergrößert hat. Details der Herangehensweise zur Auswertung der Versuchsergebnisse sind in [196] zu finden.

Oberflächentemperaturen

Die Ergebnisse der Messungen der Oberflächentemperaturen [195] an den in Abb. 7.5 dargestellten Messstellen, sind in Anhang D dargestellt. Bei den Ergebnissen dieser Versuchsreihe werden absolute Temperaturen anstelle von Temperaturdifferenzen dargestellt, da hauptsächlich der Abbrand des Holzes und die damit verbundene Temperatur an der Abbrandgrenze betrachtet werden soll. Die Temperaturen auf den Leitungen haben sich während der Versuche sehr stark erhöht. Ein im Vergleich dazu kleiner Unterschied in der Anfangstemperatur des jeweiligen Versuchs hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse. Die festgestellten Umgebungstemperaturen in der Prüfhalle bewegten sich zwischen 18,1 °C und 24,5 °C. Zunächst ist an den Temperaturmesswerten erwartungsgemäß zu erkennen, dass

- die Temperaturen an den entsprechenden Messstellen bei Rohren aus Kupfer höher sind als bei Rohren aus Stahl,
- die Temperaturen mit zunehmendem Rohrdurchmesser ansteigen,
- die Temperaturerhöhungen im betrachteten Versuchszeitraum auf den Rohren bei der Durchführung durch Holzmodule höher sind als bei der Durchführung durch Module aus Beton sowie
- auf der Moduloberfläche oberhalb der Leitungen höhere Temperaturen gemessen wurden als unterhalb der Leitungen und diese Temperaturen ebenfalls mit zunehmendem Rohrdurchmesser ansteigen.

Tab. 7.8: Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 25 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 3 und 4

Rohr- durch - messer	H60CuV	H60StV	H160CuV	H160StV	B60CuV	B160CuStV
12 mm	380,2	168,6	269,1	88,2	287,4	138,7
22 mm	434,2	243,5	372,2	147,4	306,2	186,1 ₁₎
42 mm	467,6	307,7	395,6	200,0	382,7	125,5 ₂₎

¹⁾ Nur Messstelle 4 (Messstelle 3 ausgefallen)

²⁾ Stahlrohr

Tab. 7.9: Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 125 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 5 und 6

Rohr- durch - messer	H60CuV	H60StV	H160CuV	H160StV	B60CuV	B160CuStV
12 mm	187,7	49,4	147,2	40,4	158,4	79,7
22 mm	223,6	94,4	198,5	68,8 ₁₎	182,3 ₁₎	107,8
42 mm	266,8	128,0	236,3	99,2	235,9	69,2 ₂₎

¹⁾ Nur Messstelle 6 (Messstelle 5 ausgefallen)

²⁾ Stahlrohr

Tab. 7.10: Temperaturen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende in °C: 225 mm entfernt von der Moduloberfläche, Mittelwerte der Messstellen 7 und 8

Rohr- durch - messer	H60CuV	H60StV	H160CuV	H160StV	B60CuV	B160CuStV
12 mm	102,3	26,8	82,3	30,2	78,7	52,9
22 mm	134,1	48,1	121,6	45,0	106,4	72,5
42 mm	175,4	65,3	161,2	59,7	152,1	46,6 ₁₎

¹⁾ Stahlrohr

7.3 Versuchsreihe an metallischen Leitungen in passgenauen Bohrungen

Die Tabellen 7.8, 7.9 und 7.10 stellen die gemessenen Temperaturen zu Versuchsende auf den Rohrleitungen in einem Abstand von 25 mm, 125 mm bzw. 225 mm zur Moduloberfläche dar. Es ist zu erkennen, dass trotz der längeren Versuchsdauer und der damit verbundenen höheren Temperaturen im Prüfofen die Messstellen auf den Leitungen in 160 mm dicken Modulen geringere Temperaturen zeigen als dieselben auf den Rohrleitungen in 60 mm dicken Modulen. Dem Modulquerschnitt, der die Entfernung der Messstelle zum Brandraum bestimmt, ist damit (bei Beanspruchung nach ETK) zu Versuchsende eine größere Bedeutung hinsichtlich der maximalen Temperaturerhöhung auf den Leitungen beizumessen als der Dauer der Temperaturbeanspruchung. Bei Beanspruchung nach ETK nimmt die Brandraumtemperatur bei fortgeschrittener Branddauer nur noch langsam zu.

Der prozentuale Unterschied (siehe Tab. 7.11) der Temperaturen auf den Stahlrohren zwischen den beiden Messstellen ist in den 60 mm dicken Modulen aus Holz stärker ausgeprägt als bei den Rohren aus Kupfer, was auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des Stahls im Vergleich zu Kupfer zurückzuführen ist. Bei den Modulen mit der Dicke 160 mm zeigen sich prozentual ähnliche Unterschiede zwischen den Messstellen bei Kupfer- und Stahlrohren. Lediglich beim Stahlrohr mit dem größten Durchmesser zeigt sich ein größerer Temperaturunterschied. Dieser Effekt wird vermutlich durch die größere Wandstärke des größten Stahlrohrs von 2 mm (Wandstärke der anderen Rohre 1 mm bzw. 1,2 mm) ausgelöst oder begünstigt. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich zu Versuchsende hinsichtlich der Temperaturen auf den Rohrleitungen bereits ein quasi-stationärer thermischer Zustand eingestellt hat. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Rohrmaterialien hat zu diesen Zeitpunkten bereits zu einer entsprechenden Wärmeverteilung entlang der Rohrleitung geführt, die sich durch den Wärmeabfluss an die Umgebung mit konstanter Temperatur nur noch wenig ändert. Der Wärmestrom durch die einzelnen Rohrleitungen wird maßgeblich durch die Kupfermenge im Rohrquerschnitt bestimmt. Bei Rohrleitungen mit größerem Durchmesser bzw. größerer Rohrwandstärke stellen sich deshalb höhere Temperaturen auf den Oberflächen ein. Der Verlauf der ETK ist zu den Zeitpunkten 30 und 90 Minuten nur noch wenig ansteigend. Der Abbrand des Holzes schreitet nur langsam voran. Die Fläche des Rohrs, auf die die Temperaturerhöhung einwirkt, ändert sich damit wenig. Insgesamt ergeben sich nur wenige Änderungen auf der Einwirkungsseite. Die weitere Temperaturerhöhung auf den Rohrleitungen wird daher durch die Querschnittsverminderung des Holzmoduls und der Temperaturerhöhung im Prüfofen getrieben. Zu Versuchsbeginn hingegen steigen die Temperaturen auf den Leitungen verschiedenen Durchmessers, mit Anstieg der Brandraumtemperatur, nahezu gleich schnell an (siehe Abb. 7.6). Der Wärmestrom, der durch die Leitungen aus dem Brandraum nach außen fließt, wird durch den Temperaturgradienten, die Wärmeleitfähigkeit des Materials und die Fläche des Leiterquerschnitts bestimmt (vgl. dazu Gleichung 7.1). Der herrschende Temperaturgradient ist für alle Leitungen annähernd derselbe, die Wärmeleitfähigkeit des Materials ebenfalls. Die Querschnittsfläche bestimmt den maximalen Wärmestrom, der bei gleichem Temperaturgradienten übertragen werden kann. Die zur anfänglichen Temperaturerhöhung der Leitungsoberfläche auf der Kaltseite benötigte Energie wird durch alle Leitungsquerschnitte gleichermaßen geleitet. Der größere Wärmestrom in den größeren Leitungsquerschnitten wird durch das Mehr an benötigter Energie zur Erwärmung der größeren Masse ausgeglichen. Der sich anschließende oben bereits beschriebene, quasi-stationäre Zustand stellt sich dann aufgrund des geringeren maximal erreichbaren Wärmestroms und der damit früher erreichten maximalen Oberflächentemperatur beim vorherrschenden Temperaturgradienten bei kleineren Leitungsdurchmessern früher ein als bei größeren. Das allgemeine Abflachen der Temperaturverläufe ist mit dem Verlauf der ETK zu begründen.

In [196] wurden die Temperaturen auf der Leitungsoberfläche zwischen Messstelle 3/4 bzw. 5/6 aus den Versuchen H160CuV und 5/6 bzw. 7/8 des Versuchs H60CuV verglichen. Diese Messstellen liegen zu Versuchsbeginn jeweils gleich weit entfernt von der beflamten Moduloberfläche. Es konnte festgestellt werden, dass die Temperaturverläufe dieser Messstellen über die Versuchsdauer von 30 Minuten kaum voneinander abweichen (vgl. Abb. 7.7). Daraus ist

Tab. 7.11: Prozentualer Anteil der jeweiligen Temperatur (zu Versuchsende) an der Messstelle 225 mm entfernt von der Moduloberfläche an der Temperatur an der Messstelle 25 mm entfernt von der Moduloberfläche, siehe Tabellen 7.10 und 7.8

Rohr- durch- messer	H60CuV	H60StV	H160CuV	H160StV	B60CuV	B160CuStV
12 mm	27	16	31	34	27	38
22 mm	31	20	33	31	35	39
42 mm	38	21	41	30	40	37 ¹⁾

¹⁾ Stahlrohr

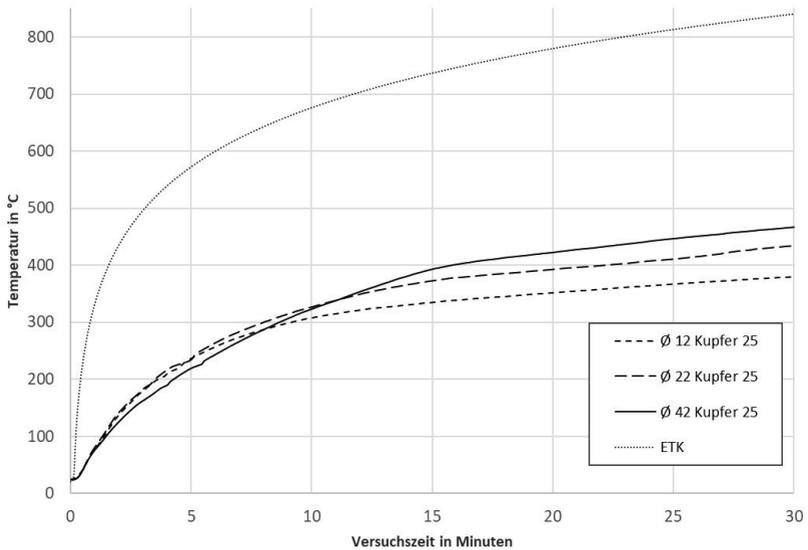


Abb. 7.6: Vergleich der Temperaturverläufe des Versuchs H60CuV an der Messstelle 25mm von der Moduloberfläche entfernt (Mittelwerte aus Messstelle 3 und 5) der Rohrleitungen Ø12, Ø22, Ø42 [196]

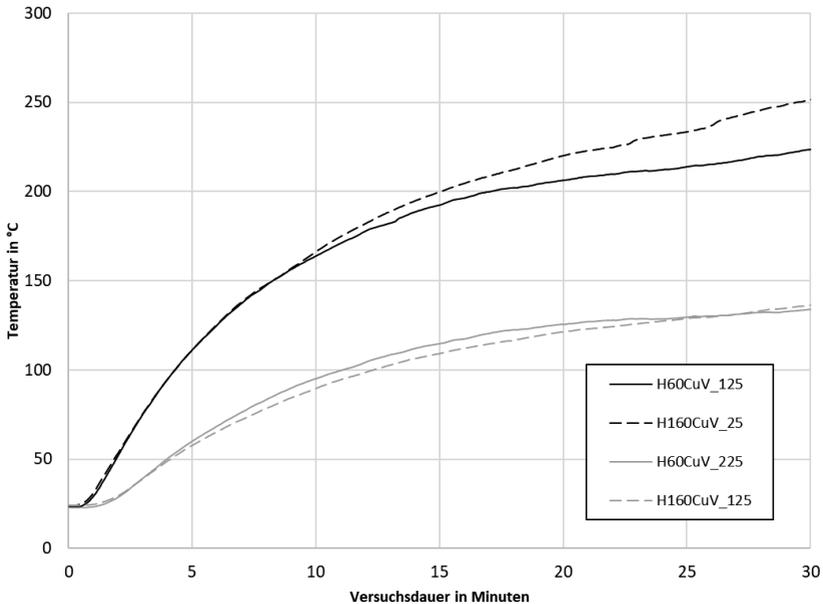


Abb. 7.7: Temperaturen auf der Rohroberfläche (Rohr $\varnothing 22$ mm) an der Messstelle 3/4 und 5/6 (25 mm und 125 mm) im Versuch H160CuV und der Messstelle 5/6 und 7/8 (125 mm und 225 mm) im Versuch H60CuV [196]

zu schließen, dass die Rohrleitungen innerhalb der Durchführung nahezu dieselbe Energiemenge an den Holzquerschnitt abgeben, wie sie auch außerhalb des Durchführungsbereichs an die Umgebungsluft abgeben. Hier ist ein Zusammenhang zu der in Abschnitt 3.2.6 beschriebenen Ähnlichkeit der Werte der Wärmekapazität des Holzes und der Luft zu vermuten.

Abbrand des Holzquerschnitts um die Leitungen

Zur Bestimmung der Abbrandtiefe um die Rohrleitungen wurde nach den Brandversuchen die Holzkohleschicht vom unverbrannten Restquerschnitt entfernt und Schnitte durch die Module hergestellt, jeweils vertikal und mittig durch die Bohrlöcher. Der Verlauf des Abbrands um die Rohrleitungen im Holzquerschnitt (Abbrandtrichter) wurde in [196] millimetergenau bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse zu den Schnitten durch alle Bohrungen sind in Anlage E dargestellt. Die Lage des Abbrandtrichters im Koordinatensystem resultiert aus einem gewählten Anfangspunkt zur koordinatenhaften Aufnahme der Messpunkte. Nach den Versuchen war die genaue ursprüngliche Position des Rohrs im Modul nicht mehr bekannt, sodass keine Rückschlüsse gezogen werden können, ob der Abbrand um die Rohrleitung ungleichmäßig erfolgt. Ungenauigkeiten können zudem durch außermittiges Sägen durch die Öffnungen sowie durch die Breite des Sägeblatts verursacht worden sein.

An den Abbrandtrichtern der verschiedenen Module ist wie erwartet zu erkennen, dass Kupferrohre zu einem höheren Abbrand um die Leitungen führen als Stahlrohre. Dies ist mit der höheren Wärmeleitfähigkeit des Kupfers zu begründen. Generell nimmt die Breite der Abbrandtrichter mit zunehmender Entfernung von der beflamten Oberfläche ab. Einfluss auf

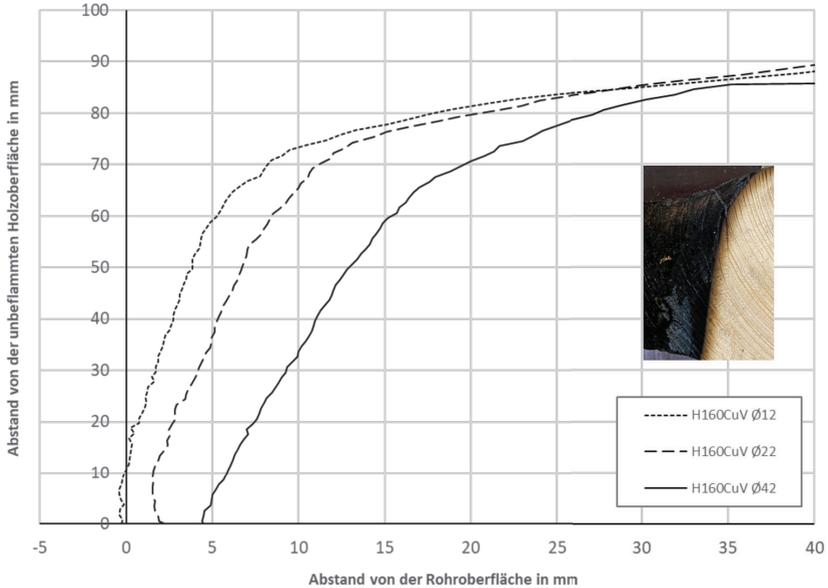


Abb. 7.8: Darstellung des Abbrands um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm im Modul mit der Dicke 160 mm nach 90 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK [196]

die Form der Abbrandtrichter hat zudem die Dauer (und Intensität) der Brandbeanspruchung sowie das Rohrmaterial. Eine längere Branddauer führt zu einem breiteren Abbrandtrichter. Ebenso verhält es sich mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials. In [196] wurde ebenfalls untersucht, wie stark der Rohrdurchmesser und die damit höhere Temperatur auf der Rohroberfläche den Abbrand um die Rohrleitung beeinflusst. Bei Betrachtung des Abbrands um die Rohre nach 90 Minuten Branddauer ist zu erkennen, dass die Stärke des Abbrands um die Leitungen proportional mit dem Durchmesser der Rohrleitung zusammenhängt (vgl. Abb. 7.8). Der zusätzliche Abbrand ist allerdings jeweils deutlich kleiner als die Zunahme des Rohrdurchmessers. Bei den schwächeren Modulen nach einer Branddauer von nur 30 Minuten ist diese Proportionalität (noch) nicht zu erkennen (vgl. Abb. 7.9). Dies kann mit der gleichartig schnellen Erwärmung der Kupferrohrleitungen in den ersten Versuchsminuten in Verbindung gebracht werden [196]. Erst im späteren Versuchsverlauf erreichen Leitungen mit größerem Durchmesser höhere Temperaturen und führen somit zu einem verstärkten Abbrand.

7.3 Versuchsreihe an metallischen Leitungen in passgenauen Bohrungen

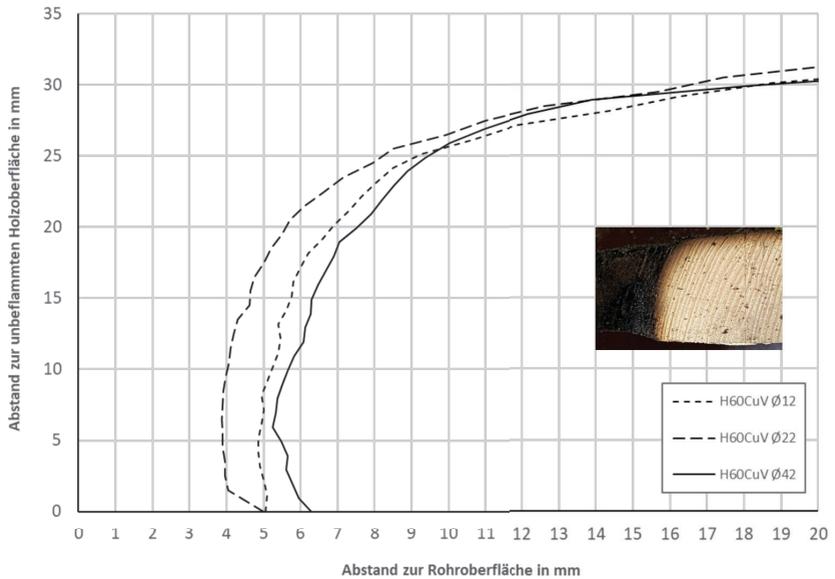


Abb. 7.9: Darstellung des Abbrands um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm im Modul mit der Dicke 60 mm nach 30 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK

7.4 FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen

Da die Durchführung von Brandversuchen zeit- und kostenintensiv ist, sollen die Versuchsaufbauten aus dem vorangegangenen Kapitel in Finite Element Simulationen nachgebildet werden. Durch Parameterstudien können anschließend die Versuchsergebnisse extrapoliert werden. Ziel ist es dabei die erforderlichen Moduldicken zu verifizieren sowie anhand des Abbrands im Holzquerschnitt um die Leitungen notwendige Abstände zwischen Leitungsdurchführungen festzulegen.

7.4.1 FE-Analyse für thermisch transiente Berechnungen

Mit Finite Element Simulationen kann auf Grundlage der thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien berechnet werden, wie sich der Wärmestrom zeitabhängig aufgrund der Wärmeleitung im Probekörper verändert. Wärmetransportvorgänge in Materialien können mit Hilfe der Fourier'schen Wärmeleitgleichung (Gleichung 7.1) beschrieben werden, worauf die Berechnung der verwendeten Software Ansys Workbench basiert. Die Gleichung stellt die Proportionalität des Wärmestroms zur Wärmeleitfähigkeit des Materials, der Größe der Berührungsfläche und zum Temperaturgradienten dar.

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\delta T}{\delta n}, \quad (7.1)$$

wobei

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{Wärmeleitzahl} \\ \dot{Q} &= \text{Wärmestrom} \\ A &= \text{Querschnittsfläche} \\ \frac{\delta T}{\delta n} &= \text{Temperaturgradient} \end{aligned}$$

Zur Berechnung wird ein Modell der zu untersuchenden Situation erstellt, das die reale Situation nach Ermessen des Anwenders ausreichend genau abbildet, um die gewünschten Ergebnisse erzielen zu können. Das Modell ist immer ungleich der Realität, da nicht alle Details im Modell dargestellt bzw. nicht alle Vorgänge von der Analyse erfasst werden. Die erstellten Volumenkörper werden, um die Berechnung zu ermöglichen, in eine bestimmte Anzahl von Elementen unterteilt. Diese Elemente können unterschiedliche Formen aufweisen. Die Elementgröße bestimmt maßgeblich die Genauigkeit des berechneten Ergebnisses. Die Elementgröße ist daher bei Berechnungen so weit zu reduzieren, dass eine weitere Elementverkleinerung das Ergebnis nicht mehr maßgeblich beeinflusst. Ein limitierender Faktor der weiteren Verkleinerung der Elemente und damit steigender Elementanzahl ist die damit ansteigende Berechnungszeit. Die Berechnung der zeitlichen Temperaturänderung an einer Stelle erfolgt grundlegend durch Erfüllung einer Gleichgewichtsbedingung für die einzelnen Elemente. Für jedes Element muss die aufgenommene Wärmeleistung gleich dem entzogenen Wärmestrom sein. Auch an dieser Stelle kann die Genauigkeit der Berechnung durch den akzeptierten Fehler der iterativen Berechnung beeinflusst werden. Erforderliche Eingabeparameter zum Lösen der Differentialgleichung sind unter anderem die thermischen Eigenschaften der Materialien (siehe dazu für Holz Abschnitt 3.2.6). Weiterhin bedarf es zur Berechnung der Definition von Randbedingungen für den jeweiligen Probekörper sowie Anfangsbedingungen für die Temperatur [197].

Anschließend können im Simulationsmodell Eingabeparameter variiert werden, um mittels Parameterstudien weiterführende Erkenntnisse über deren Einfluss auf das Verhalten des Untersu-

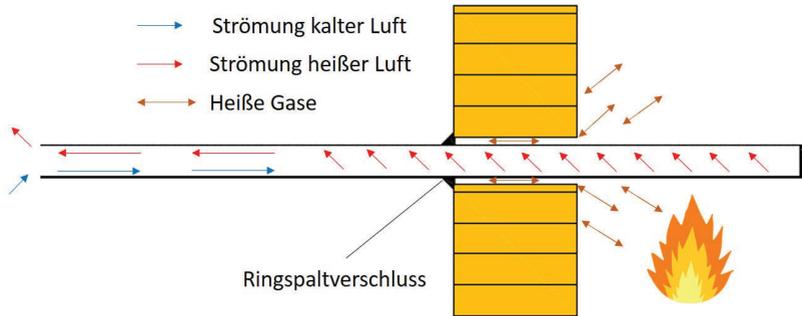


Abb. 7.10: Darstellung der angenommenen Luftströmung im Rohrquerschnitt

chungsgegenstands zu erhalten. Zur Simulation wurde die Software Ansys Workbench 2019R1 bzw. 2020R1 verwendet. Um die in Brandversuchen gewonnenen Versuchsdaten abzubilden, wurden thermische transiente Bauteilanalysen durchgeführt. Mit der transienten Analyse lassen sich, im Gegensatz zur Berechnung in einer stationären Analyse, auch Wärmeströme und Temperaturen in Bauteilen berechnen, wenn sich die Temperaturbeanspruchung zeitabhängig ändert. In einer rein thermischen Analyse werden Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten nicht explizit betrachtet. Sie können jedoch implizit durch Anpassung anderer Material- oder Versuchsparameter berücksichtigt werden. Um diese Strömungen explizit zu betrachten, wäre die Kopplung des Modells mit einem strömungsmechanischen Simulationsmodell notwendig. Der Rechenaufwand würde dadurch ansteigen. Weiterhin ist die Eingabe weiterer Parameter notwendig, die nicht ermittelt wurden. Der damit verbundene Mehraufwand ist als deutlich höher einzuschätzen als der daraus entstehende Nutzen. Für die Zukunft könnte dieser Ansatz jedoch genutzt werden, um die Genauigkeit der Berechnungen für weitere Untersuchungen zu steigern.

7.4.2 Nachsimulation und Extrapolation der Versuchsergebnisse

Herleitung und Begründung des Simulationsmodells

In den Versuchen wurden Rohrleitungen durch passende Öffnungen in Holzbauteilen geführt. Die Rohre waren innerhalb des Ofens verschlossen. Auf der brandabgewandten Seite waren die Rohre offen. Der Ringspalt um die Rohrleitungen war auf der unbeflammten Seite oberflächlich verschlossen. Durch die Erwärmung der Leitungen im Ofen erhitzt sich die darin befindliche Luft. Durch den sich ergebenden Druckunterschied getrieben, bewegt sich diese Luft in Richtung Kaltseite und verlässt dort das Rohr. Diese Strömung muss aus thermodynamischer Sicht existieren, wurde allerdings bei den Versuchen nicht gemessen. In den durchgeführten Versuchen ergeben sich daher Stoffströme innerhalb der Rohrleitungen, deren Größe und Einfluss zunächst unklar ist (siehe Abb. 7.10). Zur exakten Nachbildung der Versuche innerhalb einer Simulation wären diese Messwerte und eine darauf basierende strömungsmechanische Analyse notwendig. Aufgrund des als gering angenommenen Einflusses dieser Strömung auf die Versuchsergebnisse und den dadurch potenziell entstehenden deutlichen Mehraufwand, wurde auf diese Messungen verzichtet. Eine weitere Möglichkeit der Simulation ergibt sich durch implizite Betrachtung der Stoffströme in den Simulationsparametern.

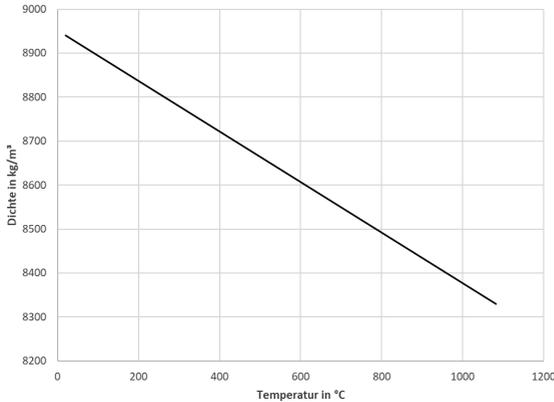


Abb. 7.11: Temperaturabhängige Rohdichte von Kupfer nach [200]

Tab. 7.12: Rohdichte von Kupfer nach [200]

Temperatur in °C	Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
20	8940
1083	8330

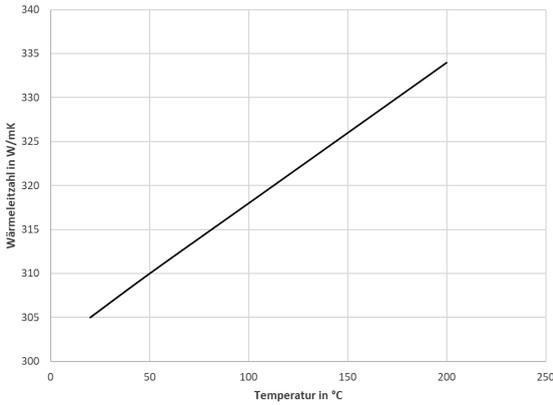
Zur Simulation sind zunächst die realistischen thermischen Eigenschaften der im Versuch verwendeten Materialien zu betrachten. In den Simulationen sollen die Versuche H60CuV sowie H160CuV aus dem vorangegangenen Abschnitt 7.3 simuliert werden, da diese, wie erwartet, zum kritischsten Einbrand um die Leitungen führten. Verwendet wurden dabei Holzmodule aus Brettschichtholz und Kupferrohre. Die thermischen Eigenschaften von Holz wurden in Abschnitt 3.2.6 ausführlich beschrieben. Zur Simulation wurden die Wertvorgaben des Eurocodes 5 verwendet. Modifiziert wurden die Eingabeparameter hinsichtlich der Holzfeuchte nach Vorgaben aus [198]. Die Holzfeuchte wurde bei der betrachteten Versuchsreihe nicht bestimmt, da sie nach [46, 198] nur einen geringen Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit und somit auf den Abbrand im Durchführungsbereich hat. Es wird eine Holzfeuchte der Probekörper von 9% angenommen, die den gemessenen Werten vorangegangener Versuchsreihen ([199],[99]) für Brettschichtholz entspricht. Die Lagerbedingungen der Probekörper entsprachen denen der zuvor verwendeten.

Stoffwerte von Kupfer zur Simulation sind in den Eurocodes nicht enthalten. Es wurden daher die Angaben zu thermischen Eigenschaften des Deutschen Kupferinstituts [200] für Cu-DHP betrachtet. Diese Kupferart wird hauptsächlich für Rohrleitungen verwendet [200]. Die Werte sind in den Abbildungen 7.11, 7.12, 7.13 dargestellt. Die angegebenen Werte umfassen nicht den notwendigen Temperaturbereich für eine Simulation des Brandfalls, stellen allerdings eine gute Ausgangsbasis dar. Für die durchgeführten Simulationen sind genaue Angaben zu den thermischen Eigenschaften von Kupfer nicht notwendig, da diese im Simulationsmodell ohnehin dahingehend angepasst werden müssen, dass sie die im Rohr vorhandene und strömende Luft implizit berücksichtigen. Daraus folgt allerdings, dass nach Anpassung der Einfluss der Luft nicht quantifiziert werden kann. Das heißt, dass die Bedingungen im Simulationsmodell von denen des Versuchs abweichend angepasst werden, sodass das Simulationsmodell ähnliche Ergebnisse wie der Versuch liefert.

Ohne Anpassung der Materialparameter (sonstige Eingaben siehe Abschnitt 7.4.2) würden sich bei den Simulationen Temperaturverläufe ergeben, die stark von den gemessenen Werten abweichen (vgl. Abbildungen 7.14 und 7.15). Die Nummerierung und die Position der Messstellen in den Simulationen entsprechen denen aus den Versuchen.

Zu Versuchsbeginn ist das Rohrmaterial nur im Brandraum bzw. in Brandnähe stark erwärmt. Die strömende Luft (vgl. Abb. 7.10) transportiert auch Wärme an bisher nur wenig erwärmte

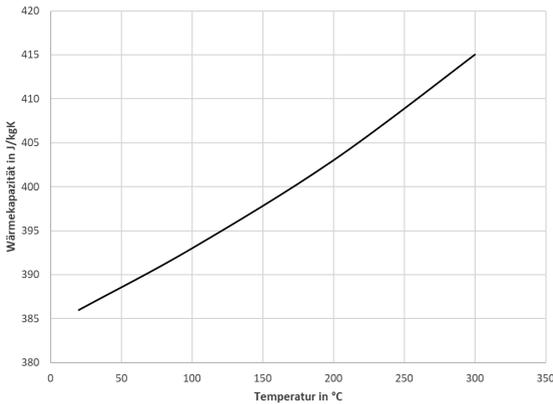
7.4 FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen



Tab. 7.13: Wärmeleitfähigkeit von Kupfer nach [200]

Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{mK}$
20	305
50	310
100	318
150	326
200	334

Abb. 7.12: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Kupfer nach [200]



Tab. 7.14: Wärmekapazität von Kupfer nach [200]

Temperatur in °C	Wärmekapazität in $\frac{J}{kgK}$
20	386
100	393
200	403
300	415

Abb. 7.13: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität von Kupfer nach [200]

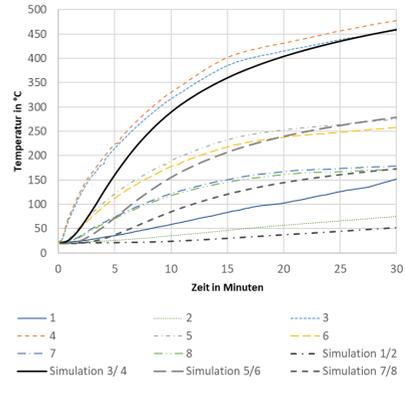
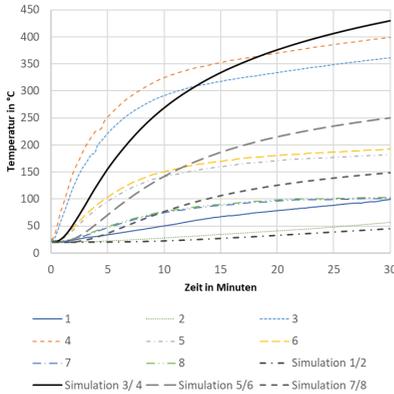


Abb. 7.14: Simulation $\varnothing 12$ H60CuV bei Eingabe einer spez. Wärmekapazität von $400 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ und einer Wärmeleitzahl von $300 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$

Abb. 7.15: Simulation von $\varnothing 42$ H60CuV bei Eingabe einer spez. Wärmekapazität von $400 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ und einer Wärmeleitzahl von $300 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$

Rohrbereiche und trägt dort zur Erwärmung des umliegenden Kupfers bei. Diese Systematik kann in der Simulation durch Verringern der spez. Wärmekapazität des Kupfers berücksichtigt werden, was dazu führt, dass sich die Temperatur des Kupfers schneller erhöht. Eine Veränderung in der spez. Wärmekapazität führt zur schnelleren oder langsameren Erwärmung des Materials. Eine Änderung wirkt sich vor allem auf den Anstieg der Temperatur in den ersten ca. 15 Minuten aus, da sich in dieser Zeitspanne die Temperatur nach ETK stark ändert. Die nicht berücksichtigte zusätzliche Energiezufuhr in das Kupfer wird also durch einen geringeren Energiebedarf des Materials zur Erwärmung ausgeglichen.

Im späteren Versuchsverlauf ist das Rohrmaterial bereits über die gesamte mit Messstellen versehene Länge stark erwärmt. Der Einfluss der Luft kommt somit nicht mehr zum Tragen, da sie weiter vom Brandraum entfernte Rohrbereiche nicht mehr maßgeblich zusätzlich erwärmt. Ebendies stellt sich über die verringerte spez. Wärmekapazität dar. Bei einer höheren Oberflächentemperatur der Leitung wird die weitere Erwärmung durch den starken Wärmeverlust durch Strahlung gedämpft, der mit steigendem Temperaturgradienten gegenüber der Umgebungstemperatur stark zunimmt.

Der für die Simulation zutreffende Wert der spez. Wärmekapazität wurde iterativ durch Verringerung eines Ausgangswertes der spez. Wärmekapazität von $400 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ ermittelt. Bei Eingabe des Wertes $400 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ ergab sich ein zu schwacher Temperaturanstieg in den Simulationen zu Versuchsbeginn auf der Leitungsoberfläche (siehe Abb. 7.14 und Abb. 7.15). Der richtige Wert ist gefunden, wenn die Änderungen des Temperaturanstiegs in den ersten Versuchsminuten der simulierten Werte der Änderung des Temperaturanstiegs der Versuchsdaten ausreichend genau entsprechen. Ausreichend genau meint in diesem Fall, wenn die Temperaturverläufe bei Darstellung in einem Diagramm augenscheinlich nahezu gleich verlaufen. Ein objektiver Vergleich der Verläufe ist an dieser Stelle nur schwer möglich, da sich die Zeitschritte in der Simulation und im Versuch unterscheiden. Auch ist eine genauere Beurteilung aufgrund der vielen unbekanntem Materialparametern sowie der hohen Varianz von Brandversuchen nicht zielführend.

Die Messwerte der Rohrleitung $\varnothing 12$ mm wurden zur Validierung des Modells zunächst aus folgendem Grund nicht beachtet: Die Regelung der Temperatur des Brandofens erfolgt anhand des Mittelwerts zweier Temperaturmessstellen. Diese Messstellen waren in den Versuchen

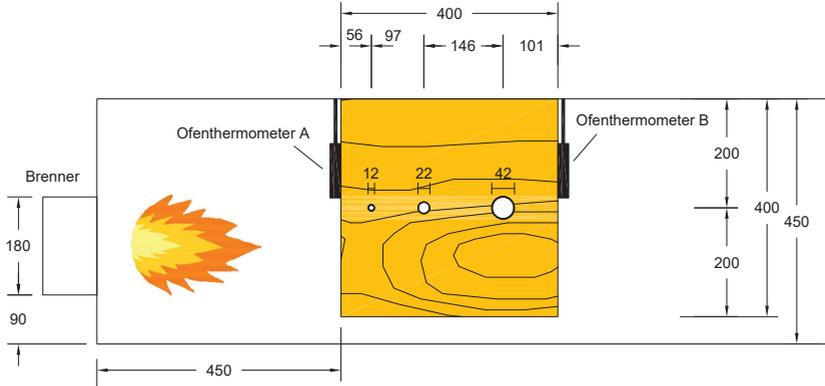


Abb. 7.16: Ansicht des Kleinbrandofens mit Positionen von Brenner, Temperaturmessstellen und Probenkörper, Maße in Millimeter

jeweils kurz vor bzw. hinter den Modulen angeordnet (vgl. Abb. 7.16). Der Zielwert der Temperatur (ETK) wird daher im Bereich zwischen den beiden Ofenthermometern erreicht. Der Mittelpunkt zwischen den Messstellen befindet sich zwischen den Rohren $\varnothing 22$ mm und $\varnothing 42$ mm. Der genaue Verlauf des Temperaturgradienten zwischen den beiden Ofenthermometern ist unbekannt, sodass nicht abschließend geklärt werden kann, welches der Rohre am ehesten mit Temperaturen nach ETK beansprucht wird. An der Rohrleitung mit dem Durchmesser 12 mm werden aufgrund der Nähe zum Brenner und des Ofenthermometers A höhere Temperaturen als die ETK vorgibt angenommen. Dieses befindet sich hinsichtlich der Entfernung zum Brenner etwa auf gleicher Position wie das Ofenthermometer A.

Zur Anpassung der Wärmekapazität wurden daher zunächst alle gemessenen Temperaturverläufe der Messstellen auf den Rohren mit dem Durchmesser 22 mm und 42 mm herangezogen. Besonders betrachtet wurden dabei die Messstellen auf den Rohrleitungen in 125 mm und 225 mm Abstand zur Moduloberfläche der 160 mm dicken Module. Bei diesen Messstellen ist aufgrund der größten Entfernung vom Brandraum bzw. der Moduloberfläche von den geringsten Abweichungen durch ungewollte Einflüsse (z. B. Beflammungssituation, heiße Gase aus Ringspalt, Messfehler durch geringfügig falsche Position der Messstelle) auszugehen. Der ermittelte Wert für die spez. Wärmekapazität liegt für die vorhandenen Versuchsergebnisse aus Abschnitt 7.3 H60CuV und H160CuV bei $90 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C und bei $100 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ im Bereich von 100°C bis 1200°C .

Die Wärmeleitfähigkeit des Materials bestimmt wie viel Wärmeenergie in Abhängigkeit des vorherrschenden Temperaturgradienten durch das Rohrmaterial geleitet wird. In Kombination mit der notwendigen Energie zum Erwärmen des Materials und dem Wärmeverlust an die Umgebung, bestimmt der Zufluss an Wärmeenergie die Temperatur des Materials. Die notwendige Energie zum Erwärmen des Materials wird dabei durch die spez. Wärmekapazität definiert. Der Zufluss an Wärmeenergie wird durch die Wärmeleitfähigkeit des Materials und die Querschnittsfläche vorgegeben. Im Modell muss durch den Materialparameter sowohl die übertragene Wärmeenergie durch die Rohrwand als auch die transportierte Energie im Luftquerschnitt berücksichtigt werden, da die Luft im Modell nicht explizit dargestellt wird. Der Wärmeabfluss auf der Kaltseite wird im Modell, wie im Eurocode 1 - 1-2 [201] vorgegeben, mit $9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{K}}$ angesetzt.

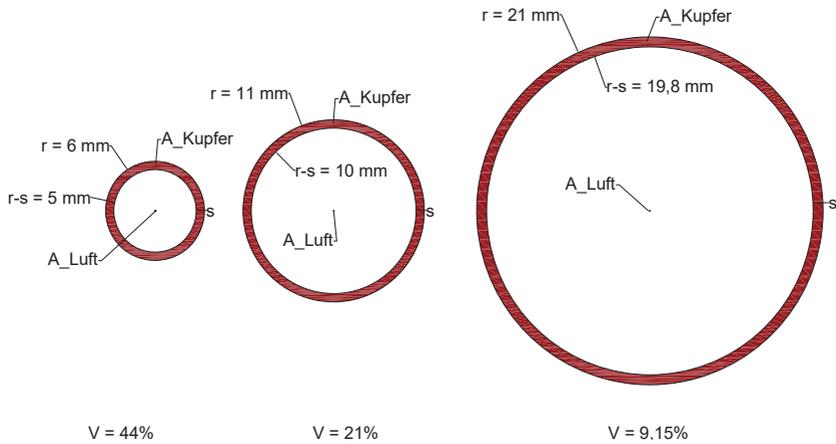


Abb. 7.17: Darstellung der geometrischen Eigenschaften der verwendeten Kupferrohrleitungen

Als Fläche für den Wärmeabfluss des Rohrs wird lediglich die Mantelfläche des Rohrs gewählt. Auch möglich wäre zusätzlich die Annahme eines Wärmeabflusses von der Innenfläche des Rohrs. Die Luft im Inneren des Rohrs wird im Simulationsmodell nicht dargestellt. Die Temperatur dieser Luft ist daher in der Simulation nicht bekannt. Die zeitabhängige Umgebungstemperatur im Inneren des Rohrs ist somit ebenfalls nicht bekannt. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz nicht gewählt. Zudem wirkt dem Wärmeverlust vor allem bei höheren Temperaturen ein Strahlungsaustausch der Rohrinnenflächen entgegen und schwächt diesen Effekt ab. Aus dieser Annahme resultiert insgesamt die Eingabe einer geringeren Wärmeleitfähigkeit für das Rohrmaterial in den Simulationen. Mit sich änderndem Rohrdurchmesser und unterschiedlicher Rohrwandstärke ändert sich auch der Flächenanteil von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt bzw. die Größe der Kontaktfläche, an der Wärmeenergie zwischen Luft und Kupfer übertragen werden kann. Im Modell stellt die Wärmeleitfähigkeit des Materials die jeweilige Kombination aus Kupfer und Luft dar. Das Material soll sich bei unterschiedlichen Geometrien gleich verhalten. Aus diesem Grund ist die Wärmeleitfähigkeit des Materials in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt anzupassen.¹ Bei kleinen Rohrdurchmessern ist im Vergleich zu größeren ein deutlich höherer Anteil an Kupfer im Rohrquerschnitt vorhanden. Abbildung 7.17 stellt die Verhältnisse für die verwendeten Rohrleitungen dar. Mit größer werdendem Rohrdurchmesser nimmt dieser Anteil rasch ab. Bei einer Verdopplung des Rohrradius verringert sich bei gleichbleibender Rohrwandstärke der Anteil von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt um ca. die Hälfte.

¹ Auch möglich wäre an dieser Stelle die Simulation eines Vollquerschnitts gewesen, der die Materialmischung besser verdeutlicht hätte. Dies hätte kleinere Werte für die Wärmeleitfähigkeit ergeben. Da Kupfer aufgrund der deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit allerdings maßgebend für die Wärmeleitung entlang der Rohrleitung ist und die Geometrie möglichst realitätsnah dargestellt werden sollte, wurde der oben beschriebene Ansatz gewählt.

7.4 FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen

Das Verhältnis V , das den prozentualen Anteil von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt beschreibt, kann wie folgt berechnet werden:

$$V = \frac{A_{Cu}}{A_{Luft}} \quad (7.2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot r^2 - \pi \cdot (r - s)^2}{\pi \cdot (r - s)^2} \cdot 100\% \quad (7.3)$$

, wobei

V = Verhältnis von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt in Prozent

A_{Cu} = Kupferfläche im Rohrquerschnitt

A_{Luft} = Luftfläche im Rohrquerschnitt

r = Rohrradius (außen)

s = Rohrwandstärke

Der Verhältniswert V stellt einen Parameter dar, um die Wärmeleitfähigkeit des Materials zu ermitteln. Die Wärmeleitfähigkeit hängt von den Eigenschaften und dem Mischungsverhältnis der Materialien Kupfer und Luft im Rohrquerschnitt ab. Sie ändert sich daher in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und der Rohrwandstärke. Abbildung 7.18 stellt den Zusammenhang zwischen Rohrradius und dem Flächenverhältniswert von Kupferanteil zu Luftanteil im Rohrquerschnitt für eine Rohrwandstärke von 1 mm dar. Um die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten für das

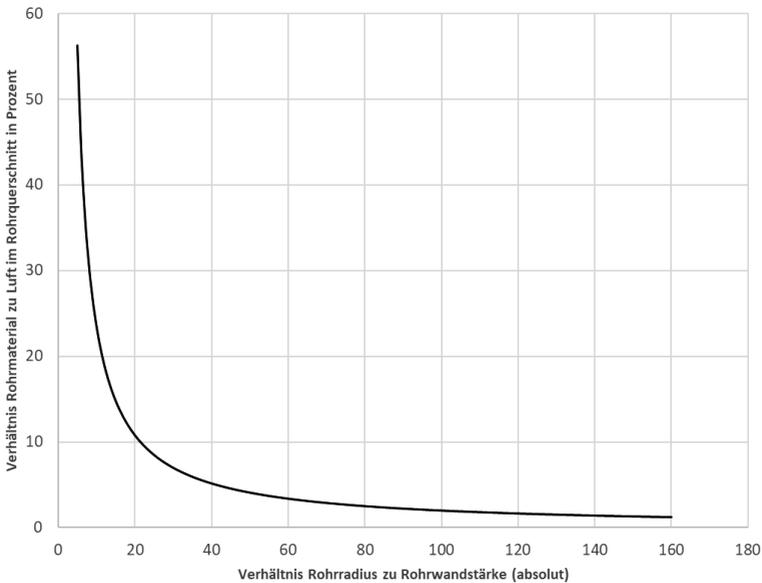


Abb. 7.18: Verhältnis des Anteils der Querschnittsfläche des Rohrwerkstoffs zum luftgefüllten Querschnitt in Abhängigkeit des Rohrradius, bei gleichbleibender Rohrwandstärke

7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile

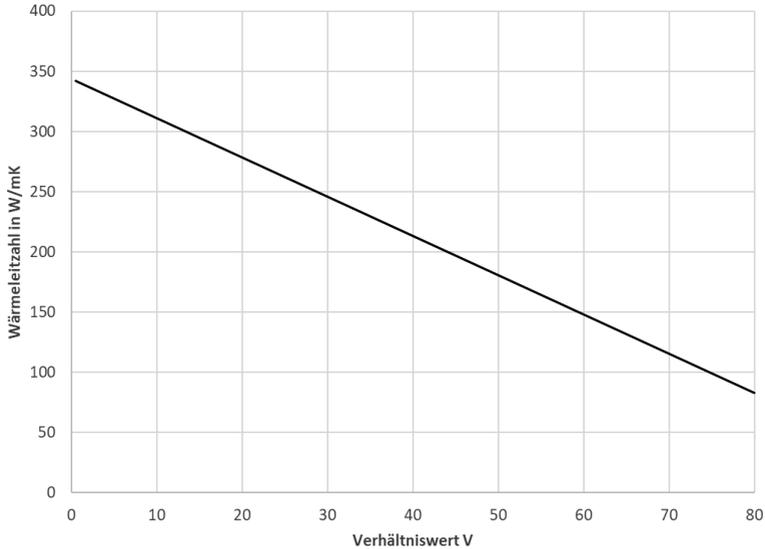


Abb. 7.19: Wärmeleitfähigkeit zur Simulation in Abhängigkeit des Verhältniswertes V

Modell zu bestimmen, wurden für zwei unterschiedliche Rohrdurchmesser iterativ die passenden Werte für die Wärmeleitfähigkeit im Simulationsmodell bestimmt. Für den Rohrradius 6 mm und dem zugehörigen Verhältniswert $V = 44\%$ wurde die Wärmeleitfähigkeit $200 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ bestimmt, für den Radius 11 mm und den zugehörigen Verhältniswert $V = 21\%$ die Wärmeleitfähigkeit $275 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Der fehlende Wert für den Rohrradius 21 mm konnte mithilfe einer linearen Funktion der Wärmeleitfähigkeit abhängig vom Verhältnis des Kupferanteils zum Luftanteil des Rohrquerschnitts ermittelt und anhand der Eingabe in die Simulation verifiziert werden (Gleichung 7.4). Der Wert beträgt $303 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$.

$$W(V) = 343,46 - 3,26 \cdot V, \quad (7.4)$$

wobei

V = Verhältnis von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt in Prozent aus Gleichung 7.2

$W(V)$ = Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$ zur Simulation des Rohrradius

Mit dieser Funktion (siehe Abb. 7.19) lassen sich folglich auch für weitere Rohrdurchmesser (mit unterschiedlichem V) die entsprechenden Werte für die Wärmeleitfähigkeit ermitteln. Für große Rohrdurchmesser nähert sich die Funktion dem Grenzwert von $343,46 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ an, der jedoch nie erreicht wird, da das Verhältnis von Kupfer zu Luft nie den Wert 0 annimmt. Die Annäherung an einen Grenzwert ist als realistisch zu betrachten, da sich der Anteil von Kupfer im Rohrquerschnitt bei zunehmendem Rohrquerschnitt absolut gesehen kaum noch ändert. Für Rohrdurchmesser < 12 mm sollte die Gleichung ohne zusätzliche Validierung nicht angewendet werden, da unklar ist, bis zu welchem Rohrinne Durchmesser sich die Leitung entsprechend

7.4 FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen

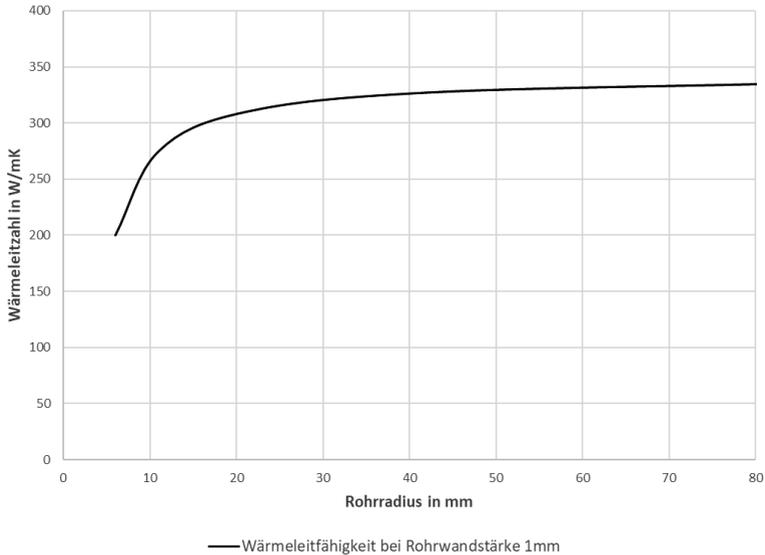


Abb. 7.20: Wärmeleitfähigkeit zur Simulation in Abhängigkeit vom Rohrradius bei gleichbleibender Rohrwandstärke

verhält bzw. ab wann es zu einem anderen Verhalten der Strömungen im Rohr kommt. Abbildung 7.20 stellt die mit derselben Gleichung ermittelte Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser ebenfalls für eine Wandstärke von 1 mm dar. Hieran ist zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit für kleiner werdende Rohrradien stärker abzunehmen ist als bei großen Rohrradien. Zu bedenken ist an dieser Stelle, dass durch die Anpassung der Wärmeleitfähigkeit für die unterschiedlichen Rohrdurchmesser versuchsbedingt nicht allein der Einfluss des Verhältnisses von Kupfer zu Luft im Rohrquerschnitt berücksichtigt wird. Durch die Anordnung der Rohre - mit aufsteigendem Durchmesser weiter vom Brenner entfernt - wird der zu kompensierende Effekt verstärkt, da die Ofentemperatur an den jeweiligen Rohren mit ansteigender Rohrgröße abnimmt.

Am Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen (dargestellt in Anhang F) ist zu erkennen, dass das Simulationsmodell die Temperaturen an den Messstellen 3 bzw. 4 im Versuch H60CuV auf der Rohrleitung mit dem Durchmesser 12 mm für die ersten 15 Minuten des Versuchs unterschätzt. In schwächerer Ausprägung ist dies auch beim Rohr mit dem Durchmesser 22 mm festzustellen. Zu begründen ist dies mit der bereits erwähnten Anordnung der Rohre im Ofen, die dafür sorgt, dass die Rohrleitung mit dem Durchmesser 12 mm höheren Temperaturen ausgesetzt ist als die ETK vorgibt. Gezeigt werden kann dies anhand der aufgezeichneten Temperaturverläufe der Ofenthermometer A und B während des Versuchs (siehe dazu Abb. 7.21). Es ist zu erkennen, dass sich die Temperaturen der Messstellen A und B im Ofenraum erst nach 15 bis 20 Minuten Versuchsdauer gleichen. Bis zu diesem Zeitpunkt herrscht an Messstelle A eine höhere Temperatur als an Messstelle B. Die Abweichung der Messergebnisse von den Simulationen sind daher eindeutig den unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen zuzuschreiben. Abbildung 7.22 stellt die Temperaturverläufe einer Simulation mit den genannten Eingangsparametern dar. Verändert wurde lediglich die Temperaturbean-

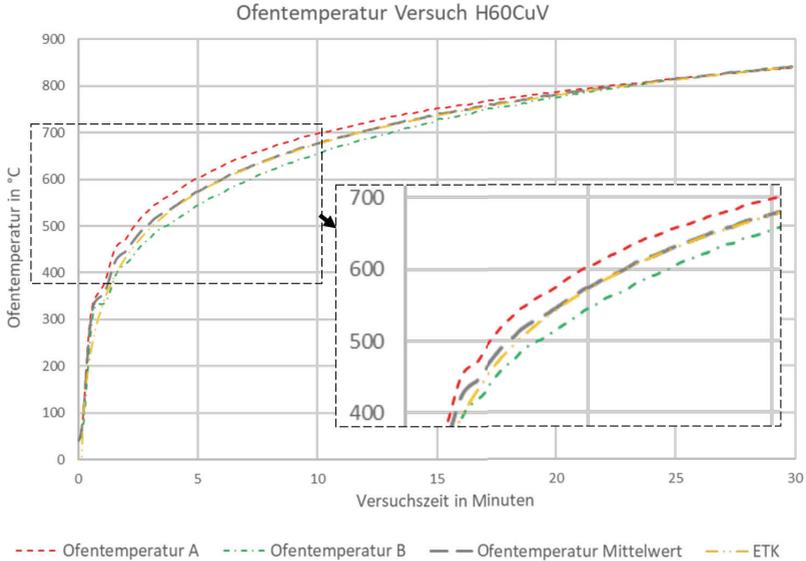


Abb. 7.21: Ofentemperatur an den Ofenthermometern A und B sowie deren Mittelwert über den Versuchsverlauf

sprechung dahingehend, dass diese dem Messwert des Ofenthermometers A entspricht, welches sich in der Nähe des Rohrs mit dem Durchmesser 12 mm befindet. Es ist zu erkennen, dass sich die Abweichungen durch diese Anpassung minimieren lassen (vgl. Anhang F). Die Simulation liefert für den kleinsten Rohrradius an der Messstelle auf der Rohrleitung im Abstand von 25 mm von der Moduloberfläche allerdings weiterhin zu niedrige Werte. Dies ist abermals mit der sehr direkten Beflammung der Rohrleitung im Ofeninnenraum zu begründen. Die Temperatur im Ofen an der Rohrleitung ist als noch höher als am Ofenthermometer A anzunehmen. Die Abweichung der simulierten Werte von den gemessenen Werten an den Messstellen 3 und 4 des Rohrs mit dem Durchmesser 22 mm im Versuch H160CuV sind vermutlich mit einer leicht abweichenden Positionierung der Messstelle auf der Rohrleitung zu begründen. Die Temperaturen auf der Holzoberfläche ergeben sich in den Simulationen rein durch den Wärmedurchgang durch das Holz vom Brandraum bzw. von der Rohrleitung. In den Versuchen können die Messstellen, die sich auf der Holzoberfläche 25 mm oberhalb der Rohrleitung befinden (Messstellen 1 und 2) jedoch zusätzlich durch Wärmestrahlung und Konvektion (vor allem bei der oberhalb des Rohrs liegenden Messstelle) von den Rohrleitungen erwärmt werden. Zum Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchswerten ist daher die Messstelle unterhalb der Rohrleitung die maßgebende. Aufgrund der beschriebenen zusätzlichen Wärmeübertragungsprozesse an die Messstelle sind die Messwerte leicht höher als die simulierten Werte. Die Temperaturunterschiede fallen beim Versuch H60CuV höher aus, da dort insgesamt ein höheres Temperaturniveau vorherrscht und somit mehr Wärmeenergie über Strahlung transportiert wird (vgl. Stefan-Boltzmann Gesetz²).

² $P = \sigma \cdot A \cdot T^4$ mit P = Strahlungsleistung, A = Fläche, σ = Stefan-Boltzmann Konstante und T =

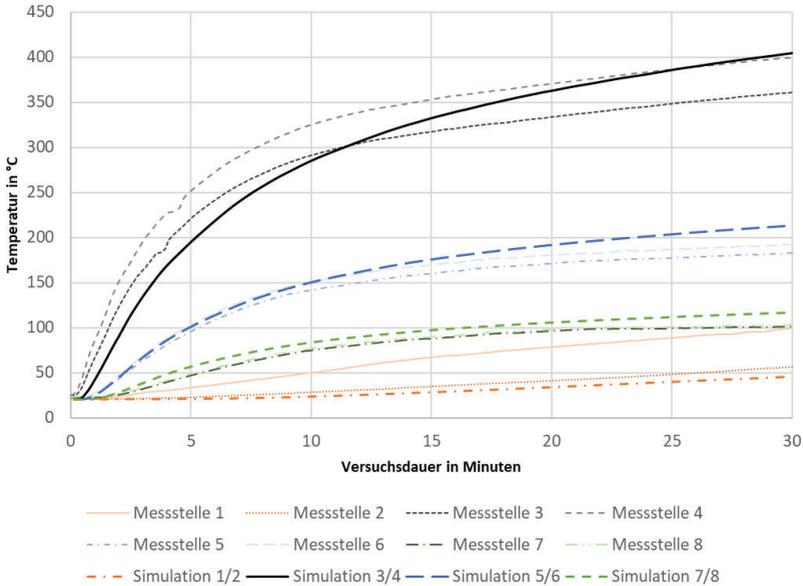


Abb. 7.22: Simulation des Rohrs mit dem $\varnothing 12$ des Versuchs H60CuV unter Temperaturbeanspruchung entsprechend des Messwerts des Ofenthermometers A

In den Versuchen H60CuV und H160CuV sowie im Simulationsmodell wurden die Dicke des Holzbauteils, die Versuchsdauer sowie die Rohrgeometrie variiert. Mit dem erstellten Modell und auf Basis der veränderten Parameter können die Versuchsergebnisse anhand der Simulationen abhängig von denselben Parametern extrapoliert werden. Die Ergebnisse der in den Simulationen errechneten Temperaturen im Vergleich zu den in den Versuchen gemessenen sind in Anhang F dargestellt. Insgesamt bilden die simulierten Werte die gemessenen Werte gut ab. Abweichungen wurden beschrieben und erläutert.

Eingabeparameter der durchgeführten Simulationen

Zur Simulation wurden die Geometrien entsprechend der Versuche in einem dreidimensionalen Modell dargestellt. Das Luftvolumen innerhalb der Rohrleitungen wurde nicht berücksichtigt. Die Simulationen selbst wurden unter Ausnutzung von Symmetrien mit einem Viertel der jeweiligen Modelle durchgeführt, um die Anzahl der Elemente zu verringern. Durch die Festlegung entsprechender Symmetriedefinitionen ergeben sich dieselben Simulationsergebnisse, wie bei der Simulation der ganzen Geometrie. Die Eingabeparameter zur Brandbeanspruchung (Strahlung und Konvektion) wurden entsprechend den Vorgaben des Eurocode 1-1-2 [201] bzw. Eurocode 5-1-2 und 3-1-2 [39, 202] verwendet, wobei für die Emissivität des Kupferrohrs in Anlehnung an diejenige von Baustahl der Wert 0,7 verwendet wurde. Für den Wärmeabfluss auf der unbefamten Seite wurde für das Holzmodul und die Rohroberfläche der Konvektionswert $9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{K}}$ nach Eurocode 1-1-2 verwendet, wobei der Wärmeverlust durch Strahlung mit

Temperatur in Kelvin

abgedeckt wurde. Im Brandraum wurden die Brandeinwirkungen in Form von Strahlung und Konvektion nach Vorgaben des Eurocodes 1-1-2 auf die Moduloberfläche sowie auf die Mantelfläche des Rohrs aufgebracht. Zur Netzbildung wurden für die Holzmodule Tetraeder mit der Größe 3 mm verwendet, welche nach [46] für Holzbauteile ausreichend ist. Für das Rohr wurden quaderförmige Elemente ebenfalls in der Größe 3 mm, verwendet. Eine weitere Verkleinerung der Elementgröße beeinflusste die Ergebnisse nicht. Im Anschlussbereich zwischen Holz und Kupfer wurde das Netz verfeinert (Verfeinerungsgrad 1), um die Holzkohlebildung und die damit verbundenen Änderungen der Holzeigenschaften detaillierter zu erfassen. Die Anfangs- sowie die Umgebungstemperatur wurden mit 20 °C angenommen. Die Eingaben für die Materialparameter Wärmeleitzahl und spezifische Wärmekapazität wurden in Abschnitt 7.4.2 bereits beschrieben. Für die Dichte wurden die in Abb. 7.11 angegebenen Werte verwendet.

Simulationsergebnisse hinsichtlich des Abbrands um die Rohrleitungen

Mit den Ergebnissen der Simulationen und der daraus resultierenden Temperaturen im Bauteilquerschnitt wurde ermittelt, in welchem Maß das Holz um die Rohrleitungen abgebrannt ist. Als Grenztemperatur für den Abbrand des Holzes wurde entsprechend den Vorgaben des Eurocodes 5 [39] 300 °C angenommen. In der Literatur (siehe dazu Unterabschnitt 3.2.5) werden teils abweichende Werte angegeben. Eine geringfügig andere Annahme würde beim Verlauf, der sich ergebenden Kurve des Abbrandtrichters aufgrund des dort vorliegenden steilen Temperaturgradienten, keine schwerwiegenden Änderungen hervorrufen.

Zum Vergleich der simulierten Werte mit den Messwerten aus den Versuchen wurden die Messwerte aus [196] jeweils der Unterseite der Bohrungen herangezogen. Es wurde die Unterseite gewählt, da dort weniger mit dem Auftreten von verstärkten Abbranderscheinungen aufgrund von durchziehenden heißen Gasen zu rechnen ist [196]. Diese beeinflussen den Abbrand vor allem an der Austrittsstelle des Rohrs auf der Kaltseite. Dort strömen heiße Gase nach oben, die im Spalt zwischen Rohrleitung und Holz aus dem Ofen nach außen dringen. Diese Beeinflussung ist in Abb. 7.23 zu sehen. Ebenso zeigt diese Abbildung ein Bild des Abbrandes um eine Rohrleitung sowie die daraus ermittelten Messwerte. Obwohl der Abbrand an der Lochobersei-

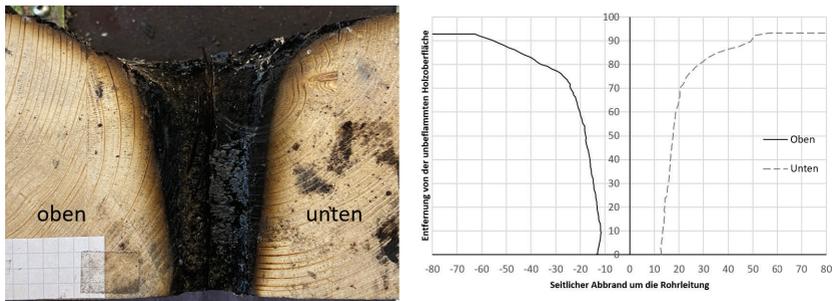


Abb. 7.23: Fotografische Darstellung des Abbrandes um ein Kupferrohr mit dem Durchmesser 22 mm sowie daraus ermittelte Messwerte des Abbrandes um die Leitung

te daher als kritischer anzusehen ist, wird zum Vergleich die Unterseite herangezogen, da die beschriebenen Effekte (ausströmende Heißgase) in den Simulationen nicht dargestellt werden. Aufgrund der Art der Auswertung hat jedoch die Wahl der Unterseite lediglich Auswirkungen auf die Form des Abbrands und nicht auf dessen Größe. Nach dem Versuch bzw. dem Schneiden durch die Module war die Position der Leitung im verbrannten Querschnitt nicht bekannt. Daher wurde als Anfangswert der Verkohlung auf der Kaltseite der gemittelte Wert der Dif-

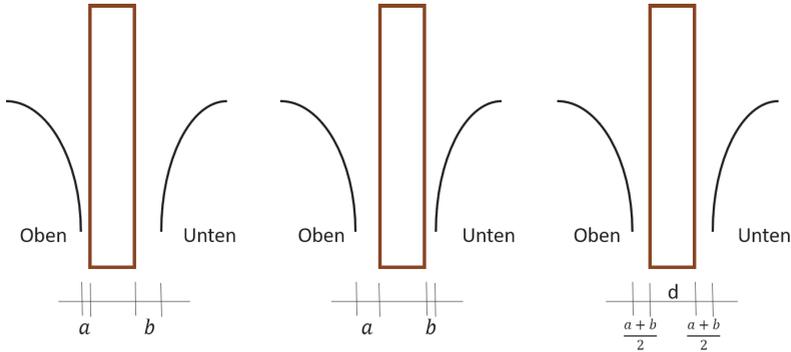


Abb. 7.24: Mittelung des oberseitigen und unterseitigen Abbrandes an Probekörperschnitten

ferenz aus dem Durchmesser des verkohlten Lochs und dem Rohrdurchmesser gewählt (siehe Abb. 7.24). Somit wird die Stärke des Abbrands um die Leitung von Lochober- und unterseite gemittelt. Die vergleichenden Darstellungen sind in Anhang H zu finden. Die Auswertung der Simulationsergebnisse an der Abbrandgrenze erfolgte auf einen Millimeter genau. Für Zwischenwerte wurden teils größere Schrittweiten verwendet, meist zwei Millimeter. Zudem ist in den Diagrammen eine Abbrandgrenze dargestellt, die sich bei einem entsprechenden Holzprobekörper ohne Rohrleitungen einstellt. Der Referenzwert dazu wurde für die Module mit der Dicke 60 mm in [190] ermittelt. Für die Module mit der Dicke 160 mm wurde die Abbrandgrenze rechnerisch mit einer angenommenen Abbrandgeschwindigkeit von $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ermittelt. Hierzu zeigten die Versuche in [190] dass sich die Abbrandrate bei längeren Branddauern verringert und sich bei einer Branddauer von 60 Minuten bereits dem Wert $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ annähert. Siehe hierzu auch Unterabschnitt 3.2.4 und vgl. Abschnitt 6.1.

In den Versuchen wurde um die Leitungen ein stärkerer Abbrand festgestellt, als rechnerisch bzw. nach Referenzwerten und vor allem nach der Simulation zu erwarten wäre. Dies ist zum einen mit dem betrachteten Bildausschnitt zur Bewertung des Abbrands zu begründen. Dieser reichte nicht in allen Fällen soweit, dass am Bildrand der Bilder die zur Auswertung des Abbrands verwendet wurden, kein zusätzlicher Abbrand mehr zu erkennen war. Zum anderen wurden die Abstände der Leitungen in den Versuchen zwar möglichst groß gewählt, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Abbranderscheinungen um die Rohre im Außenbereich geringfügig gegenseitig beeinflussen haben, was zu einem generell leicht höheren Abbrand zwischen den Leitungen geführt haben kann. Zur Verifizierung wären Versuche mit jeweils einer Leitung in einem Modul notwendig. Auch können im Brandversuch Brandgase in den minimalen Spalt um die Rohrleitungen vordringen und damit in Brandraumnähe das Holz um die Leitung in einem größeren Radius und mehrdimensional beanspruchen (vgl. Abschnitt 3.1.5 eindimensionale und mehrdimensionale Abbrandrate). In der Simulation befindet sich das Rohr idealisiert in einer passgenauen Öffnung und es wird lediglich die Holzoberfläche und die freie Rohroberfläche beansprucht. Weiterhin kann die sehr direkte Beanspruchung im Kleinbrandofen den Abtrag der Kohleschicht begünstigen. Wird die Kohleschicht um die Leitungen abgetragen, kann das Holz um die Leitungen stärker vom Brand beeinflusst werden. Da sich auch in diesem Fall in der Simulation die beflamte Fläche örtlich nicht ändert, kann dieses Phänomen nicht dargestellt werden. Es ist zu erkennen, dass die Differenz der Abbrandgrenze von den Messwerten zur Simulation nicht mit steigendem Rohrdurchmesser zunimmt, sondern vielmehr mit zunehmender Nähe zum Brenner des Prüfofens. Die Differenz ist in der

Größenordnung begrenzt auf einen Maximalwert von 10 mm beim Versuch H60CuV und auf einen Maximalwert von 15 mm beim Versuch H160CuV. Die Tiefe des Abbrands kann somit anhand der Simulation bestimmt werden, indem der berechnete Verlauf des Abbrands um den entsprechenden Wert in Richtung unbeflammter Seite verschoben wird bzw. in dem nach der Auswertung ein Sicherheitsbeiwert von 10 mm bzw. 15 mm abgezogen wird (vgl. Abb. 7.25).

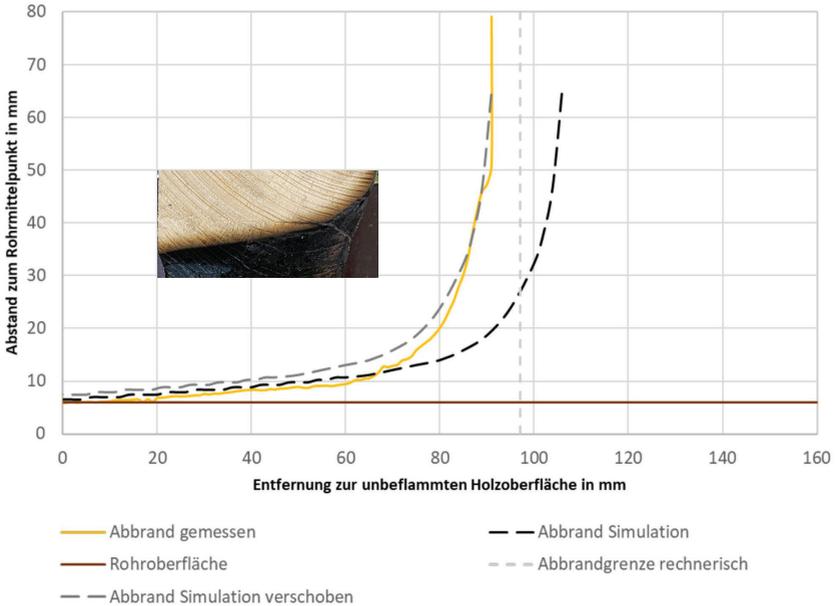


Abb. 7.25: Beispielhafte Darstellung der Verschiebung des simulierten Abbrands um das Rohr $\varnothing 12$ mm im 160 mm dicken Modul um 15 mm in Richtung unbeflammter Seite, um konservative Ergebnisse hinsichtlich der Abbrandtiefe zu erhalten

Hinsichtlich der Breite des Abbrandtrichters stimmen die Ergebnisse der Simulationen sehr gut mit den Messwerten überein bzw. stellen ein konservatives Ergebnis dar. Betrachtet man den Ordinatenwert des letzten simulierten Werts auf der Abszisse, so ist zu erkennen, dass dieser einem Abstand vom jeweiligen Rohrmittelpunkt angibt, bei welchen bei der Messung bereits kein erhöhter Abbrand mehr festgestellt wurde (senkrechter Verlauf). Die Simulationsergebnisse können daher herangezogen werden um den Einflussbereich hinsichtlich des Abbrands um die Rohrleitungen anzugeben.

Die Maximalwerte des Einflussbereichs zusätzlichen Abbrands liegen bei den simulierten Werten für das 60 mm dicke Modul bei ca. 40 mm, 50 mm und 60 mm für die Rohrdurchmesser 12 mm, 22 mm und 42 mm. Der zusätzliche Abbrand durch die Rohrleitung ist damit auf einen Bereich von 30 mm um die Rohrleitung begrenzt. Für die 90 mm dicken Module lässt sich unabhängig vom Rohrdurchmesser ein maximaler Einflussbereich zusätzlichen Abbrands um die Rohrleitungen von 60 mm bis 70 mm an den Diagrammen ablesen. Dies führt bei Betrachtung der kleinsten Rohrleitung zu einem Bereich von 60 mm um die Rohrleitung, der zusätzlich verkohlt wird.

Auf dieser Grundlage kann empfohlen werden, dass Bohrungen in Modulen, die für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten ausgelegt sind, mindestens 30 mm vom Modulrand entfernt

sein sollten. Für Module, die für eine 90-Minütige Feuerwiderstandsdauer ausgelegt sind, soll ein Abstand von 60 mm zwischen Bohrungen und Modulrand eingehalten werden. Dieser Abstand kann auf der sicheren Seite liegen auch für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten empfohlen werden.

Für die Abstände zwischen zwei unterschiedlichen klassifizierten Abschottungen wird ein Mindestabstand von 60 mm bei einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten und von 120 mm bei einer Feuerwiderstandsdauer von 90 bzw. 60 Minuten empfohlen. Diese Empfehlung ergibt sich durch Verdopplung des Abstands einer Bohrung zum Modulrand bei entsprechender Beanspruchung und berücksichtigt dabei den möglichen Einbrand um beide Durchführungen. Bei Einhaltung dieses Abstands ist davon auszugehen, dass sich die durch die Durchführungen ausgelösten Abbranderscheinungen im Querschnitt nicht beeinflussen.

Werden zwei Leitungen in benachbarten Bohrlöchern geführt, muss für den Abstand zwischen diesen beiden Bohrungen berücksichtigt werden, dass sich die Temperaturen um die Leitungen im Querschnitt überlagern. Der kritische Abstand kann daher nur in Simulationen mit mehreren Rohren gefunden werden. Der Abstand muss so dimensioniert werden, dass ein ausreichender unverbrannter Restquerschnitt zwischen den Bohrungen verbleibt. Die entsprechenden Untersuchungen werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Ermittlung notwendiger Moduldicken und Mindestabstände zwischen Bohrungen

Notwendige Moduldicken Aufgrund der Untersuchungen in Abschnitt 7.1 wurden angepasste Moduldicken für die Feuerwiderstandsdauern 30 und 60 Minuten ermittelt. Anhand des Simulationsmodells wurden die dort ermittelten Moduldicken überprüft. Simulationen der bekannten Kupferrohrleitungen in Modulen mit der Dicke 90 mm und Modulen der Dicke 120 mm bei einer Brandbeanspruchung von 30 bzw. 60 Minuten führten zu Temperaturerhöhungen auf den Rohrleitungen zu Versuchsende, die mit den Temperaturen auf den Leitungen bei den Versuchen in 160 mm bei 90 Minuten Versuchsdauer gemessen bzw. simuliert wurden, vergleichbar sind (siehe Abb. 7.26). Es ergeben sich maximale Abweichungen von 6% bei der erreichten Maximaltemperatur auf der Rohrleitung. Klassifizierte Abschottungen eingebaut in Module mit der Dicke 160 mm erhielten in Versuchen [98] über 90 und 120 Minuten die erforderlichen Leistungskriterien aufrecht. Daraus kann geschlossen werden, dass in Module dieser Dicken eingebaute klassifizierte Abschottungen bei einer Brandprüfung ebenfalls die Leistungskriterien (vor allem Wärmedämmung) über die jeweilige Versuchsdauer mit großer Wahrscheinlichkeit aufrechterhalten können. Dies ist in den jeweiligen Prüfungen zu bestätigen. Weiterhin liegt die Temperatur auf den Leitungen zu Versuchsende nur wenig (ca. 10%) oberhalb der Temperatur, die auf derselben Leitung im Betonmodul mit der Dicke 60 mm nach 30 Minuten gemessen wurde. Die Leitungsanlagenrichtlinie gestattet die zuletzt genannten Durchführungen sowie entsprechende Durchführungen größerer Leitungsdurchmesser. Zusätzlich sind durch die MLAR dieselben Durchführungen in Betonbauteilen mit einer Dicke von 80 mm bei einer Brandbeanspruchung von 90 Minuten gestattet, wobei höhere Temperaturen auf den Leitungen zu Versuchsende zu erwarten sind. Die Temperaturen der entsprechenden Messstellen auf der Betonoberfläche liegen in allen Fällen deutlich oberhalb der Temperaturen auf der Holzoberfläche (vgl. Anhang D). Zu einer Entzündung der Holzoberfläche auf der unbeflammten Seite kam es in den durchgeführten Versuchen nicht. Durch die vergleichbaren Temperaturen auf den Leitungen bei der Durchführung durch Holz- und Betonbauteile ist das Risiko der Brandweiterleitung infolge der Temperaturerhöhungen auf den Leitungen vergleichbar.

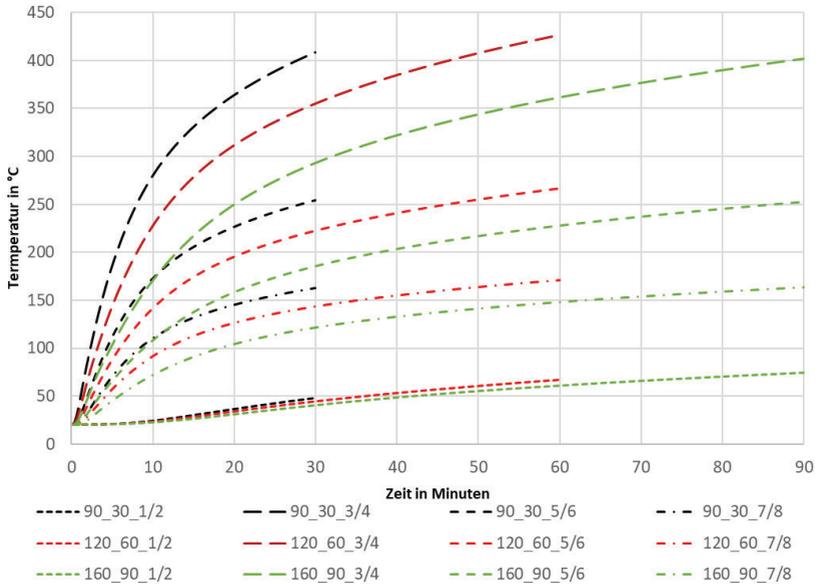


Abb. 7.26: Vergleich der Temperaturen auf einer Kupferrohrleitung mit dem Durchmesser 42 mm in 90 mm dicken Modulen über 30 Minuten (90_30), 120 mm dicken Modulen über 60 Minuten (120_60) sowie 160 mm dicken Modulen über 90 Minuten (160_90)

Mindestabstände zwischen Bohrungen Auch für die nun bestätigten Moduldicken von 90 mm und 120 mm wurden Simulationen hinsichtlich des Bereichs zusätzlichen Abbrands durchgeführt. Die Ergebnisse sind zusammengefasst mit den Ergebnissen der Simulationen der Moduldicke 160 mm in Abb. 7.27 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass vor allem der Durchmesser der Rohrleitungen sowie die Zeit der Beanspruchung einen Einfluss auf den zusätzlichen Abbrand um die Leitungen haben. Die Moduldicke beeinflusst den Abbrand, bei ausreichender Moduldicke, innerhalb des Holzquerschnitts kaum (vgl. dazu Abb. 7.28). An der Austrittsstelle der Rohrleitung auf der Kaltseite kommt es allerdings bei schwächeren Holzquerschnitten zu einem stärkeren Abbrand. Dies ist mit den höheren Oberflächentemperaturen der Leitungen an der Austrittsstelle bei dünneren Querschnitten zu begründen.

Werden Bohrungen mit Leitungsdurchführungen nebeneinander angeordnet, beeinflussen sie gemeinsam die Temperaturentwicklung im Holzquerschnitt, der zwischen den Leitungen liegt. Bei Beeinflussung durch zwei Durchführungen liegt das Temperaturniveau im dazwischenliegenden Querschnitt über dem Temperaturniveau des Querschnitts um eine einzelne Leitungsdurchführung. Diese stärkere thermische Beanspruchung des Holzes kann zu einem stärkeren Abbrand im Bereich zwischen den Leitungen führen. Der Mindestabstand zwischen zwei Bohrungen ist so zu wählen, dass bei diesem Abstand ein ausreichender Querschnitt unverbrannten Restholzes zwischen den Leitungen verbleibt, sodass der Raumabschluss gewährleistet bleibt. Da der zusätzliche Abbrand im Querschnitt immer von der Bohrkante ausgeht, sind die Maße und die Lage der Bohrungen maßgebend für die Bestimmung der Abstände. Nach [144] führt selbst ein durchgehend verkohlter Holzquerschnitt nicht zur Flammenbildung auf der unbeflammten

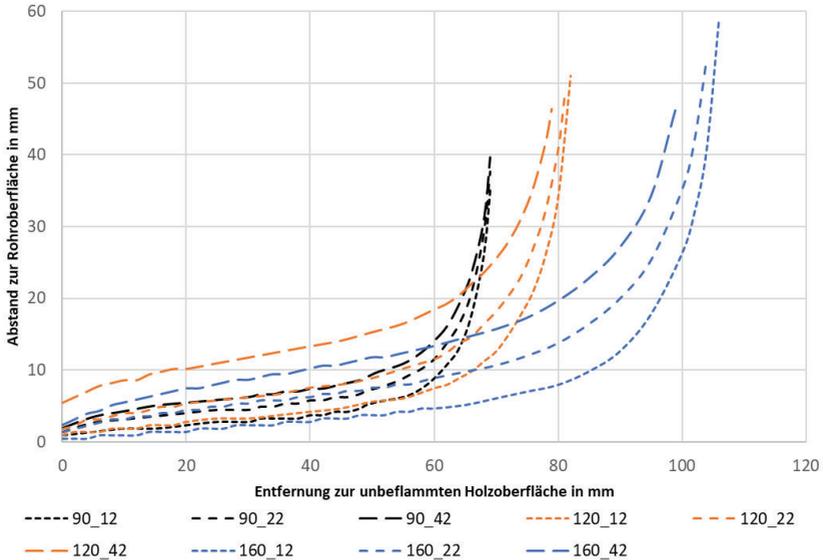


Abb. 7.27: Darstellung der Abbrandgrenze um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm in Modulen mit den Dicken 90 mm, 120 mm und 160 mm bei entsprechenden Beanspruchungsdauern nach ETK

Seite und der hose stream Test nach ASTM E2226 [203] wurde bestanden. Dieser Test bestätigt eine ausreichende Reststabilität des Querschnitts. In dieser Arbeit soll der verbleibende Restquerschnitt im Mittelpunkt zwischen den Leitungen mindestens 30 mm groß sein. Nahe der Bohrungen kann ein deutlich höherer Abbrand auftreten. In der späteren Anwendung wird dieser allerdings durch Dichtmaterialien um die Leitungen deutlich eingeschränkt. Die Durchführung metallischer Leitungen in passgenauen Bohrungen stellt, wie bereits erwähnt, einen besonders kritischen Fall dar, der zur konservativen Dimensionierung von Querschnitten und Abständen dienen soll.

Der Wert 30 mm resultiert aus der Addition zweier Werte. Zum einen kam es bei einem Versuch [190], in dem ein 60 mm dickes Modul bis zum Durchbrand beansprucht wurde, zum Durchbrand, als noch ein durchschnittlicher Restquerschnitt unverbrannten Holzes von 15 mm vorhanden war. Zum anderen ergab der Vergleich der Auswertungen aus Abschnitt 7.4.2, dass zu simulierten Ergebnissen hinsichtlich des Abbrands in Abbrandrichtung ein Sicherheitszuschlag von 15 mm zugerechnet werden muss. Addiert ergeben die beiden Werte von je 15 mm den Wert des erforderlichen Restquerschnitts von 30 mm. Bei Vorhandensein dieses Restquerschnitts zwischen den Leitungen in der Simulation kann sichergestellt werden, dass nicht der komplette Querschnitt zwischen den Leitungen verkohlt ist.

In der MLAR wird der Rohrdurchmesser zur Bestimmung von Mindestabständen zwischen Leitungen herangezogen, die nach den Erleichterungen der MLAR durch Bauteile geführt werden. Da die Beanspruchung des Holzquerschnitts durch die Leitung maßgeblich von deren Durchmesser beeinflusst wird, soll dieser auch hier bei Durchführungen durch Holzbauteile zur Bestimmung des Abstands zwischen Bohrungen dienen.

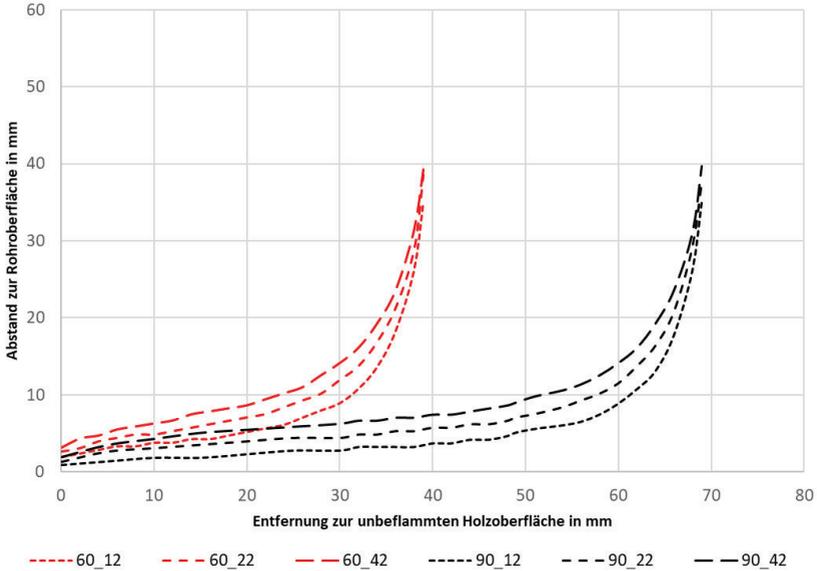


Abb. 7.28: Darstellung der Abbrandgrenze um die Rohrleitungen mit den Durchmessern 12 mm, 22 mm und 42 mm in Modulen mit den Dicken 60 mm und 90 mm nach 30 Minuten Brandbeanspruchung nach ETK

Da in der Praxis häufig mehrere Leitungen an einer Stelle durch ein Bauteil geführt werden, muss zunächst der kritische Fall der Anordnung eruiert werden. Die Ausgangssituation zum Vergleich unterschiedlicher Anordnungen stellt die Anordnung zweier Rohrleitungen mit Abstand in der Größe ihres Durchmessers dar. Abbildung 7.29 stellt die Erwärmung in einem Querschnitt zwischen zwei in dieser Art angeordneten Rohrleitungen dar. Weiterhin wird der Temperaturverlauf in einer beispielhaften Tiefe von 30 mm (von der unbeflammten Holzoberfläche gemessen), dargestellt. Dargestellt ist zum einen der Verlauf zwischen den beiden Rohroberflächen, der in diesem Fall den kritischen Pfad darstellt. Der Temperaturverlauf unterschreitet mittig die 300-Grad Grenze. Daher ist der Holzquerschnitt zwischen den Leitungen in dieser Tiefe nicht vollständig verkohlt. Zum anderen wird der Temperaturverlauf in 15 mm Entfernung senkrecht von beiden Rohroberflächen zum Vergleich mit der folgend beschriebenen Rohranordnung aufgezeigt.

Kritisch könnte die Anordnung zwei weiterer Rohre parallel zu den beiden ersten im selben Abstand sein. So wird der Holzquerschnitt zwischen den Leitungen durch vier Rohre beeinflusst. Dargestellt ist dieser Fall in Abb. 7.30.

7.4 FE-Simulationen zur Extrapolation der Ergebnisse der Versuche an metallischen Rohrleitungen

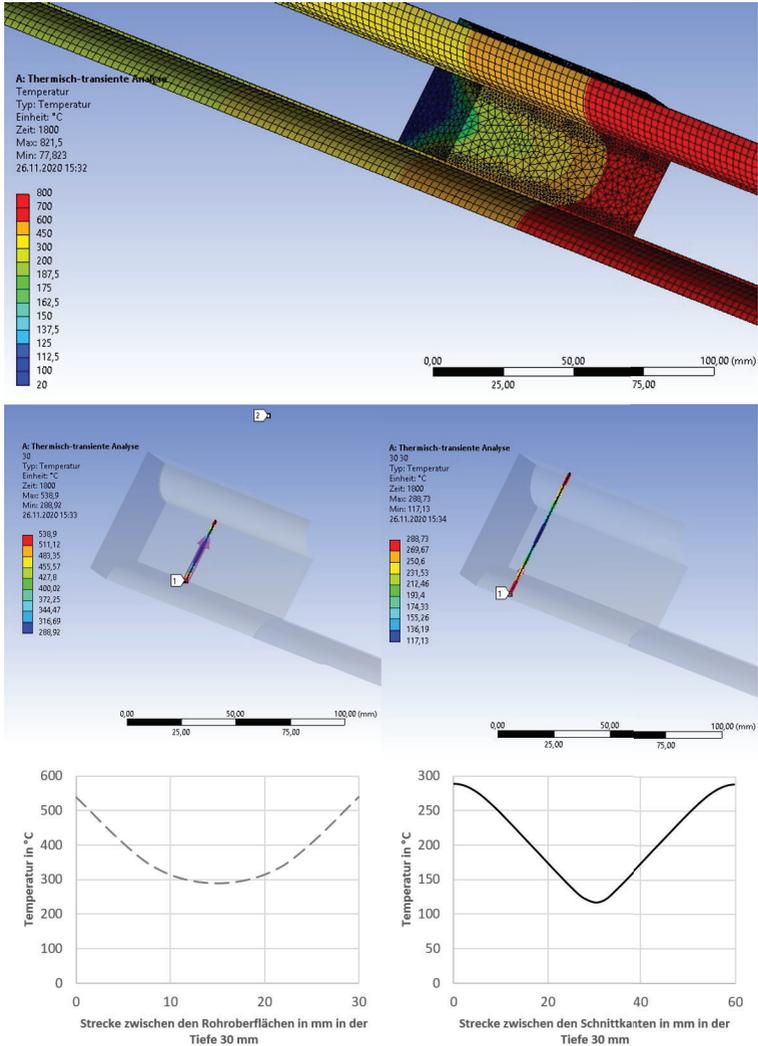


Abb. 7.29: Erwärmung zwischen den Rohrleitungen bei benachbarten Leitungen; Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm, Abstand entspricht Rohrdurchmesser

7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile

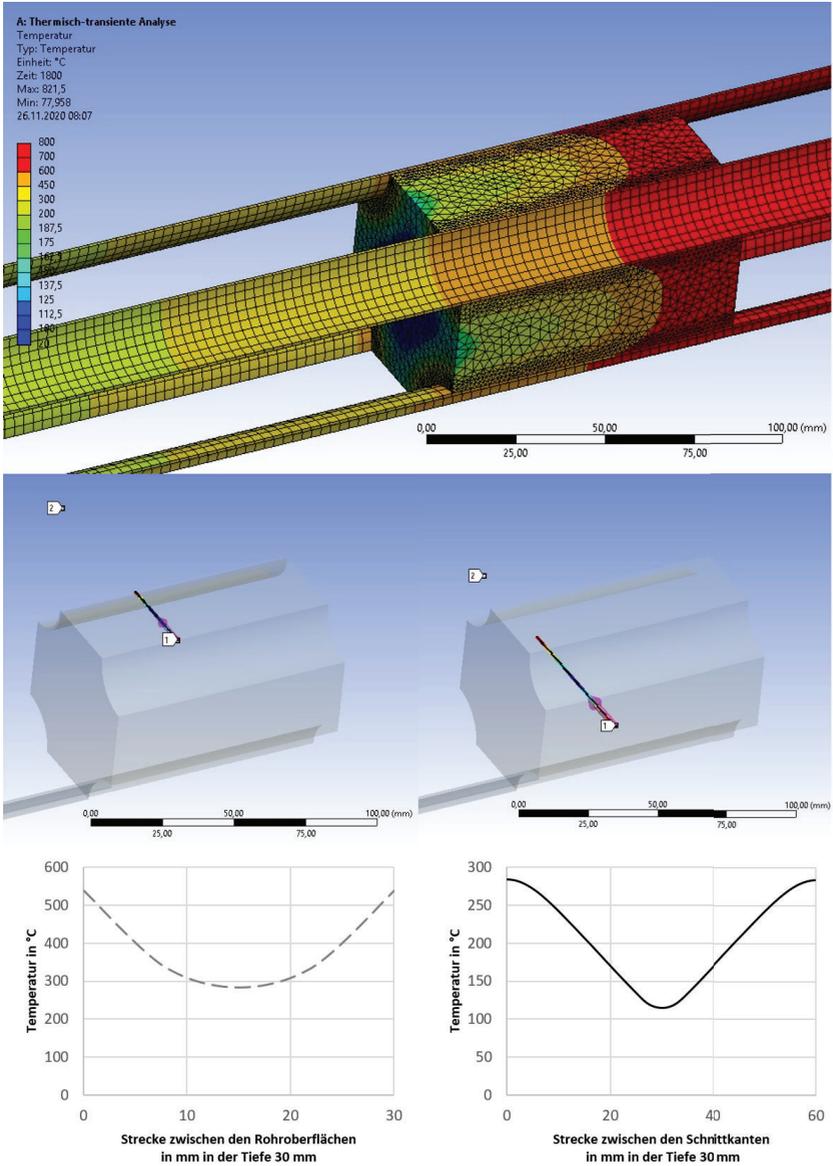


Abb. 7.30: Erwärmung zwischen den Rohrleitung bei Anordnung von vier Leitungen im Quadrat; Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm, Abstand entspricht Rohrdurchmesser

Die Temperaturen im Holzquerschnitt können mit denen aus Abb. 7.29 verglichen werden. Die Lage der dargestellten Temperaturverläufe entspricht der aus Abb. 7.29. Es ist zu erkennen, dass sich die Verläufe gleichen. Der Fall der Anordnung von vier Rohren in dieser Konstellation ist daher nicht als kritisch zu sehen.

Zum kritischen Fall kommt es, wenn zusätzlich zu den beiden Leitungen im Mindestabstand zueinander, beidseits jeweils eine weitere Leitung mittig zwischen den Leitungen mit jeweils demselben Mindestabstand zu den beiden ersten Leitungen angeordnet wird. Dieser Fall der Anordnung von vier Bohrungen, jeweils mit einem Abstand entsprechend ihres Rohrdurchmessers zueinander ist in Abb. 7.31 dargestellt. Werden weitere Bohrungen mit Leitungen oberhalb

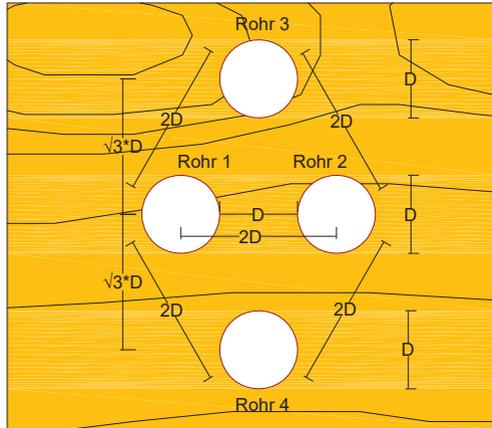


Abb. 7.31: Kritische Anordnungen von Bohrungen

oder unterhalb der ersten beiden Bohrungen vorgesehen, wird der Holzquerschnitt zwischen den ersten beiden Leitungen (Rohr 1 und 2 in Abb. 7.31) stärker beansprucht als bei den Anordnungen aus den Abbildungen 7.29 und 7.30. Siehe dazu Abb. 7.32. Abbildung 7.32 lässt erkennen, dass der maßgebende minimale Restquerschnitt unverbrannten Holzes sich mittig zwischen den Bohrungen der Rohre 1 und 2 einstellt. Der verbleibende Restquerschnitt mittig zwischen den Leitungen kann anhand eines Pfades an dieser Stelle von der unbeflammten Holzoberfläche aus hin zur Brandseite ermittelt werden. Die Abbrandgrenze befindet sich an der Stelle, an der die Temperatur $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ überschreitet. Dieser Pfad sowie die Temperaturwerte sind in Abb. 7.33 dargestellt. Zur Ermittlung von Mindestabständen zwischen den Rohrleitungen mittels Simulationen wurde der beschriebene kritische Fall der Anordnung herangezogen. Simuliert wurden unterschiedliche Rohrdurchmesser D in Schritten von 10 mm im jeweiligen Abstand D zueinander (vgl. Abb. 7.31). Die Rohrwandstärke wurde jeweils mit 2 mm eingegeben. Die Rohrdurchmesser wurden so lange erhöht, bis in der jeweiligen Moduldicke, bei der entsprechenden Beanspruchungsdauer zwischen den Rohren ein Restquerschnitt unverbrannten Holzes von mindestens 30 mm verblieb.

Für kleinere Rohrdurchmesser bzw. Bohrungen in denselben Moduldicken kann dieser Abstand, auf der sicheren Seite liegend, ebenfalls verwendet werden, da sich auf der Oberfläche von Rohren mit kleinerem Durchmesser bei gleicher Rohrwandstärke geringere Temperaturen ergeben. Bei weiterer Erhöhung des Rohrdurchmessers und daraus folgend auch größerem Abstand zwischen den Leitungen liegen die Ergebnisse ebenfalls zunehmend auf der sicheren Seite. Dies ist damit zu begründen, dass der Abbrand um die Rohrleitung zwar mit steigendem Rohrdurchmesser proportional zunimmt, der zusätzliche Abbrand im Holzquerschnitt allerdings nur einen gering-

7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile

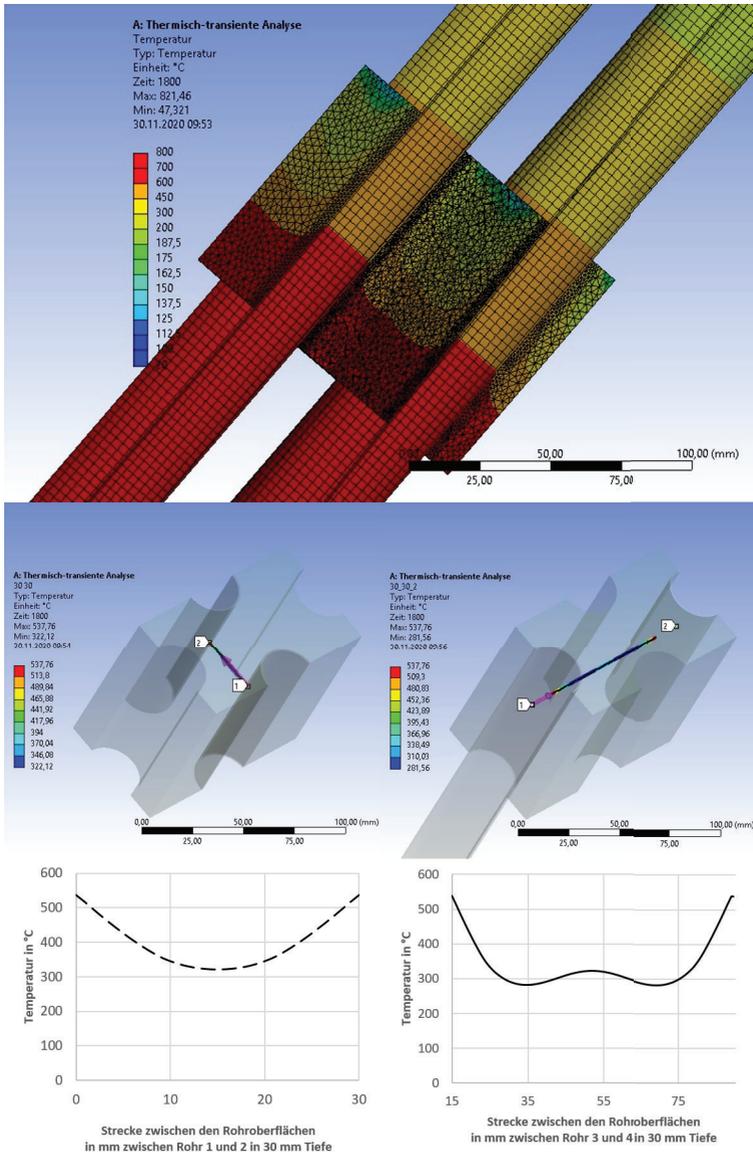


Abb. 7.32: Erwärmung zwischen den Rohrleitungen bei Anordnung von vier Leitungen; Abstand D (vgl. Abb. 7.31); Radius = 15 mm, Rohrwandstärke = 1 mm

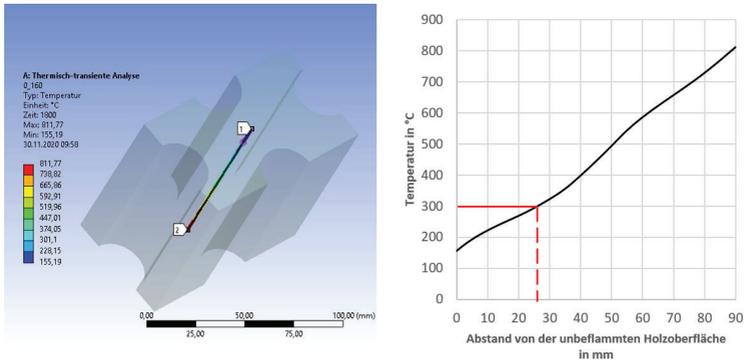


Abb. 7.33: Verlauf der Temperatur im Holzquerschnitt mittig zwischen den Rohren 1 und 2 (mit Eingabeparametern wie in Abb. 7.32)

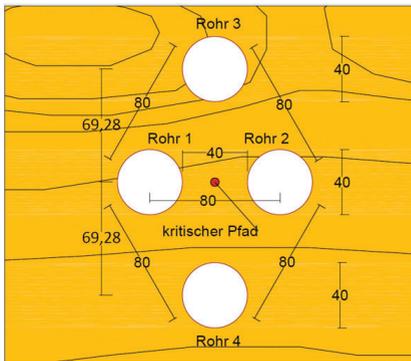
geren Anteil des Abstands der Rohre zueinander darstellt (vgl. dazu Abb. 7.8 und Abb. 7.27 sowie [196]). Im dargestellten Beispiel (Abb. 7.33) wurde der erforderliche Restquerschnitt von 30 mm mittig zwischen den Leitungen nicht erreicht. Nach entsprechenden Simulationen unter Beanspruchung nach ETK ergeben sich die in Abb. 7.34 dargestellten Temperaturverläufe der kritischen Pfade und somit für

- die Moduldicke 90 mm bei 30 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 40 mm,
- die Moduldicke 120 mm bei 60 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 60 mm sowie
- die Moduldicke 160 mm bei 90 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 70 mm zwischen den Bohrungen.

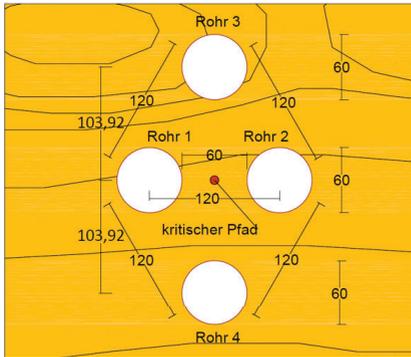
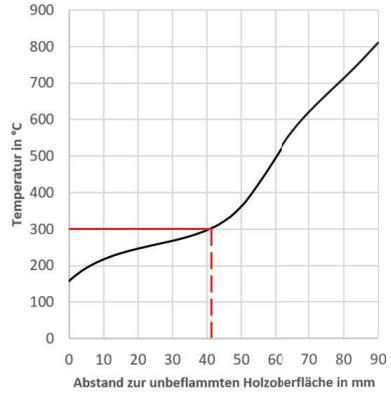
Für kleine Leitungsdurchmesser werden also zusätzliche vom Rohrdurchmesser unabhängige Mindestabstände in Abhängigkeit von der Moduldicke bzw. der Beanspruchungsdauer notwendig. Dies ist ebenfalls damit zu begründen, dass die Abbranderscheinungen um die Leitungen vor allem von der Beanspruchungsdauer abhängen und nur weniger stark vom Durchmesser der Leitung. Bei größeren Durchmessern liegen die Abstände der Leitungen untereinander, wenn diese dem Leitungsdurchmesser entsprechen, zunehmend weiter auf der sicheren Seite. Die hohen Temperaturen bleiben aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Holzes und der Kohle stark auf den direkten Bereich um die Bohrung begrenzt.

Durch die iterative Ermittlung der notwendigen Abstände in 10 mm-Schritten ergeben sich bei den ermittelten Mindestabständen unverbrannte Restquerschnitte von über 40 mm bzw. 50 mm, was die Sicherheit weiter erhöht. Eine Iteration in kleineren Schritten ist aus baupraktischen Gründen nicht sinnvoll.

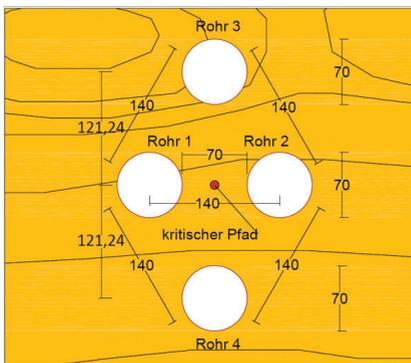
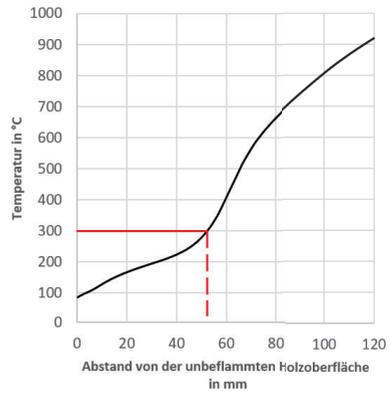
7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile



Rohrdurchmesser und Abstand 40 mm



Rohrdurchmesser und Abstand 60 mm



Rohrdurchmesser und Abstand 70 mm

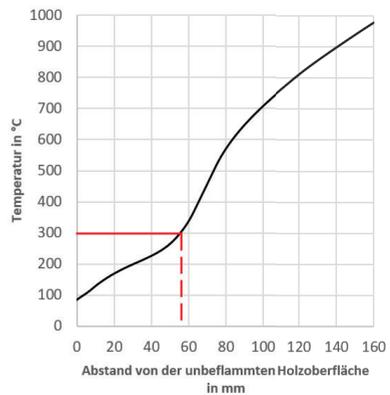


Abb. 7.34: Darstellung der Lage und der Temperaturverläufe der kritischen Pfade für die ermittelten Mindestabstände zwischen den Rohrleitungen und entsprechenden Rohrdurchmessern

Tab. 7.15: Zusammenfassung der Ergebnisse hinsichtlich Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung aus Abschnitt 7.3 und Abschnitt 7.4

Feuerwiderstandsdauer	Mindestmoduldicke	Mindestabstand zwischen Bohrungen für Einzelleitungsdurchführungen d	Mindestabstand zwischen Öffnungen für klassifizierte Abschottungen a	Mindestabstand zum Modulrand r
30 Minuten	90 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 40 mm	60 mm	30 mm
60 Minuten	120 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 60 mm	120 mm	60 mm
90 Minuten	160 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 70 mm	120 mm	60 mm
Fundort	S.137	S.145	S.136	S.136

Tabelle 7.15 fasst die Ergebnisse aus Abschnitt 7.3 und Abschnitt 7.4 hinsichtlich der Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführungen in Holzmodulen zusammen. Abbildung 7.35 stellt die in Tab. 7.15 zusammengefassten Abstände im Modul und die erforderlichen Moduldicken dar. Eine Simulation von vier der bekannten Rohre mit dem Durchmesser 42 mm im beschriebenen Abstand zeigt, dass die Temperaturen auf der Leitungsoberfläche durch die Anordnung der Bohrungen in den minimalen Abständen nicht beeinflusst werden (siehe Abb. 7.36). Die Temperatur auf der Holzoberfläche in 25 mm Entfernung zur Leitung (in Richtung Rohr 2) nimmt erwartungsgemäß zu. In der Realität können die Rohrleitungen durch Strahlungseinflüsse der anderen Leitungen geringfügig höhere Temperaturen erreichen. Dies wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

7 Untersuchungen zur Durchführung einzelner Leitungen durch Holzbauteile

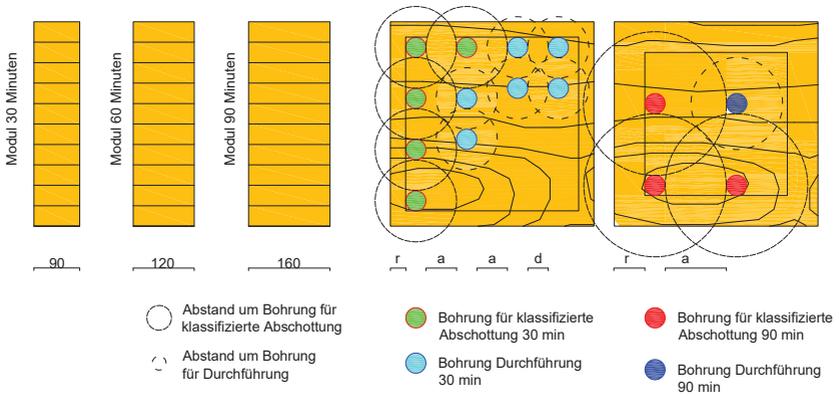


Abb. 7.35: Darstellung der Abstände und Moduldricken aus Tab. 7.15

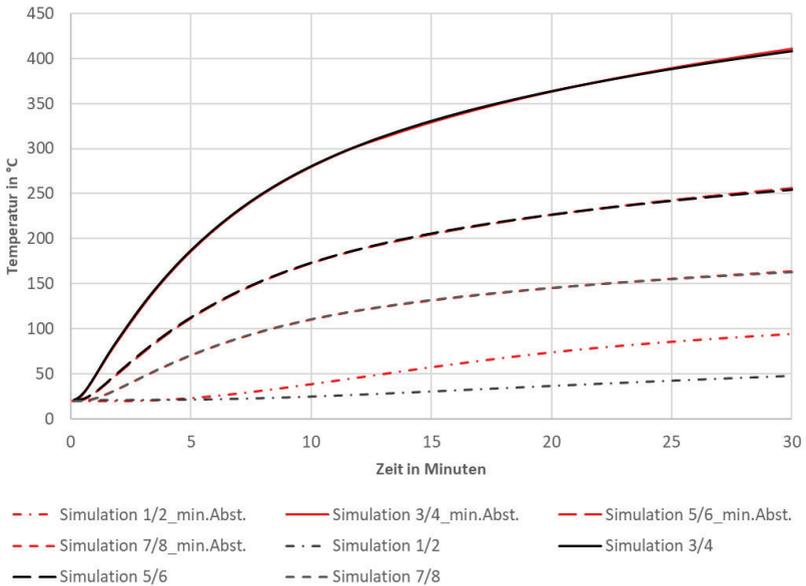


Abb. 7.36: Temperaturen auf der Rohrleitung $\varnothing 42$ mm und auf der Holzoberfläche bei Anordnung im ermittelten Mindestabstand nach 30 Minuten Beanspruchung nach ETK

7.5 Zwischenfazit

Es wurde ein Finite Element Simulationsmodell erstellt, mit dem Temperaturen auf Kupferrohrleitungen bei der Führung durch passgenaue Bohrungen in Holz bei Beanspruchung nach ETK für unterschiedliche Branddauern und Holzdicken berechnet werden können. Verwendet wurde die Software Ansys Workbench 2019R1 bzw. 2020R1. Grundlage zur Erstellung des Modells bildeten Brandversuche, die im Kleinbrandofen der TU Kaiserslautern durchgeführt wurden [195].

Mithilfe der Annahme einer Temperatur an der Abbrandgrenze im Holzquerschnitt lässt sich der Abbrand im Holzquerschnitt darstellen. Das Modell bildet diesen im Inneren des Bauteils sehr gut ab. In der Nähe der Abbrandgrenze der Holzoberfläche unterschätzt das Modell jedoch den Abbrand senkrecht zur Holzoberfläche je nach Branddauer um 10 mm bis 15 mm. Dies ist auf den Abtrag der Kohleschicht sowie die Beflammung zusätzlicher Oberflächen zurückzuführen. Beides kann im Simulationsmodell nicht explizit dargestellt werden. Teilweise sind diese Effekte auf die Beflammungssituation im Kleinbrandofen zurückzuführen.

Durch Simulationen konnten erforderliche Moduldricken für die unterschiedlichen Feuerwiderstandsdauern, die bereits im Abschnitt 7.1 vorgeschlagen wurden, bestätigt werden. Weiterhin wurden notwendige Mindestabstände zwischen Bohrungen anhand des Modells ermittelt. Die ermittelten Abstände sind als konservativ zu qualifizieren. Kupferrohre weisen eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit auf und führen deshalb zum kritischsten Abbrand um die Bohrungen. In den Simulationen wurde eine Rohrwandstärke von 2 mm angenommen, welche bei Leitungen mit kleinem Durchmesser in der Praxis nicht vorkommt. Für große Rohrdurchmesser liegen die Abstände, wenn sie dem Leitungsdurchmesser entsprechen, hinsichtlich des Abbrands im Querschnitt zwischen zwei Leitungen zunehmend auf der sicheren Seite. Durch weitere Untersuchungen könnten die notwendigen Abstände zwischen Leitungen großen Durchmessers voraussichtlich verringert werden.

8 Untersuchungen zum Anschluss der Holzmodule an Holzbauteile

Die bislang durchgeführten Versuchsreihen haben gezeigt, dass die Leitungsabschottung in Holzmodulen möglich und sinnvoll ist. In der Praxis müssen die Module in unterschiedliche Wand- und Deckenbauteile aus Holz eingesetzt werden können. Es ist daher zu untersuchen, wie die Fuge zwischen Modulen und den umgebenden Bauteilen ausgeführt werden kann bzw. muss. Im Rahmen dieser Arbeit wurden erste Untersuchungen durchgeführt, um zu zeigen, wie der Anschluss der Module an unterschiedliche Holzbauteile realisiert werden kann. In diesem Kapitel werden Empfehlungen zur Ausführung des Anschlusses gegeben sowie Hinweise auf deren Grundlage weitere Untersuchungen durchgeführt werden können. Eine erste Variante des Anschlusses der Module an Wandkonstruktionen wurde im Forschungsprojekt Leitholz [98] positiv getestet. Im Umfang dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Materialien und Fugenausbildungen werden im ersten Teil dieses Kapitels vorgestellt. Anschließend werden Ausführungsvarianten zu Fugen zwischen Holzbauteilen aus der Literatur aufgezeigt, mit den eigenen Ergebnissen kombiniert und Lösungen zur Anschlussausbildung unter Einbeziehung der Ausbildung der Öffnungsleibung (siehe Unterabschnitt 3.1.4) vorgeschlagen.

Da aus baupraktischen Gründen anzustreben ist, das Einsetzen der Module von beiden Seiten des Bauteils zu ermöglichen, ist die Ausführung der Fuge in Geometrien, die einen Fugenversatz erzeugen, nur unter erhöhtem Aufwand möglich. Es ergibt sich daher eine stumpf gestokene Fuge zwischen Modul und dem umgebenden Bauteil bzw. der darin hergestellten Öffnungsleibung. Die Verbindung des Moduls zum Bauteil soll kraftschlüssig erfolgen. Es ist sicherzustellen, dass die Module fest in Wänden verankert sind sowie beim Deckeneinbau der Belastung durch eine Person standhalten.

8.1 Versuchsreihe „Anschlussfuge Modul an Holzbauteil“

Aus brandschutztechnischer Sicht sind im Holzbau vor allem massive Bauteile und hohlraumbehaftete (teils gedämmt) Bauteile zu unterscheiden. Bei Bauteilen mit Hohlräumen oder brennbaren Schichten kann es zu Bränden innerhalb der Bauteile kommen. Diese können sich unerkannt entwickeln und sind schwer zu detektieren und zu löschen. Bei der Herstellung von Öffnungen in Schichtaufbauten oder Bauteilen mit Hohlräumen wird aus baupraktischen Gründen ein Wechsel notwendig. Zudem wird bei hochfeuerhemmenden Bauteilen eine klassifizierte Bekleidung der Öffnungsleibung gefordert. Auch massive Bauteile bestehen meist nicht nur aus einer massiven Holzschicht (vgl. Aufbauten aus [33]). Aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Schallschutz) sind weitere Bauteilschichten notwendig. Auch hier wird somit aus baupraktischen Gründen eine Bekleidung der Öffnungsleibung erforderlich.

Es ergibt sich damit im Regelfall die Situation, dass das massive Holzmodul an eine flächige Bekleidung angeschlossen wird. Die Baustoffe der Bekleidungsmaterialien müssen bei hochfeuerhemmenden Bauteilen nichtbrennbar sein. Es sind jedoch in Zukunft auch brennbare Bekleidungen oder unbekleidete Bauteile als Regelfall denkbar. Letzteres betrifft vor allem massive Holzbauteile.

Die Untersuchung des Anschlusses der Module an brennbare Oberflächen ist als konservativ im Vergleich zum Anschluss an nichtbrennbare Oberflächen anzusehen. In der Versuchsreihe wurde daher der Anschluss der Module an eine Holzoberfläche untersucht, in diesem Fall dargestellt

durch Brettsper Holz. Je nach Material (Holzwerkstoff) und Dicke der Leibungsbekleidung können sich Unterschiede bezüglich des Brandverhaltens im Vergleich zu dem von Brettsper Holz ergeben.

Zur Untersuchung der Fugen war zunächst festzulegen nach welchen Vorgaben diese zu untersuchen sind. Nach ETAG 026-3 [204] sind Fugen mit einem Bewegungsvermögen der Fugendichtung von mehr als 7,5% Bewegungsfugen. Im hier betrachteten Fall könnte es sich um eine Bewegungsfuge aufgrund des Schwind- und Quellverhaltens des Holzes handeln. Da die Holzmodule allerdings kraftschlüssig mit der umgebenden Holzkonstruktion verbunden werden sollen, wird eine Fuge mit annähernd konstanter Breite angenommen. In den durchgeführten Versuchen [199] wurde die Fuge zwischen Modul und Holzkonstruktion daher als Anschlussfuge ohne Bewegungsvermögen zwischen einem Wandbauteil aus BSP und einem BSH-Modul untersucht. Grundlage zur Versuchsdurchführung stellte DIN EN 1366-4 [194] i.V.m. DIN EN 1363-1 [5] dar. Die Versuchsreihe wird folgend beschrieben. Die Versuchsergebnisse sollen erste Hinweise bezüglich geeigneter Materialien und Ausführungsvarianten zur Fugenabdichtung ermöglichen. Eine weiterführende strukturierte Untersuchung, bei der gezielt Fugenbreiten und Bauteildicken variiert werden, kann in einem zukünftigen Projekt erfolgen.

8.1.1 Versuchsaufbauten

Um eine Vergleichbarkeit zu anderen im Rahmen dieser Arbeit bereits durchgeführten Versuchen zu ermöglichen, wurden auch zur Untersuchung der Fugenausbildung Wandbauteile gewählt. Die Untersuchung von Viertelausschnitten eines Modul-Wandanschlusses wurde als repräsentativ erachtet, daher konnten die Untersuchungen im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [181] der TU Kaiserslautern durchgeführt werden. Aus [98] ist bekannt, dass Versuche im Kleinbrandofen der TU Kaiserslautern an Leitungsdurchführungen im Vergleich zu Versuchen im Großbrandofen zu konservativen Ergebnissen führen. Diese Erkenntnis kann nach Meinung des Autors auf die Untersuchungen an Fugen übertragen werden. Dem entgegenstehende Hinweise gab es nicht. Durch die Wahl des Kleinprüfstandes kommt es zur Unterschreitung der von DIN EN 1366-4 [194] geforderten Mindestlänge der Fuge sowie den geforderten Mindestabständen zum Probekörperwand. Als Wandaufbau wurde eine Brettsper Holzkonstruktion gewählt, entsprechend den bereits aus dem Großbrandversuch bekannten (siehe Unterabschnitt 6.3.1). Aus den Wandbauteilen wurde jeweils ein Viertel ausgespart, um ein Modulviertel (BSH-Modul) einsetzen zu können. Der zu untersuchende Ausschnitt, den die Probekörper abbilden, ist in Abb. 8.1 dargestellt. Zur Ausbildung der Fugen wurden unterschiedliche für den Massivbau zugelassene Dichtmaterialien verwendet. Zu unterscheiden waren die Ausführungen der Fugen hinsichtlich des Dichtmaterials, der Fugenbreite sowie der Art der Fugenausbildung (Verfülltiefe) mit den unterschiedlichen Materialien. Es wurden folgende Arten der Fugenausbildung unterschieden:

1. lineare Fugendichtung: vorgefertigt, in definierte Tiefe eingebracht,
2. teilflächige Fugendichtung: Abdichtung bis zu einer definierten Tiefe mit flüssigen oder stopfbaren Materialien,
3. vollflächige Fugendichtung: Verschluss der Fuge über die gesamte Bauteiltiefe.

Die Arten der Fugenausbildung sind in Abb. 8.2 dargestellt. Die vollständig verfüllte Fugenausführung wurde anhand von Mineralwolle [205] und Brandschutzschaum [206] untersucht. Die Mineralwolle wurde unterschiedlich dicht in die Fuge eingebracht.

Die linearen Systeme wurden in den Versuchen zum einen durch eine vorgefertigte nicht-brennbare Fugenschnur auf Mineralwollbasis [207] repräsentiert, zum anderen wurden Brandschutzfugenschnüre auf Basis intumeszierender Materialien [208] in zwei verschiedenen Durchmessern verwendet. Die Fugenschnüre haben eine definierte Dicke und können komprimiert in die Bauteilfuge eingebracht werden. Weiterhin wurde ein Dämmschichtbildner in

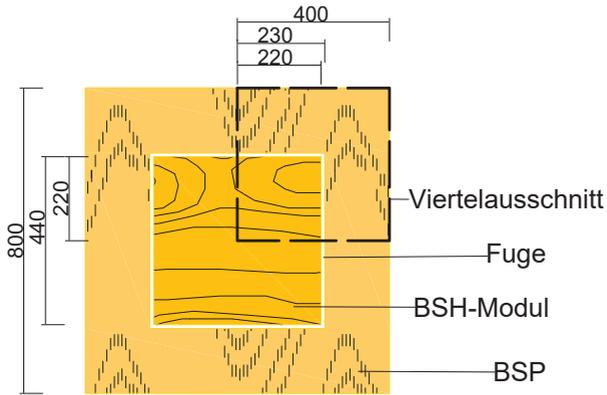


Abb. 8.1: Allgemeiner Aufbau der Probekörper: Anschlussfuge Modul/Bauteil

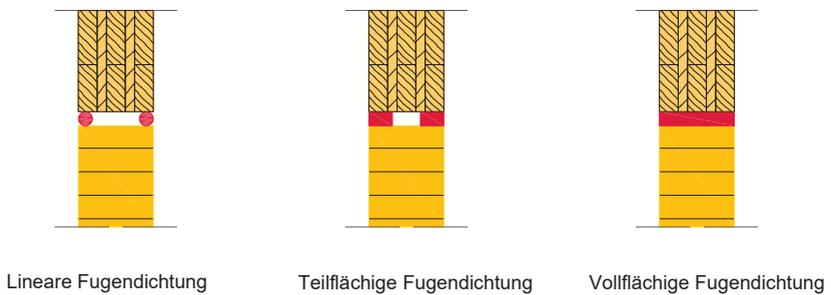


Abb. 8.2: Unterschiedliche untersuchte Arten der Fugenausbildung

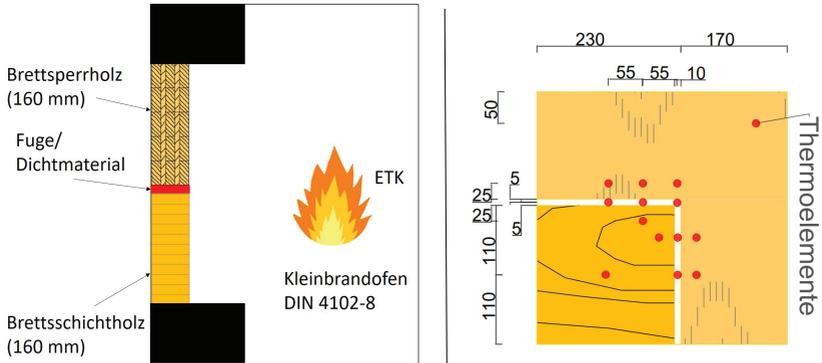


Abb. 8.4: Anschlussfuge Holz an Holz: Links: Allgemeiner Versuchsaufbau, rechts: Lage der Messstellen auf der unbeflammten Seite

Nach Versuchsende wurden die Probekörper schnellstmöglich abgebaut und direkt mit Wasser abgelöscht, um ein weiteres Verkohlen nach Versuchsende möglichst einzuschränken. Der allgemeine Versuchsaufbau ist in Abb. 8.4 dargestellt. Thermoelemente wurden auf den Fugen oberhalb bzw. 25 mm seitlich der Fugen und in 24 mm und 54 mm Tiefe von der unbeflammten Seite entfernt jeweils an den Positionen der Oberflächenthermoelemente auf den Fugen innerhalb der Fuge angebracht. Die Messstellen auf der unbeflammten Seite sind in Abb. 8.4 dargestellt. Die exakte Lage aller Temperaturmessstellen kann [199] bzw. den oben bereits genannten Versuchsberichten entnommen werden.

8.1.3 Versuchsergebnisse

Die kritische Temperaturerhöhung von 180 K auf der brandabgewandten Bauteiloberfläche wurde in den Versuchen 02 [212], 03 [213] und 11 [221] bei einer Versuchszeit von ca. 115 Minuten überschritten. Die Messstellen, die zur Überschreitung der Grenztemperatur zur Beurteilung des Wärmedämmkriteriums führten lagen jeweils auf der Oberfläche der Fuge und zwar im Eckbereich und/oder auf dem vertikalen Fugenbereich. In allen genannten Versuchen (02, 03, 11) wurden lineare Fugendichtungen verwendet. Diese stellten also, wie bereits erwartet, den kritischsten Fall dar.

Das Versagen der Fugenschnur auf Steinwollbasis war zu erwarten, da diese den Abbrand des Holzes nicht kompensieren kann. Eher unerwartet war das Versagen der intumeszierenden Fugenschnur, vor allem in Versuch 03, da dort die minimale im Anwendbarkeitsnachweis genannte Fugenbreite untersucht wurde. Als wahrscheinlicher wurde im Vorfeld das Versagen des Aufbaus in Versuch 04 beurteilt. Warum Versuch 03 versagte und Versuch 04 die Leistungskriterien aufrechterhalten konnte bleibt unklar. An dieser Stelle sind weitere Versuche notwendig, um den Einfluss unterschiedlicher Fugenbreiten zu untersuchen. In allen anderen Versuchen konnten die beobachteten Leistungskriterien Wärmedämmung und Raumabschluss über 120 Minuten aufrechterhalten werden. Die Fugen waren dabei jeweils insgesamt über eine größere Tiefe ($5\text{ cm} + 5\text{ cm} = 10\text{ cm}$) verfüllt als die erwartete Abbrandtiefe von $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \cdot 120\text{ min} = 8,4\text{ cm}$. Die Rauchdichtheit der Fugen konnte in den Versuchen 05, 06, 07, 08 und 09 (vgl. Abb. 8.3) erreicht werden. Bei den anderen Fugenausführungen müssten dazu weitere Maßnahmen getroffen werden, wie beispielsweise eine zusätzliche Schicht einer flexiblen Brandschutzdichtmasse, die die linearen Dichtungsmaterialien überdeckt oder ein selbstklebendes, temperaturbeständiges

Tab. 8.1: Unverkohlter Restquerschnitt im Fugenbereich

Versuch	Modul	Wand	Modul	Wand	Modul
	vertikal	vertikal	horizontal	horizontal	Eckbereich
01	1,0 cm	1,3 cm	1,5 cm	1,9 cm	0,5 cm
02	0,5 cm	0,0 cm	1,0 cm	2,0 cm	0,0 cm
03	0,5 cm	0,5 cm	1,7 cm	3,0 cm	2,0 cm
04	4,0 cm	0,0 cm	1,2 cm	2,0 cm	0,0 bis 1,8 cm
05	6,8 cm	5,5 cm	8,1 cm	7,9 cm	7,5 cm
06	5,0 cm	4,6 cm	7,2 cm	7,4 cm	5,4 cm
07	7,0 cm	7,5 cm	7,0 cm	7,5 cm	8,6 cm
08	5,0 cm	6,0 cm	5,0 cm	5,4 cm	6,3 cm
09	6,1 cm	6,1 cm	9,6 cm	9,6 cm	7,7 cm
10	2,2 cm	2,4 cm	3,3 cm	4,9 cm	0,0 cm
11	0,0 cm	0,0 cm	1,0 cm	1,0 cm	0,0 cm

Dichtungsband. Der Abbrand innerhalb der Fuge stellt kein Prüfkriterium dar, kann aber zur Analyse von Schwachstellen und Versagensmechanismen der Systeme herangezogen werden. Bei den durchgeführten Versuchen ergaben sich hierbei deutliche Unterschiede. Tabelle 8.1 gibt die verbleibende Dicke unverbrannten Restholzes der einzelnen Versuche im Bereich der vertikalen und horizontalen Fuge der Modul- und der Wandkomponente sowie im Eckbereich wieder.

In nahezu allen Versuchen ist an den Messwerten in Bezug auf den Abbrand zu erkennen, dass die vertikale Fuge stärker beansprucht wurde. Es ist anzunehmen, dass dies mit der Beflammung im Kleinbrandofen zu begründen ist, wobei die Flamme zuerst die vertikale Fuge trifft (siehe Abb. 8.5). Zudem ist der Brenner in der Höhe so angeordnet, dass die Flamme unterhalb der horizontalen Fuge auf den Probekörper trifft. Hinsichtlich der Ausführungsvarianten ist zu erkennen, dass es vor allem bei linearen Systemen zu verstärktem Einbrand im Eckbereich kommt. Dies ist zum einen mit dem größeren Wärmeeintrag im Eckbereich durch die vorherrschende Geometrie zu begründen. Zum anderen hat die Stoßstelle der Fugenschüre im Eckbereich vermutlich einen negativen Einfluss. Kein erhöhter Abbrand stellte sich im Eckbereich bei der Verwendung von nichtbrennbaren, formstabilen Dichtmaterialien, wie Steinwolle oder Brandschutzacryl ein, die über die volle Fugentiefe eingebracht wurden.

Die Varianten mit vollflächig und teilflächig verfüllter Fuge sind hinsichtlich des Abbrandes durchweg positiv zu werten. Unterschiede durch das Einbringen der Mineralwolle in unterschied-

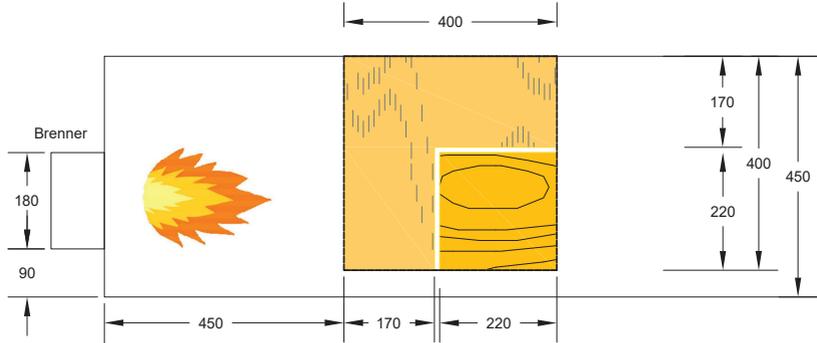


Abb. 8.5: Ansicht des Kleinbrandofens mit Positionen von Brenner und Probekörper, Maße in Millimeter

licher Dichte zeigen sich durch einen geringeren Abbrand bei der Ausführung mit eingelegter und gepresster Mineralwolle [215, 217]. Der Unterschied könnte auf die größere Wärmeleitfähigkeit der gestopften Wolle in Folge der höheren Verdichtung zurückzuführen sein. Allerdings ergeben sich auf der Fugenoberfläche der Fuge mit eingelegter Mineralwolle höhere Temperaturen, was gegen diese Theorie spricht. Durch das weniger dicht eingebrachte Material könnte allerdings die Permeabilität erhöht sein und hindurchtretende heiße Gase zur Erwärmung der Fugenoberfläche führen. Zudem ist festzustellen, dass sich die Temperatur innerhalb der Fuge an den einzelnen Messstellen in gleicher Tiefe bei der eingelegten Wolle deutlicher unterscheiden. Dies spricht für die Verteilung heißer Gase innerhalb der Fuge und somit für einen Wärmeeintrag durch Konvektion ins Fugeninnere. Vor allem im Eckbereich wurden früher höhere Temperaturen erreicht, was vor allem auf die geometrischen Randbedingungen zurückzuführen ist.

Bezüglich der Temperaturen im Fugeninneren, die im Abstand von 24 mm und 54 mm, von der unbeflammten Seite aus gemessen und aufgezeichnet wurden, kann bei den Ausführungen mit Fugenschnüren (auf Steinwoll- und Intumeszenzmaterialbasis) ein charakteristischer Verlauf beschrieben werden (siehe Abb. 8.6 und Abb. 8.7). Etwa zehn Minuten nach Versuchsstart steigt die Temperaturdifferenz an beiden Messstellen auf ein Niveau zwischen 50 und 100 K an, wobei die Temperatur von 100 °C nicht überschritten wird. Teilweise sind die Messwerte der beiden Messstellen in diesem Bereich nahezu gleich, teils ergeben sich etwas geringere Temperaturerhöhungen für die Messstelle in 24 mm Tiefe. Anschließend steigen die Temperaturen nach einer Versuchsdauer von ca. 60 Minuten und einmal 80 Minuten an beiden Messstellen weiter an, wobei in einer Tiefe von 54 mm höhere Temperaturunterschiede zu verzeichnen sind. Der beschriebene Verlauf kann folgendermaßen begründet werden: In den ersten Versuchsminuten erhöht sich die Temperatur im Brandraum und die beflamten Materialien erwärmen sich. Nach etwa zehn Minuten beginnt sich ein gewisses Temperaturniveau hinter der Fugenschnur auf der Brandseite einzustellen. Die ETK beginnt zu diesem Zeitpunkt bereits abzufallen. Da die Fugenschnur den Hohlraum verschließt, kann Wärme nur durch diese hindurch bzw. in geringem Maße auch über das umliegende Holz in die Fuge übertragen werden. Innerhalb der Fuge kann der Holzquerschnitt Wärmeenergie ableiten, zudem tritt ein Kühleffekt bei ca. 100 °C durch verdampfendes im Holz enthaltenes Wasser ein. Erst wenn der Abbrand soweit fortgeschritten ist, dass die Abbrandgrenze tiefer liegt als die Fugenschnur die Fuge verschließt, kommt es zu einem weiteren starken Wärmeeintrag ins Innere der Fuge. Die Hitze trifft zunächst und stärker die Messstelle, welche näher an der Brandseite angeordnet ist, da diese früher durch strömende Brandgase erreicht wird. Eine direkte Abhängigkeit der maximalen

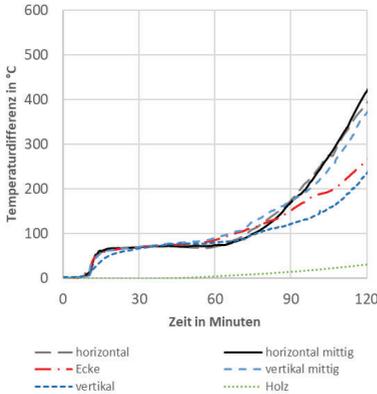


Abb. 8.6: Darstellung des Temperaturverlaufs der Messstellen in einer Tiefe von 24 mm am Beispiel einer intumeszierenden Fugenschnur 24 mm und einer Fugenbreite von 21 mm

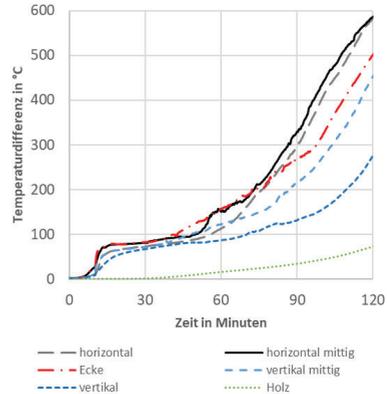


Abb. 8.7: Darstellung des Temperaturverlaufs der Messstellen in einer Tiefe von 54 mm am Beispiel einer intumeszierenden Fugenschnur 24 mm und einer Fugenbreite von 21 mm

Temperaturerhöhung von der Fugenbreite konnte nicht festgestellt werden. Die Temperaturerhöhungen innerhalb der Fuge, die mit der Fugenschnur auf Steinwollbasis abgedichtet wurde, waren bei gleicher Fugenbreite höher als die, die bei der Fugenabdichtung mit der vergleichbaren intumeszierenden Fugenschnur gemessen wurden. Dies kann damit begründet werden, dass die Fugenschnur aus intumeszierenden Materialien wirksamer den Durchtritt von heißen Gasen an der Dichtungsschnur vorbei ins Fugeninnere verhindert. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Fugenausführung im Brandfall ist das Verhalten der verwendeten Materialien im Brandfall sowie deren thermische Eigenschaften.

Somit können zum Fugenverschluss zum einen nichtbrennbare Materialien verwendet werden, zum anderen reaktive Materialien, die im Brandfall ihr Volumen vergrößern oder kühlend wirken. Intumeszierende Materialien können den Abbrand des Holzes teilweise kompensieren. Wird eine Fuge vollflächig verschlossen, ist theoretisch die Funktionsfähigkeit des Fugenverschlusses gegeben, sobald die Abbrandrate des Materials in der Fuge geringer ist als die des umgebenden Bauteils, sich keine Risse oder Spalte ergeben und durch das Material in der Fuge keine zusätzliche Wärme in das Bauteil eingebracht wird.

Die Fugentiefe sowie die Dauer der Beanspruchung wurde in dieser Versuchsreihe nicht variiert. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Verfülltiefe der Fuge einen entscheidenden Einfluss hat. Um eine ausreichende Verfülltiefe gewährleisten zu können, muss die Fugentiefe bzw. Bauteiltiefe ebenfalls ausreichend groß sein. Die Fugenbreite wurde nur in wenigen Fällen variiert. Ein Einfluss konnte festgestellt werden. Um differenziertere Aussagen treffen zu können, müssen weitere Untersuchungen unternommen werden.

Die Versuche, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, können für die Fälle eine Lösung bieten, in denen das Holzmodul zur Leitungsabschottung entweder an ein massives Holzbauteil angeschlossen wird oder die Öffnungsleibung eine Leibungsbekleidung (brennbar oder nichtbrennbar) in ausreichender Dicke hat, sodass der Anschluss mit dem an ein massives Holzbauteil vergleichbar ist bzw. als sicherer bewertet werden kann.

8.2 Anschlussbedingungen und Fugenausführung

8.2.1 Öffnungsausbildung

In Unterabschnitt 3.1.4 wurden unterschiedliche Varianten zur Ausbildung von Öffnungen bzw. der Ausbildung und dem Anschluss einer Öffnungsbekleidung vorgestellt. Ziel dieser Maßnahmen ist es, das Eindringen des Brandes über die Öffnung ins Innere des jeweiligen Bauteils zu verhindern, um Hohlraumbränden vorzubeugen. Die notwendigen Maßnahmen unterscheiden sich hinsichtlich der Art des Bauteils - mit oder ohne Hohlräume. Bei massiven Bauteilen ohne brennbare Dämmschichten ist lediglich ein verstärkter Abbrand des Bauteilquerschnitts aufgrund der Öffnung zu verhindern. Zudem sind die Maßnahmen abhängig von der Oberflächenausbildung der Bauteile. Unterschiede ergeben sich dabei hinsichtlich des Vorhandenseins einer Bekleidung sowie deren Brandverhalten.

Im Folgenden sollen auf Grundlage von Unterabschnitt 3.1.4 Möglichkeiten erarbeitet werden, wie der Anschluss von Holzmodulen an unterschiedliche Bauteile ausgeführt werden kann.

Um allgemeingültige Lösungsvorschläge geben zu können, müssen im Anschlussbereich vergleichbare Bedingungen geschaffen werden. Über eine entsprechende Bekleidung der Öffnungsleibung ist dies möglich. Die Bekleidung der Öffnungsleibung muss für die im jeweiligen Einzelfall erforderliche Feuerwiderstandsdauer sicherstellen, dass das Eindringen eines Brandes in das Innere des Bauteils ausreichend lang verhindert wird. Dieses Schutzziel kann bei entsprechender Dimensionierung mit einer brennbaren oder nichtbrennbaren Bekleidung erreicht werden. Ist eine Variante zur Fugenausbildung zum Anschluss der Module an eine brennbare Bekleidung, sprich eine Holzoberfläche mit ausreichend geringer Abbrandrate, geeignet, kann diese auch zum Anschluss an nichtbrennbare Bekleidungen herangezogen werden.

Weiterhin ist die jeweilige Dicke der Bauteile und Module relevant, die aneinander angeschlossen werden sollen. Es wurden unterschiedliche Moduldicken zum Erreichen unterschiedlicher Feuerwiderstandsdauern vorgeschlagen. Zu unterscheiden sind folgende drei Situationen:

1. die Bauteildicke ist größer als die Moduldicke
2. die Bauteildicke ist gleich der Moduldicke
3. die Bauteildicke ist kleiner als die Moduldicke

Der Fall, dass die Bauteildicke kleiner ist als die erforderliche Moduldicke wird in der Praxis nicht anzutreffen sein. Die Bauteildicke wird durch weitere Bauteilanforderungen (z. B. statische, schallschutztechnische) beeinflusst und ist deshalb normalerweise größer als aus brandschutztechnischer Sicht erforderlich. Diese Aussage konnte durch Vergleich der erforderlichen Moduldicke für zugelassene Bauteilaufbauten, welche in [33] gelistet sind, bestätigt werden. Sollte der Fall dennoch eintreten, kann die Bauteildicke durch Aufdopplung um die Öffnung an die Moduldicke angepasst werden.

In Abb. 8.8 sind mögliche Anschlussvarianten der Module an unterschiedliche Wandbauteile dargestellt, für den Fall, dass die Moduldicke kleiner oder gleich der Bauteildicke ist. Da im Falle von Wänden eine Brandbeanspruchung von beiden Seiten auftreten kann, sollte das Modul mittig in den Wandaufbau eingesetzt werden. Falls es aus Gründen der Befestigung notwendig sein sollte, kann das Modul auch außermittig eingesetzt werden. Da die Wanddicke im Regelfall größer sein wird als die Moduldicke, ist die Öffnungsleibung vor einer Brandbeanspruchung zu schützen. Die Art und Dicke der Bekleidung der Öffnungsleibung sowie die Moduldicke sind abhängig von der Feuerwiderstandsfähigkeit der durchdrungenen Bauteile und der Art ihrer Bekleidung. Bei der Durchdringung unbekleideter Massivholzbauteile ist keine Leibungsbekleidung notwendig, sofern die Moduldicke der Dicke des Wandbauteils entspricht und das Bauteil keine brennbaren Dämmschichten enthält. Diese Anwendung ist im Einzelfall zu beurteilen. Andernfalls ist eine nichtbrennbare Leibungsbekleidung anzubringen, die die Öffnungsleibung

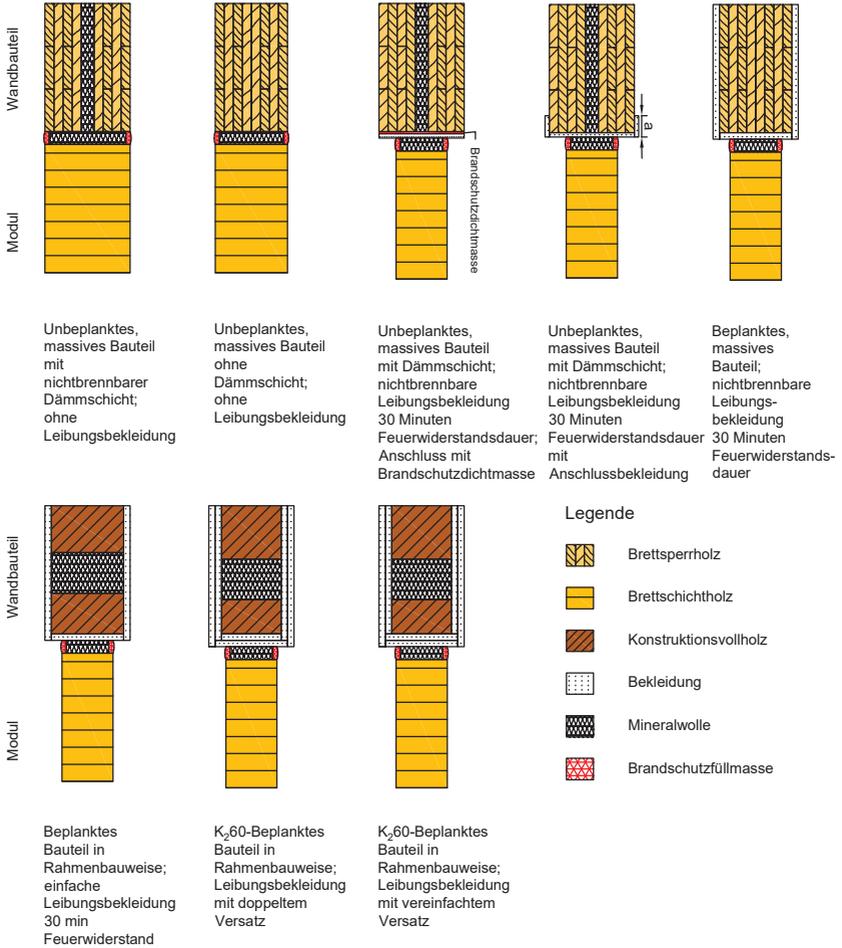


Abb. 8.8: Vorschläge zum Anschluss der Module an unterschiedliche Arten von Wandbauteilen

8 Untersuchungen zum Anschluss der Holzmodule an Holzbauteile

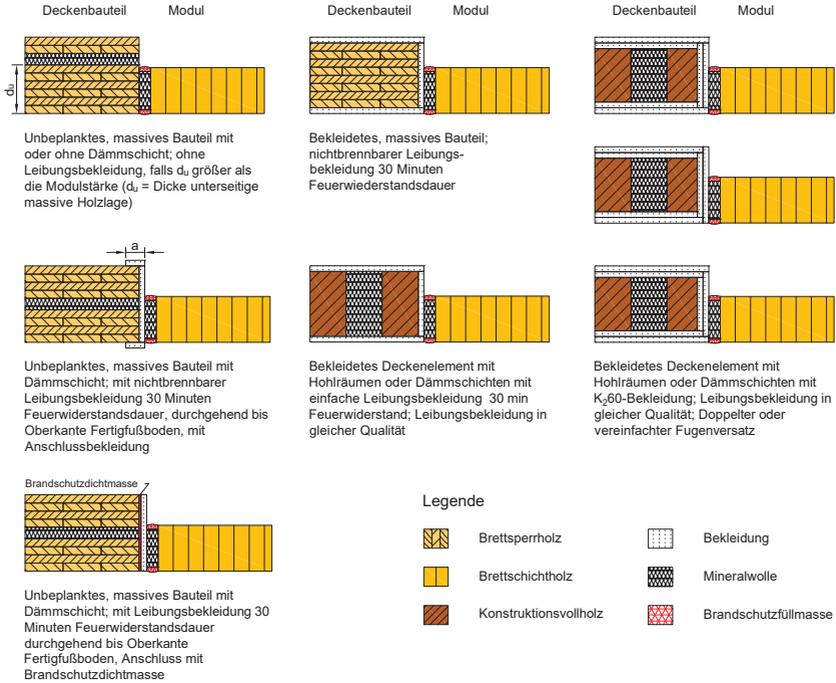


Abb. 8.9: Vorschläge zum Anschluss der Module an unterschiedliche Arten von Deckenbauteilen

für mindestens 30 Minuten (angelehnt an [28]) vor einer Brandbeanspruchung schützt. Um das Eindringen des Brandes in die Fuge zwischen Bekleidung und Bauteil zu verhindern, ist die Bekleidung der Öffnungsleibung mit einer Brandschutzdichtmasse an die Leibung anzuschließen oder die Fuge ist ebenfalls mit einer Brandschutzbekleidung auf einer Länge von 50 mm zu überdecken (Abb. 8.8: Bemaßung a). Ist die Oberfläche des massiven Wandbauteils bereits bekleidet, so ist die Bekleidung im Öffnungsbereich fortzuführen. Bauteile in Holzrahmenbauweise weisen konstruktionsbedingt eine Bekleidung auf. Bei feuerhemmenden Bauteilen ist die Bekleidung, die das Bauteil für 30 Minuten schützt, auch im Bereich der Öffnungsleibung anzubringen. Bei hochfeuerhemmenden Bauteilen in Holzrahmenbauweise, ist die Leibungsbekleidung gemäß [23] bzw. [28] als K_{260} Bekleidung auszuführen, wobei die Fugen in der zweilagigen Beplankung mit vereinfachtem oder doppeltem Versatz ausgeführt werden können.

Entsprechend den Anschlüssen an Wandbauteile enthält Abb. 8.9 Ausführungsvorschläge zum Anschluss der Module an Deckenbauteile. Da das zu betrachtende Brandszenario in diesem Fall ein Brand im Geschoss unterhalb des Deckenbauteils ist¹, sollte das Modul bündig mit der Unterkante des Deckenbauteils eingesetzt werden. Der Anschluss des Moduls ohne eine Bekleidung der Öffnungsleibung des Deckenbauteils ist nur möglich, wenn die unterseitige Lage des Deckenbauteils aus massivem Holz besteht und ein Abfallen von Kohleschichten über die Branddauer nicht zu erwarten ist. Die sonstigen Ausführungsvarianten sind direkt von denen

¹ Bei der Prüfung von Abschottungen und Fugen in horizontalen Bauteilen ist eine Prüfung mit unterseitiger Beflammung ausreichend.

des Wandeinbaus übertragbar.

8.2.2 Fugenausführung

In [222] wurde eine Vielzahl von Brandversuchen ausgewertet, um Ausführungshinweise hinsichtlich Fugen zwischen Holzbauteilen in Abhängigkeit von der Ausführungsart und Fugenbreite geben zu können. Bei einer Fugenbreite ≤ 15 mm kann die Fuge mit Dichtungsstreifen, Schalldämmlagern oder Brandschutzmasse ausgefüllt werden. Zudem ist auf der Brandseite zusätzlich eine Verspachtelung, eine Bekleidung oder ein Verschluss mit Brandschutzdichtmasse notwendig. Fugen mit einer Breite ≤ 30 mm können mit nichtbrennbarer Mineralwolle verschlossen werden.

Da im Hinblick auf Wandbauteile im Einbauzustand nicht festgelegt werden kann, welche Seite der Wand vom Brand beansprucht wird, müsste die Maßnahme, die auf der Brandseite gefordert wird, beidseits ausgeführt werden.

Zusätzlich wurden im ersten Teil dieses Kapitels eigene Ergebnisse zu Untersuchungen an stumpf gestoßenen Fugen zwischen zwei Holzwandbauteilen mit unbekleideter Oberfläche und unbekleideter Öffnungsleibung vorgestellt.

Zur Ausbildung der Fuge zwischen Modul und Bauteilöffnung können auf Grund der Ergebnisse aus [222] und den eigenen bereits vorgestellten Ergebnissen (Abschnitt 8.1, [98]) folgende Empfehlungen ausgesprochen werden: Die Fuge sollte entweder komplett mit Mineralwolle (Schmelzpunkt ≥ 1000 °C verschlossen werden oder der innere Fugenbereich sollte mit Mineralwolle verfüllt und beidseits mit Brandschutzfüllmasse verschlossen werden. Durch das Stopfen der Mineralwolle sollte dabei eine Mindestdichte von $\geq 250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ herbeigeführt werden (vgl. [217]). Das Einbringen von Dämmstoffen oder Dichtstreifen, die über die Bauteilverbindung komprimiert werden, ist aufgrund der umlaufenden Fuge um die Module nicht möglich. Die Fugenbreite sollte ≤ 30 mm sein, jedoch 10 mm nicht unterschreiten, da sonst ein vollständiger Verschluss der Fuge je nach Bauteildicke nicht sichergestellt werden kann. Die Möglichkeit der Verwendung von Fugenschnüren auf Basis intumeszierender Materialien sollte weiter untersucht werden, da diese die Einbauzeit verkürzen könnte.

8.2.3 Befestigung der Module

Die Befestigung der Module an die umgebenden Bauteile soll kraftschlüssig erfolgen. In [98] wurden die Wandmodule beidseits mit je vier Schrauben im Wandbauteil befestigt. Die Schrauben wurden dabei jeweils horizontal und vertikal zentriert angeordnet und im Winkel von 45 Grad durch das Modul in die massive Holzkonstruktion bzw. das umlaufende Füllholz geführt. Diese Art der Befestigung hat sich als tauglich erwiesen. Eine weitere Möglichkeit stellt die Befestigung mit Stahlwinkeln bzw. Lochblechen dar. Diese wurde bisher nicht untersucht. Die notwendige Einbindetiefe der Schrauben sowie deren Dimension hängt von der Modulgröße und der daraus resultierenden Lastannahme (Gewicht von Modul + Schotts + Leitungen) ab. Diese Parameter können gemäß den eingeführten technischen Baubestimmungen bzw. allgemein anerkannten Regeln der Technik ermittelt werden. Die genannten Möglichkeiten zur Befestigung der Module sind in Abb. 8.10 schematisch dargestellt.

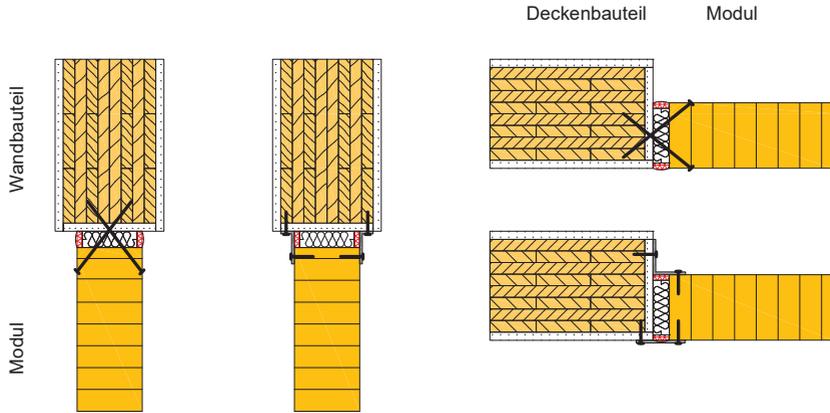


Abb. 8.10: Befestigung der Module an Wand- und Deckenbauteilen

8.3 Zwischenfazit

Die durchgeführten Versuche haben ergeben, dass sich sichere Fugenausbildungen durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien und Ausführungsvarianten erreichen lassen. Die betrachtete Versuchszeit in der hier vorgestellten Versuchsreihe (siehe Abschnitt 8.1) betrug 120 Minuten bei einer Bauteildicke und daraus hervorgehender Fugentiefe von 160 mm. Die kritische Temperatur, bei Anwendung der Kriterien nach DIN EN 1366-4 [194], wurde lediglich in drei Fällen überschritten. Diese Überschreitungen traten allerdings erst nach einer Versuchsdauer von 115 Minuten auf. Im Regelfall ist im mehrgeschossigen Holzbau das Erreichen einer Feuerwiderstandsdauer von 60 bzw. künftig auch 90 Minuten ausreichend, weshalb es lohnenswert erscheint die Variante des Fugenverschlusses mittels Fugenschnüren weiter zu betrachten. Diese können eine sichere Ausführung mit der Möglichkeit einer schnellen und einfachen Montage vereinen. Um für Rauchdichtheit zu sorgen, das Herausfallen der Schnüre zu verhindern bzw. Vandalismus vorzubeugen, können die Fugen mit Fugenschnüren nach Einbau der Schnüre zusätzlich mit Brandschutzfüllmasse verschlossen werden. Diese Schicht würde die zu erwartende Feuerwiderstandsdauer nochmals verlängern.

Zum Anschluss der Module an unterschiedliche Bauteile sind vergleichbare Anschlussbedingungen herzustellen. In Verbindung mit Hinweisen aus der Literatur zur Ausbildung von Öffnungsleibungen, wurden unterschiedliche Anschlussmöglichkeiten der Module an unterschiedliche Holzbauteile abgeleitet. Ebenfalls wurden Empfehlungen zur Ausführung des Fugenverschlusses sowie zur Befestigung der Module ausgesprochen.

9 Empfehlungen hinsichtlich Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile

Die in diesem Kapitel beschriebenen Empfehlungen sollen zur Gleichberechtigung des Holzbaus bei der Ausführung von Leitungsdurchführungen beitragen. Zum einen wird beschrieben wie klassifizierte Abschottungssysteme angewendet werden können, zum anderen werden Möglichkeiten zur Ausführung von Leitungsdurchführungen, die ohne klassifizierte Abschottungen auskommen, aufgezeigt.

Es werden Vorschläge formuliert, die durch Ergänzungen der MLAR [21] und der M-HFH HolzR [23] bzw. künftig der M HolzBauRL [28] die Regelungslücken an der Schnittstelle zwischen Konstruktion und technischer Gebäudeausrüstung schließen.

9.1 Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Leitungsdurchführung durch Holzbauteile

Soll die in dieser Arbeit beschriebene Methode zur Abschottung von Leitungsdurchführungen im Holzbau angewendet werden, ist an die Stelle der Leitungsdurchführung ein massives Holzmodul einzusetzen. Das Modul muss aus Brettschichtholz mit einer Abbrandrate $\leq 0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ bestehen. Abweichend kann auch ein Modul aus einem massivem Holzwerkstoff (z. B. Brettspertholz) verwendet werden, dessen Abbrandrate kleiner oder gleich der des in dieser Arbeit untersuchten Brettschichtholzes ist (siehe dazu Unterabschnitt 3.2.4). Zudem darf es nachweislich nicht zur Delamination verkohlter Schichten kommen.

Erfüllt ein Bauteilaufbau die Anforderungen, die an die Module gestellt werden, kann auf den Einbau des Moduls abweichend verzichtet werden. Dieser Fall ist besonders vorteilhaft zu bewerten, da keine Fuge zwischen Modul und Bauteil entsteht.

Abhängig von der Feuerwiderstandsdauer des durchdrungenen Bauteils muss das Modul eine Mindestdicke von 90 mm für feuerhemmende Bauteile, 120 mm für hochfeuerhemmende Bauteile und 160 mm für Bauteile, die dem Feuer 90 Minuten Widerstand leisten, aufweisen. Ist die Dicke des durchdrungenen Bauteils größer als die genannten Maße, ist die Öffnungsleibung ausreichend lang vor einer Brandbeanspruchung zu schützen. Siehe dazu Unterabschnitt 8.2.1. Sollte die Moduldicke größer sein als die der Konstruktion, ist der Querschnitt des durchdrungenen Bauteils um den Öffnungsbereich zu erhöhen, sodass die offenen Seiten des Moduls ausreichend lange vor einer Brandbeanspruchung geschützt werden.

Zwischen den Öffnungen unterschiedlicher klassifizierter Abschottungen ist ein Mindestabstand von 60 mm bei einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten bzw. von 120 mm bei einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten einzuhalten, sofern ein geringerer Abstand nicht durch eine Brandprüfung bestätigt wurde. Zwischen Öffnungen zur Durchführung von Leitungen und dem Modulrand ist ein Abstand von mindestens 30 mm bei einem Feuerwiderstand des Bauteils von 30 Minuten und ein Abstand von mindestens 60 mm bei einem Feuerwiderstand des Bauteils von 90 Minuten einzuhalten. Tabelle 9.1 fasst die beschriebenen Maße zusammen.

Die Fuge zwischen Modul und Bauteil kann wie in Unterabschnitt 8.2.2 beschrieben ausgeführt werden. Die Befestigung des Moduls im Bauteil kann gemäß Unterabschnitt 8.2.3 erfolgen. Die beschriebene Vorgehensweise ist in Abb. 9.1 dargestellt. Im weiteren Vorgehen ist zwischen Lei-

Tab. 9.1: Zusammenfassung der erforderlichen Mindestmoduldicken, einzuhaltende Abständen zum Modulrand sowie Abständen zwischen klassifizierten Abschottungen

Feuerwiderstandsdauer	Mindestmoduldicke	Mindestabstand zwischen Öffnungen für klassifizierte Abschottungen a	Mindestabstand zum Modulrand r
30 Minuten	90 mm	60 mm	30 mm
60 Minuten	120 mm	120 mm	60 mm
90 Minuten	160 mm	120 mm	60 mm
Fundort	S.137	S.136	S.136

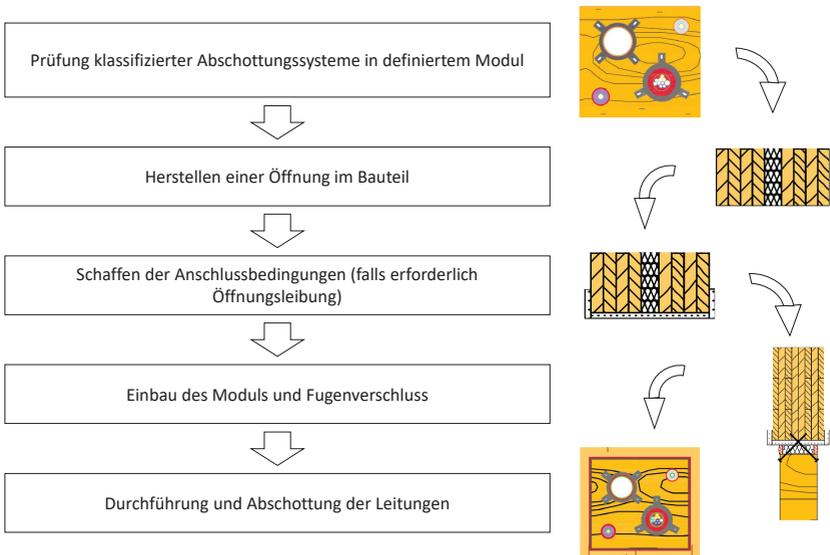


Abb. 9.1: Vorgehensweise zur Abschottungen von Leitungen in Holzbauteilen mit der Methode Holz-in-Holz

tungen, die einer klassifizierten Abschottung bedürfen, und Leitungen, die nach den Regeln aus Abschnitt 7.1 dieser Arbeit abgeschottet werden können, zu unterscheiden.

9.1.1 Anwendung klassifizierter Abschottungssysteme im Holzbau

Hinsichtlich klassifizierter Abschottungssysteme sind Kombi- und Mehrfachabschottungssysteme und Einzelabschottungssysteme zu unterscheiden. Als sinnvoll ist vor allem der Einbau von Einzelabschottungen in den Holzmodulen zu beurteilen. Auch der Einbau von Mehrfach- und Kombiabschottungen ist möglich. Es ist allerdings fraglich, ob der Einbau innerhalb des Holzmoduls den Aufwand im Vergleich zur Ausbildung einer klassifizierten Öffnungsleibung tatsächlich reduziert. Für die Anwendung von Kombiabschottungen und Mehrfachabschottungen in klassifizierten Öffnungsleibungen sollten die Hinweise aus [35], [36] und [26] beachtet werden.

Im Allgemeinen sind die Abschottungen bzw. Abschottungssysteme, die in den Modulen angewendet werden sollen, zuvor innerhalb der Module in Brandversuchen zu prüfen. Die Prüfung soll nach den Vorgaben der DIN EN 1366-3 [131] durchgeführt werden. Ist die Prüfung positiv abgeschlossen, kann die Bauartgenehmigung der Systeme um den Einbau in Holzmodule mit definierten Eigenschaften zur Abschottung (siehe dazu Unterabschnitt 9.2.1) erweitert werden. Klassifizierte Abschottungssysteme, die in einem Holzmodul die Feuerwiderstandsprüfung bestanden haben, können ebenfalls in gleichartigen Modulen mit größeren Dicken sowie Modulen mit vorteilhafteren Eigenschaften (geringere Abbrandrate, kein Abfallen verkohlter Schichten) angewendet werden. Somit können die Produkte innerhalb von Holzmodulen in beliebigen Holzwand- und Deckenbauteilen angewendet werden.

Allgemein wird zur Anwendung von klassifizierten Abschottungssystemen in Holzbauteilen darauf hingewiesen, dass Hohlräume im Bauteilquerschnitt vermieden werden sollten (vgl. Abschnitt 6.2). Ringspalte sollten daher dicht über die volle Bauteiltiefe verschlossen werden. Durch die Verwendung intumeszierender Materialien können vorhandene und entstehende Hohlräume verschlossen werden. Werden Abschottungssysteme mit Schrauben befestigt, sollten diese mindestens 10 mm in den unbeanspruchten Holzquerschnitt eindringen [98]. Diese Tiefe kann mit Hilfe der Abbrandrate aus Eurocode 5-1-2 [39] bestimmt werden.

9.1.2 Durchführungen einzelner Leitungen ohne klassifizierte Abschottungssysteme

In Abschnitt 7.1 wurden Durchführungen einzelner Leitungen untersucht und festgestellt, welche Dichtmaterialien sich zur Abdichtung unterschiedlicher Leitungen eignen. Weiterhin wurden notwendige minimale und maximale Ringspaltabmessungen betrachtet. In Abschnitt 7.4 wurden Abstände zwischen Leitungsdurchführungen am kritischen Fall von Kupferrohren untersucht und notwendige Mindestabstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung in Abhängigkeit von der Bauteildicke und der Beanspruchungszeit eruiert.

Temperaturerhöhungen auf den Leitungen sind bei der Durchführung durch Holzbauteile im Vergleich zu Durchführungen durch Beton zunächst als kritischer zu beurteilen, liegen jedoch in einem ähnlichen Temperaturbereich. Die Temperaturen auf den Leitungen, die bei der Durchführung von Leitungen durch Betonbauteile erreicht werden, wenn die Regelungen der gültigen MLAR beachtet werden, liegen ebenfalls deutlich über der Grenztemperatur von 180 K, die zur Beurteilung des Wärmedämmkriteriums nach DIN EN 1366-3 [131] herangezogen wird. Bei den Versuchen aus Abschnitt 7.3 wurden keine Flammen auf der unbeflammten Seite des Prüfkörpers beobachtet.

Die Durchführung von Leitungen durch massive Holzbauteile ist daher nicht als kritischer zu betrachten als die Durchführung durch Betonbauteile, sofern sichergestellt ist, dass ein ausreichend dicker Restquerschnitt zwischen den Leitungen verbleibt. Durch die Einhaltung der in Abschnitt 7.4 ermittelten Mindestabstände zwischen Bohrungen kann dies sichergestellt werden. Da die Verwendung eines Dichtmaterials im Ringspalt um eine Leitung den Abbrand des

umliegenden Holzes zusätzlich einschränkt, sind die ermittelten Mindestabstände, die zwischen Bohrungen einzuhalten sind, auch für Leitungen in Bohrungen mit durchgehend verschlossenem Ringspalt ausreichend. Die Eignung verschiedener Dichtmaterialien für unterschiedliche Leitungsarten wurden in Abschnitt 7.1 nachgewiesen. Es können daher Leitungen entsprechend der in der MLAR vorgegebenen Durchmesser auch durch vertikal angeordnete massive Holzbauteile (wie in Unterabschnitt 9.1.1 beschrieben) geführt werden.

Durch massive Holzbauteile entsprechend Unterabschnitt 9.1.1 mit

- 30 Minuten Feuerwiderstand
 - einzelne elektrische Leitungen sowie einzelne dichtgepackte Kabelbündel bis 50 mm Durchmesser und
 - Rohrleitungen aus nichtbrennbaren Baustoffen - auch mit brennbaren Rohrbeschichtungen bis 2 mm Dicke
- 30, 60 und 90 Minuten Feuerwiderstand
 - einzelne elektrische Leitungen
 - Rohrleitungen mit einem Außendurchmesser bis 160 mm aus nichtbrennbaren Baustoffen - ausgenommen Aluminium und Glas -, auch mit Beschichtung aus brennbaren Baustoffen bis zu 2 mm Dicke,
 - Rohrleitungen für nichtbrennbare Medien und Installationsrohre für elektrische Leitungen mit einem Außendurchmesser bis 32 mm aus brennbaren Baustoffen, Aluminium oder Glas.

Dabei sind in Abhängigkeit von der Leitungsart folgende Dichtmaterialien zu verwenden:

- Bei einer Feuerwiderstandsanforderung von 30 Minuten ist für Ringspalte um Kabel, Kabelbündel und nichtbrennbare Rohre zur Abdichtung Steinwolle oder Brandschutzfüllmasse (carbonisierend) zu verwenden.
- Ringspalte brennbarer Rohrleitungen sind mit intumeszierender Füllmasse abzudichten.
- Bei einer Feuerwiderstandsanforderung von 60 oder 90 Minuten ist zur Abdichtung von Ringspalten um nichtbrennbaren Rohrleitungen Steinwolle (Schmelzpunkt ≥ 1000 °C) oder Brandschutzfüllmasse (carbonisierend) zu verwenden.
- Bei einer Feuerwiderstandsanforderung von 60 oder 90 Minuten ist zur Abdichtung von Ringspalten um Einzelkabel Brandschutzfüllmasse (carbonisierend) zu verwenden.

Tabelle 9.2 fasst die zu verwendenden Dichtmaterialien in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer und von der Leitungsart zusammen.

Tab. 9.2: Vorgaben hinsichtlich zu verwendender Dichtmaterialien bei Einzelleitungsdurchführungen

Feuerwiderstandsdauer	Leitung	Intumeszenzmaterial	Brandschutzacryl	Steinwolle
30 Minuten	n. b. Rohre $\varnothing \leq 160$ mm		X	X
	Einzelkabel		X	X
	Kabelbündel $\varnothing \leq 50$ mm		X	X
90 Minuten	n. b. Rohre $\varnothing \leq 160$ mm		X	X
	Einzelkabel		X	
	Rohr aus b. B. $\varnothing \leq 32$ mm	X		

Weiterhin sind folgende Angaben zu Ringspaltabmessungen (umlaufend) zu berücksichtigen:

- Bei einer Feuerwiderstandsfähigkeit des Bauteils von 30 Minuten muss der Ringspalt mindestens 10 mm breit sein. Abweichend ist ein Ringspalt von 5 mm bei der Durchführung von Kabeln und Kabelbündeln ausreichend. Die maximale Ringspaltabmessung darf 50 mm nicht überschreiten.
- Der Ringspalt bei der Durchführung brennbarer Rohrleitungen mit einem Durchmesser > 17 mm und ≤ 17 mm muss eine Mindestbreite von 5 mm aufweisen. Die maximale Ringspaltabmessung beträgt 15 mm.
- Die Ringspaltabmessungen um nichtbrennbare Rohrleitungen müssen bei einer Feuerwiderstandsdauer von 60 oder 90 Minuten bei Verwendung von Brandschutzfüllmasse mindestens 15 mm, bei Verwendung von Steinwolle mindestens 20 mm betragen. Die maximale Ringspaltabmessung beträgt 50 mm.
- Der Ringspalt um einzelne Kabel muss bei einer Feuerwiderstandsdauer von 60 oder 90 Minuten mindestens 10 mm groß sein. Die maximale Ringspaltabmessung beträgt 50 mm.

Tabelle 9.3 fasst die Vorgaben hinsichtlich der Ringspaltabmessungen in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer, der Leitungsart und des verwendeten Dichtmaterials zusammen.

Die Ringspalte sind in jedem Fall über den gesamten Bauteilquerschnitt zu verschließen. Bei Rohrleitungen mit brennbarer Dämmung ist diese im Inneren des Bauteils sowie beidseits des Bauteils auf einer Länge von 500 mm durch Dämmung aus nichtbrennbaren Baustoffen zu ersetzen. Der Ringspalt um die Dämmung ist mit einem der bereits genannten Dichtmaterialien zu verschließen. Bei Verwendung von gestopfter Steinwolle sollte der Ringspalt oberflächlich zusätzlich mit einer Brandschutzfüllmasse verschlossen werden. Dies verhindert zum einen Rauchdurchtritt, zum anderen stellt dieser Verschluss sicher, dass die Mineralwolle über lange Zeit und im Brandfall in der Öffnung verbleibt.

Voraussetzung für diese Herangehensweise ist, dass zur Abdichtung von Leitungen nur Materialien verwendet werden, die an der Öffnungsleibung anliegen, bei Wärmeeintrag keine Spalte entstehen lassen (nicht schwinden) und nicht verbrennen. Dadurch wird dafür gesorgt, dass in den Ringspalt keine Brandgase eindringen können und der Abbrand im Vergleich zum Eintrag durch das Kupferrohr sich nicht erhöht. Dichtmaterialien die verwendet werden sollen, müssen

Tab. 9.3: Zusammenfassung der Vorgaben hinsichtlich der Ringspaltabmessungen

Feuerwiderstandsdauer	Leitung	Mindestring-spaltabmessung in mm ¹⁾	Besonderheit	Maximale Ringspaltabmessung in mm ¹⁾
30 Minuten	n. b. Rohr $\varnothing \leq 160$ mm	≥ 10 mm		≤ 50 mm
	Einzelkabel	≥ 10 mm	≥ 5 mm bei Verwendung von Intumeszenzmaterial	≤ 50 mm
	Kabelbündel $\varnothing \leq 50$ mm	≥ 10 mm	≥ 5 mm bei Verwendung von Intumeszenzmaterial	≤ 50 mm
90 Minuten	n. b. Rohr $\varnothing \leq 160$ mm	≥ 15 mm bei Verwendung von Brandschutzacryl, ≥ 20 mm bei Verwendung von Steinwolle		≤ 50 mm
	Einzelkabel	≥ 10 mm		≤ 50 mm
	Rohr aus b. B. $\varnothing \leq 17$ mm	kein Mindestmaß		≤ 15 mm
	Rohr aus b. B. $\varnothing \leq 32$ mm	≥ 5 mm		≤ 15 mm

¹⁾ Umlaufend einzuhalten

für die Verwendung in Verbindung mit Holzbauteilen geeignet bzw. zugelassen sein. Dies ist beispielsweise wichtig, um einen Flankenabriss beim Trocknungsprozess von Dichtmitteln zu verhindern. Steinwolle, die verwendet werden soll, muss eine Schmelztemperatur von mehr als 1000 °C aufweisen.

Zwischen den Bohrungen zur Durchführung einzelner Leitungen ist ein Abstand einzuhalten, der mindestens dem größeren Durchmesser der benachbarten Bohrung entspricht. Weiterhin ist zwischen Bohrungen in der

- Moduldicke 90 mm bei 30 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 40 mm,
- Moduldicke 120 mm bei 60 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 60 mm sowie
- Moduldicke 160 mm bei 90 Minuten Beanspruchung ein notwendiger Mindestabstand von 70 mm einzuhalten.

9.1 Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Leitungsdurchführung durch Holzbauteile

Tabelle 9.4 gibt eine Übersicht über die Vorgaben zu Abständen zwischen Bohrungen zur Einzelleitungsdurchführung.

Tab. 9.4: Zusammenfassung der Vorgaben hinsichtlich Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung in Abhängigkeit der Feuerwiderstandsfähigkeit bzw. der Moduldicke

Feuerwiderstandsdauer	Mindestmoduldicke	Mindestabstand zwischen Bohrungen für Einzelleitungsdurchführungen d
30 Minuten	90 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 40 mm
60 Minuten	120 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 60 mm
90 Minuten	160 mm	einfacher Leitungsdurchmesser, mindestens aber 70 mm

Abbildung 9.2 stellt die in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels beschriebenen Maße hinsichtlich der Moduldicke und der Abstände zum Modulrand bzw. zwischen Bohrungen dar.

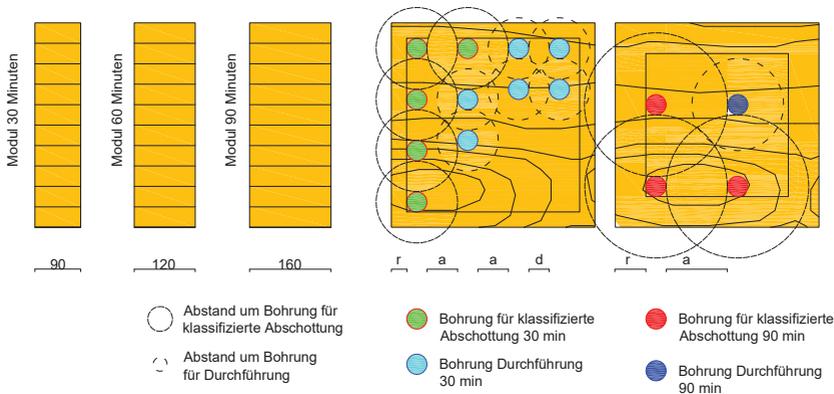


Abb. 9.2: Darstellung einzuhaltender Abstände und Moduldicken (Wiederholung von Abb. 7.35)

Durchführungen einzelner Leitungen durch horizontal angeordnete Bauteile (Decken) wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Befüllungssituation und dem durch die Wirkung der Schwerkraft begünstigten Abfallen von Kohle oder anderen Bestandteilen, können die Ergebnisse nicht direkt übertragen werden. Es sind Untersuchungen entsprechend Abschnitt 7.1 auch für horizontal angeordnete Module durchzuführen, um die Erleichterungen auch für Deckenbauteile anwenden zu können.

9.1.3 Unterschiede zu Abschottungen in Bauteilen aus herkömmlichen Baustoffen

Für die Anwendung von Dichtmaterialien zur Abdichtung von Leitungsdurchführungen sowie für die Anwendung von Abschottungen in Holzbauteilen, im Vergleich zur Anwendung in Bauteilen aus herkömmlichen Baustoffen, lassen sich einige besonders relevante Punkte herausstellen. Durch die Brennbarkeit des Bauteils vermindert sich die Dicke des durchdrungenen Bauteils im Brandfall. Durch die Querschnittsminderung verschiebt sich die beflamnte Oberfläche in Richtung unbeflammter Seite. Dies resultiert in einer kürzeren Strecke auf der die Temperatur der Leitungen durch Wärmeübertragung an den Bauteilquerschnitt gesenkt werden kann. Weiterhin hat Holz im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen zur Herstellung massiver Bauteile, die im Bereich von Leitungsdurchführungen verwendet werden, eine geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Dies führt ebenfalls zu einer geringeren Absenkung der Temperatur der Leitung im Bauteilquerschnitt. Sollen Abschottungen in Holzbauteilen eingesetzt werden, die sich nicht über den vollen Bauteilquerschnitt erstrecken, ist zu bedenken, dass Schichten dieser Abschottungen mit der Zeit hinterbrannt werden können und somit unwirksam werden. Dies ist mit entsprechenden Maßnahmen zu kompensieren bzw. zu verhindern. Durch den Abbrand des Holzes können sich zudem Befestigungsmittel von Abschottungen lösen. Die Befestigungsmittel müssen daher ausreichend lang dimensioniert werden, sodass sie bis ins unverbrannte Restholz hineinragen. Bei einer Überdimensionierung der Länge der Befestigungsmittel, kann dies bei vertikalen Bauteilen zu einer Erhitzung der Befestigungsmittel auf der Kaltseite führen, sobald diese auf der beflamnten Seite durch den Brand beansprucht werden. Holz ist ein natürlich gewachsener Baustoff und aus diesem Grund hinsichtlich seiner Eigenschaften inhomogen. Unstetigkeitsstellen im Material können zu unterschiedlichen Verhalten im Brandfall führen. Dies muss mit entsprechenden Sicherheiten berücksichtigt werden. Die Inhomogenität und die naturgebende Einschränkung hinsichtlich der Dimensionen von Holzbauteilen kann jedoch durch die Verwendung industriell produzierter Holzwerkstoffe deutlich eingeschränkt werden. An dieser Stelle ist das Verhalten im Brandfall der unterschiedlichen Leime, die für die Herstellung von Holzwerkstoffen eingesetzt werden, zu berücksichtigen. Die hygroskopischen Eigenschaften von Holz führen zu Schwinden und Quellen der Bauteile in Abhängigkeit von der Umgebungsluftfeuchte. Dies kann zur Bildung von Spalten an der Schnittstelle zwischen Holz und Dichtmaterialien führen. Durch Verwendung von an den Holzbau angepasster Produkte mit einer ausreichenden Bewegungsfähigkeit, kann dem begegnet werden.

9.2 Implementierung der Methode Holz-in-Holz in Technische Baubestimmungen

Leitungsdurchführung durch Holzbauteile stellen aus brandschutztechnischer Sicht eine Schnittstelle zwischen der MLAR und der M-HFH HolzR dar. Aus diesem Grund soll die Anwendung der Methode Holz-in-Holz durch verknüpfende Ergänzungen in diesen beiden Technischen Baubestimmungen ermöglicht werden.

9.2.1 Ergänzung der Leitungsanlagenrichtlinie

Einfügen eines neuen Punktes 4.1.3:

4.1.3 Sollen Leitungen durch Holzbauteile mit Anforderungen an den Feuerwiderstand geführt werden, kann an der Stelle der Leitungsdurchführung ein massives Bauteil aus Holzwerkstoffen eingesetzt werden. Die Abbrandrate der verwendeten Holzwerkstoffe muss kleiner als oder gleich $0,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ sein und es muss nachgewiesen sein, dass im Brandfall ein Abfallen verkohlter Schichten nicht auftritt. Die Bauteile müssen eine Dicke von mindestens

- 90 mm bei Bauteilen, die feuerhemmend sein müssen,
- 120 mm bei Bauteilen, die hochfeuerhemmend sein müssen, sowie
- 160 mm bei feuerbeständigen¹ Bauteilen aufweisen.

Innerhalb dieser Bauteile können Leitungen mit klassifizierten Abschottungen abgeschottet werden, wenn für diese ein entsprechender bauaufsichtlicher Anwendbarkeitsnachweis vorliegt, der den Einbau der Abschlüsse in massive Bauteile aus Holzwerkstoffen nach 4.1.3 MLAR regelt.

Ergänzung des aktuellen Punktes 4.1.3 (dann 4.1.4) um folgenden Zusatz:

Zwischen den Öffnungen in massiven Holzbauteilen nach 4.1.3, die mit Abschottungen verschlossen werden, ist bei einer Feuerwiderstandsdauer des Bauteils von 30 Minuten ein Abstand von 60 mm und bei einer Feuerwiderstandsdauer von 60 und 90 Minuten ein Abstand von 120 mm einzuhalten.² Öffnungen für Leitungsdurchführungen müssen in Modulen mit der Dicke 90 mm einen Abstand von mindestens 30 mm zum Modulrand aufweisen. In Modulen mit der Dicke 120 mm und 160 mm ist ein Abstand von 60 mm zum Modulrand einzuhalten.

Ergänzung eines Punktes 4.4

4.4 Erleichterungen bei der Durchführung einzelner Leitungen durch massive Holzbauteile nach 4.1.3.

¹ gemäß § 26 MBO abweichend aus brennbaren Baustoffen möglich

² Dass abweichende Angaben im Anwendbarkeitsnachweis Vorrang haben, ist im bestehenden Text bereits geregelt.

9 Empfehlungen hinsichtlich Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile

Abweichend von Abschnitt 4.1 dürfen durch vertikal angeordnete massive Holzbauteile nach 4.1.3,

- a) die in Bauteile mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten eingesetzt sind - ausgenommen solche notwendiger Treppenräume und Räume zwischen notwendigen Treppenräumen und den Ausgängen ins Freie -
 - einzelne elektrische Leitungen sowie einzelne dichtgepackte Kabelbündel bis 50 mm Durchmesser und
 - Rohrleitungen aus nichtbrennbaren Baustoffen - auch mit brennbaren Rohrbeschichtungen bis 2 mm Dicke
- b) die in Bauteile eingesetzt sind einzelne
 - elektrische Leitungen
 - Rohrleitungen mit einem Außendurchmesser bis 160 mm aus nichtbrennbaren Baustoffen - ausgenommen Aluminium und Glas -, auch mit Beschichtung aus brennbaren Baustoffen bis zu 2 mm Dicke,
 - Rohrleitungen für nichtbrennbare Medien und Installationsrohre für elektrische Leitungen mit einem Außendurchmesser bis 32 mm aus brennbaren Baustoffen, Aluminium oder Glas

durch eigene Bohrungen geführt werden, wenn der Ringspalt

- bei Bauteilen gemäß a) und um Rohrleitungen in Bauteilen nach b) mit Steinwolle (Schmelzpunkt $> 1000\text{ °C}$) oder carbonisierender Brandschutzfüllmasse,
- um brennbare Rohrleitungen mit intumeszierender Dichtmasse,
- um Einzelkabel in Bauteilen nach b) mit carbonisierender Brandschutzfüllmasse

verschlossen wird, sowie die Abmessungen des Ringspalts

- um Leitungen in Bauteilen nach a) zwischen 10 mm und 50 mm bzw. bei der Abdichtung von Kabeln und Kabelbündeln zwischen 5 mm und 50 mm,
- um brennbare Rohrleitungen zwischen 5 mm und 15 mm,
- um nichtbrennbare Rohrleitungen in Bauteilen nach b) zwischen 15 mm bei Verwendung von carbonisierender Brandschutzfüllmasse bzw. 20 mm bei Verwendung von Steinwolle und 50 mm,
- um Einzelkabel in Bauteilen nach b) zwischen 10 mm und 50 mm

betragen.

Zwischen den Bohrkanten der einzelnen Bohrungen ist jeweils ein Abstand in der Größe des Maximalwertes des jeweiligen Durchmessers bzw. ein Mindestabstand von

- 40 mm bei Bauteilen nach 4.1.3 mit der Dicke 90 mm,
- 60 mm bei Bauteilen nach 4.1.3 mit der Dicke 120 mm und
- 70 mm bei Bauteilen nach 4.1.3 mit der Dicke 160 mm

einzuhalten.

9.2.2 Ergänzung der MHolzBauRL

Ergänzung des Punktes 3.5 um:

Wird eine Öffnung in einem Bauteil in massiver Holzbauweise hergestellt, um ein massives Bauteil nach Punkt 4.1.3 der MLAR einzusetzen, kann die Brandschutzbekleidung der Öffnungsleibung vereinfachend mit einer Lage nichtbrennbarer feuerhemmender Brandschutzbekleidung versehen werden. Umlaufend um die Öffnung ist ein mindestens 50 mm breiter Kragen aus derselben Bekleidung vorzusehen, der die Fuge zwischen Bekleidung und Bauteilquerschnitt bedeckt. Alternativ kann die Fläche unter der Bekleidung mit einem Brandschutzanstrich versehen werden.

Die Befestigung des Bauteils nach Punkt 4.1.3 MLAR hat kraftschlüssig zu erfolgen. Die ausreichende Tragfähigkeit der Verbindung ist im Einzelfall nachzuweisen. Die Fuge zwischen der Brandschutzbekleidung und dem massiven Holzbauteil nach MLAR ist mit Mineralwolle zu verstopfen (Mindeststopfdichte $250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) und oberflächlich rauchdicht mit Brandschutzfüllmasse zu verschließen.

10 Schluss

10.1 Zusammenfassung

Das Problem fehlender, auf den Holzbau zugeschnittener, Regelungen zur Abschottung von Leitungsdurchführungen ist auf die langjährige Einschränkung des geregelt möglichen Holzbaus auf die Gebäudeklassen 3 bzw. 4 zurückzuführen. Mangels Erforderlichkeit wurde eine angepasste Lösung nicht angestrebt. Zur heutigen Zeit, in der der Anteil des Holzbaus zunimmt und dieser in allen Gebäudeklassen Einzug erhält, ergibt sich die Notwendigkeit einer angepassten Detaillösung zur Leitungsabschottung in Holzbauteilen. Schwierigkeiten bei der Anwendung von Leitungsabschottungen in Holzbauteilen ergeben sich durch die Diversität unterschiedlicher Abschottungsprodukte sowie Holzwand- und Deckenbauteilen. In Kombination führt dies zu einer unsteten Schnittstelle. Durch die Anwendung von Abschottungen in definierten Holzmodulen kann diese Schnittstelle verstetigt und somit verallgemeinert werden. Der Prüfaufwand zur Anwendung von Abschottungssystemen in Holzbauteilen kann deutlich reduziert werden.

In den Kapiteln 2, 3 und 4 der Arbeit wurden die erforderlichen Grundlagen für den Themenkomplex Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile dargelegt. Aufbauend darauf, wurden in Kapitel 5 theoretische alternative Lösungsansätze diskutiert. Davon konnte ein Ansatz als derzeit umsetzbar identifiziert werden. Folgend wurde die Anwendbarkeit dieses Ansatzes anhand der Ergebnisse des Forschungsprojekts LeitHolz [98] bestätigt. Folgend wurden vertiefende Untersuchungen hinsichtlich der Durchführung einzelner Leitungen angestellt. Zunächst wurden für die Abdichtung von Ringspalten um Leitungen in Holzbauteilen geeignete Dichtmaterialien identifiziert. Anschließend wurde mittels Finite Element Simulationen ein geeignetes Modell identifiziert und an einer Versuchsreihe validiert. Anhand des Modells wurden notwendige Abstände zwischen Bohrungen zur Leitungsdurchführung identifiziert sowie das Verhalten von metallischen Leitungen, durchgeführt durch Holzbauteile, hinsichtlich deren Oberflächentemperaturen und des Abbrands um die Leitungen untersucht. Letztlich wurde der Anschluss von definierten Holzmodulen, welche für die neu erdachte Methode zur Leitungsabschottung essenziell sind, an die umgebenden Holzbauteile betrachtet.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnte eine Vorgehensweise sowohl zur Anwendung von klassifizierten Abschottungen in Holzbauteilen als auch zur Durchführung einzelner Leitungen durch massive Holzbauteile mit definierten Eigenschaften vorgeschlagen werden. Dieser Vorschlag kann, wie in Abschnitt 9.2 beschrieben, in aktuell geltende eingeführte Technische Bau Bestimmungen integriert werden.

Der Baustoff Holz beeinflusst die Leistungsfähigkeit darin eingebauter Abschottungen vor allem durch seine Brennbarkeit und die damit verbundene Reduzierung des Bauteilquerschnitts bei Brandbeanspruchung sowie durch seine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen. Dies führt teils zu höheren Temperaturen auf der Leitungsoberfläche auf der feuerabgewandten Seite eines Bauteils. Die Temperatur auf der Bauteilfläche profitiert dagegen von dieser Eigenschaft und ist bei gleichen Bauteilquerschnitt deutlich geringer als beispielsweise bei Betonbauteilen, die von Leitungen durchdrungen werden. Die Temperaturerhöhung im Bauteilquerschnitt durch durchgeführte Leitungen ist stark auf den Bereich um die jeweilige Leitung beschränkt. Im Bereich um die Leitungen wird der Querschnitt jedoch durch zusätzlichen Abbrand geschwächt.

10.2 Limitationen

Zur Durchführung der Brandversuche, die die Anwendbarkeit der Methode bestätigten, mussten Produkte ausgewählt werden. Die Ergebnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit einzelner getesteter Produkte lassen sich nicht auf alle am Markt zu findenden Produkte übertragen. Eine Prüfung von Abschottungssystemen zur Anwendung innerhalb der Module ist und bleibt daher in jedem Fall erforderlich. Bei einigen Systemen können veränderte Einbaubedingungen im Unterschied zum Einbau in Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen maßgebend werden, um deren Leistungsfähigkeit auch innerhalb der definierten Holzmodule zu ermöglichen. Da die Abschottungssysteme aber dennoch im Allgemeinen auf den grundlegend gleichen Wirkmechanismen beruhen ist anzunehmen, dass bei einer Vielzahl der Systeme der Einbau in Holzmodule ohne deutliche Anpassungen möglich ist.

Auch für Untersuchungen von Einzelleitungsdurchführungen wurden in dieser Arbeit herstellereigenspezifische Produkte sowie ausgewählte Leitungen verwendet. Die Ergebnisse können daher nicht ohne Weiteres auf alle anderen Produkte übertragen werden. Chemische Zusammensetzungen der Produkte und deren damit verknüpft Verhalten im Brandfall können deutlich unterschiedlich sein. Allgemeine Hinweise zur Verwendung von Produkten zur Abdichtung des Raums um einzelne Leitungen sind allerdings bereits heute in der MLAR enthalten. Es ist daher gelebte Praxis Produkte für diese vereinfacht nachzuweisenden Durchführungen zuzulassen, bei denen das Verhalten in Kombination mit den jeweiligen Leitungen im Einzelfall nicht bekannt ist. Die Durchführung weiterer stichprobenartiger Versuche mit unterschiedlichen Materialien zur Bestätigung ist allerdings anzustreben.

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht nicht die Dauerhaftigkeit der untersuchten Maßnahmen in Kombination mit dem Baustoff Holz hervor. Durch Schwinden und Quellen des Holzes in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte können sich Risse bilden und Dichtmaterialien können ihre Haftung an die jeweilige Oberfläche verlieren. Das Material Gips, welches sich in Versuchen zur Abdichtung von Ringspalten eignete, wurde aus diesem Grund nicht empfohlen. Risse und Spalte infolge des Trocknungsprozesses waren bereits nach kurzer Zeit sichtbar. Der Einbau der Module in Deckenkonstruktionen wurde nicht in Versuchen nachgewiesen. Vor der breiten Anwendung sollte auch dieser Anschluss in Brandversuchen bestätigt werden. Aufgrund der normativ vorgegebenen Brandbeanspruchung in Brandversuchen ist die Einwirkung auf die horizontal angeordneten Bauteile allerdings vergleichbar mit der Beanspruchung von Wandbauteilen nach der gleichen Temperaturzeitkurve. Unterschiede könnten sich allerdings durch die verschiedentliche Ausrichtung hinsichtlich der Delamination verkohlter Schichten bzw. generell dem Abfallen von Bestandteilen ergeben. Da bei Durchführungen nach den Erleichterungen nach MLAR keine gesonderte Prüfung notwendig ist, wurden an dieser Stelle die Ergebnisse nicht auf die Anwendung in Deckenbauteilen erweitert.

10.3 Ausblick

Im Kapitel 2 wurden kürzliche und in naher Zukunft anstehende bauordnungsrechtliche Novellen vorgestellt. Diese verändern die geltenden gesetzlichen Regelungen in einer für den Holzbau positiven Weise. Es ist daher eher mit einem steigenden Anteil des Holzbaus zu rechnen. Weiterhin ermöglichen die neuen Gegebenheiten das geregelte Bauen mit Holz in Gebäuden mit größerer Geschossigkeit. Aus in dieser Arbeit beschriebenen vielfältigen Gründen (vgl. Unterabschnitt 5.2.1) sollte die Methode Holz-in-Holz zum Standardverfahren bei der Anwendung von Abschottungssystemen in Holzbauteilen werden. Vor allem ist der verminderte Prüfaufwand im Vergleich zu Einzelprüfungen der Systeme in speziellen Holzbauteilaufbauten zu nennen. Die Übertragung vorhandener Prüfergebnisse von Zulassungsprüfungen von Abschottungssystemen in Bauteilen aus herkömmlichen Baustoffen auf Holzbauteile ist derzeit nicht möglich. Auch in Zukunft ist dieser Ansatz nur schwer denkbar. Eine Möglichkeit zur Extrapolation ergibt sich

allerdings durch Inversion des Ansatzes. Die Übertragung von Prüfergebnissen in Holzbauteilen auf Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen ist mit zunehmender Prüferfahrung denkbar.

Nach weiteren Untersuchungen an einzelnen Leitungsdurchführungen mit unterschiedlichen Dichtmaterialien verschiedener Hersteller in Wand- und Deckenbauteilen bzw. eines Eignungsnachweises für die Anwendung im Holzbau, können eine Vielzahl von Leitungsdurchführungen ohne die Anwendung klassifizierter Abschottungssysteme hergestellt werden. Auf Grundlage von Versuchen hinsichtlich der notwendigen Abstände zwischen Bohrungen unter Einbezug der verwendeten Dichtmaterialien können in Zukunft differenziertere Abstandsregelungen eingeführt werden. Es ist zu erwarten, dass teils deutlich kleinere Abstände zwischen den Bohrungen als ausreichend bewertet werden können. Zudem ist nach Bestätigung des standardisierten Anschlusses der Module an Deckenbauteile der Einsatz beliebiger Abschottungssysteme, deren Anwendung in definierten massiven Holzmodulen zugelassen ist, in allen Holzwand- und Deckenbauteilen möglich.

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Simulationen können weiterführend hilfreich sein, um auch Simulationen bezüglich klassifizierter Systeme durchzuführen. Beispielsweise sind Simulationen von Abschottungen mit Rohrschalen mit geringfügigen Modifikationen im Modell denkbar. Solche Simulationen können für Hersteller nützlich sein, um Versuchsaufbauten zur Prüfung besser planen zu können. In Zukunft sind auch Simulationsergebnisse anstelle von Brandprüfungen zur Erweiterung des Anwendungsbereichs von Produkten denkbar.

Literatur

- [1] Meske-Dallal, Sabine. *Erläuterungen zu den Begriffen im Bereich feuerwiderstandsfähiger Abschottungen*. Hrsg. von Deutsches Institut für Bautechnik. Berlin, 1.02.2018. URL: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Newsletter/2018_01.pdf (besucht am 04.02.2019).
- [2] Bauministerkonferenz. *Musterbauordnung*. MBO. 2002, zuletzt geändert 22.02.2019.
- [3] Europäisches Parlament. *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates Text von Bedeutung für den EWR*. Bauproduktenverordnung. Version 09.03.2011.
- [4] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 13501-1 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [5] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [6] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 14080 Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 16351 Holzbauwerke - Brettsperrholz - Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [8] Kirchner, Doris. *Die ETA unabhängig bauaufsichtlich anerkannt europäisch*. Hrsg. von Deutsches Institut für Bautechnik. Version 2. Berlin, 31.10.2016. (Besucht am 12.02.2019).
- [9] Rat der europäischen Gemeinschaften. *Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte*. Bauproduktenrichtlinie. Version 21.12.1988.
- [10] European Organisation for Technical Approvals, Hrsg. *Technical Report 024 Characterisation, Aspects of Durability and Factory Production Control for Reactive Materials, Components and Products*. 2006.
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 300 Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) - Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006.
- [12] *Din 4102-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, Mai 2016.
- [13] Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G. und Muntean, M., & Peters, J. A. H. W. *Trends in global co2 emissions 2016 Report*. Bd. Nr. 2315. The Hague: PBL publication, 2016.
- [14] Alfter, Dirk u. a. *Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0*. ger. Version Stand Dezember 2017 (2. Auflage). Alfter, Dirk (HerausgeberIn) Knaut, Marcus (HerausgeberIn) Lütcke, Jan (HerausgeberIn) Maack, Christiane (HerausgeberIn). Rostock: Deutschland, 2017.

- [15] Hohmann, Heike. "FORTSCHREIBUNG M-HFHOLZR – REGELUNGEN FÜR GEBÄUDE DER GK 4 UND 5 IN MASSIVHOLZBAUWEISE". In: *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2019. 33. Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten, 25. und 26. September 2019 : Tagungsband*. Hrsg. von Jochen Zehfuß. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA) Braunschweig Heft 235. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Bibliothek, 2019, S. 273–280. ISBN: 3892882207.
- [16] Bauministerkonferenz, Hrsg. *Musterbauordnung (MBO) - Begründung der Fassung November 2002*. 2002.
- [17] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.
- [18] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *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*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [19] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-2 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1977.
- [20] Deutsches Institut für Bautechnik. *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen*. MVV TB. Version 2019/1. 2019.
- [21] Bauministerkonferenz. *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen - Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie*. MLAR. 5. Apr. 2016.
- [22] Bauministerkonferenz. *Musterbauordnung*. MBO. Version 1997.
- [23] Bauministerkonferenz. *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise*. Musterholzbaurichtlinie - M-HFHOLZR. Version 2004.
- [24] Deutsches Institut für Bautechnik Referat III 2. *Grundsätzliche Regelungen zu Abständen bei Kabel- und Rohrschottungen*. 1.10.2013.
- [25] Lippe, Manfred. *Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Muster-Systemböden-Richtlinie MSysBöR, Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen MEltBauVO. Praxis für Architekten, Bauämter, Fachplaner für technische Gebäudeausrüstung (TGA), Elektro- und SHK-Handwerk*. ger. 4., komplett überarb. Aufl., inkl. einem Schwerpunkt zu sicherheitstechnischen Anlagen und Wechselwirkungen der Gewerke, Stand der Bearb.: April 2011. Winnenden: Heizungsjournal-Verl., 2011. 307 S. ISBN: 9783924788193.
- [26] Lippe, Manfred u.a. *Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Muster-Systembödenrichtlinie MSysBöR, Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen EItBauVO. Praxis für Architekten, Baubehörden, Fachplaner für technische Gebäudeausrüstung (TGA), Elektro- und SHK-Handwerk, Prüfsachverständige (PrüfSV), Brandschutzsachverständige/Ersteller von Brandschutzkonzepten, Fachbauleiter Brandschutz : inkl. einem Schwerpunkt zu sicherheitstechnischen Anlagen und Wechselwirkungen/Einwirkung der Gewerke untereinander*. 5., komplett überarbeitete Auflage. Czepuck, Knut (VerfasserIn.) Möller, Frank (VerfasserIn.) Reintsema, Jörg (VerfasserIn.) Winnenden: Heizungsjournal Verlags-GmbH, 2018. 397 Seiten. ISBN: 978-3-924788-22-3.

- [27] Bauministerkonferenz. *Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen*. M-LüAR. 29. Sep. 2005.
- [28] Bauministerkonferenz. *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise*. M-HolzBauRL. Version Entwurf Stand Mai 2020.
- [29] Holzbau Deutschland Bund Deutscher Zimmermeister. *Lagebericht 2019*. 6.2019. URL: https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Holzbau_Deutschland_Lagebericht_2019_web_01.pdf (besucht am 25.10.2019).
- [30] Holzbau Deutschland Bund Deutscher Zimmermeister. *Statistiken 2009 - 2020*. 2009 - 2019. URL: https://www.holzbau-deutschland.de/aktuelles/lagebericht_und_statistiken/ (besucht am 31.12.2020).
- [31] Kampmeier, Björn. *Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2008. ger. Bd. 206. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Kampmeier, Björn (VerfasserIn). Braunschweig: Techn. Univ. Inst. für Baustoffe Massivbau und Brandschutz, 2008. 196 S. (Besucht am 11.07.2018).
- [32] Kaufmann, Hermann, Krötsch, Stefan und Winter, Stefan. *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau*. 1. Auflage. DETAIL Atlas. Kaufmann, Hermann (VerfasserIn) Krötsch, Stefan (VerfasserIn) Winter, Stefan (VerfasserIn). München: Detail Business Information GmbH, 2017. ISBN: 9783955533533. DOI: 10.11129/9783955533540.
- [33] Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. *dataholz.eu*. 2020. URL: <https://www.dataholz.eu/> (besucht am 21.04.2020).
- [34] Niemz, Peter. "Einsatzmöglichkeiten von Holzwerkstoffen im Bauwesen". In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 12.154 (2003), S. 472–479. URL: <https://szf-jfs.org/doi/pdf/10.3188/szf.2003.0472> (besucht am 20.04.2020).
- [35] Merk, Michael, Werther, Norman und Gräfe, Martin. *Erarbeitung weiterführender Konstruktionsregeln/-details für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4. [Schlussbericht zu Forschungsvorhaben] ; [Laufzeit: Dezember 2012 bis Juli 2014]*. ger. Bd. 2923. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014. 244 S.
- [36] Östman, Birgit. *Fire safety in timber buildings. Technical guideline for Europe*. Stockholm: SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. 211 S. ISBN: 9789186319601.
- [37] Teibinger, Martin und Matziner, Irmgard. *Brandabschottung im Holzbau. Planungsbroschüre*. ger. neubearb. und erw. Aufl. Bd. 38. HFA-Schriftenreihe. Teibinger, Martin (VerfasserIn) Matziner, Irmgard (VerfasserIn). Wien: Holzforschung Austria, 2013. 55 S. ISBN: 9783950336757.
- [38] Studhalter, Jakob, Weber, Heinz und Wiederkehr, Reinhard. *Haustechnik - Installationen und Abschottungen*. 1. Auflage. Lignum-Dokumentation Brandschutz. 2010. 84 S.
- [39] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 1995-1-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [40] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.

- [41] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [42] Hosser, Dietmar und Zehfuß, Jochen. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum erforderlichen Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Stahlbauweise. Abschlussbericht ; Forschungsvorhaben Nr. S 503 im Auftrag der Stiftung Industrieforschung, Köln*. ger. Hosser, Dietmar (VerfasserIn) Zehfuß, Jochen (VerfasserIn). 2016. URL: <http://publikationsserver.tu-braunschweig.de/get/64159>.
- [43] Babrauskas, Vytenis und Williamson, Robert Brady. “The historical basis of fire resistance testing — Part I”. In: *Fire Technology* 14.3 (1978). PII: BF01983053, S. 184–194. DOI: 10.1007/BF01983053.
- [44] Babrauskas, Vytenis und Williamson, Robert Brady. “The historical basis of fire resistance testing — Part II”. In: *Fire Technology* 14.4 (1978). PII: BF01998390, S. 304–316. DOI: 10.1007/BF01998390.
- [45] International Organization for Standardization, Hrsg. *ISO 834-1 Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. 1999.
- [46] Werther, Norman. “Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren”. Diss. Technische Universität München, 2016.
- [47] Hosser, Dietmar, Hrsg. *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht TB 04-01 der vfd*. ger. 3., überarb. u. erg. Aufl. Technischer Bericht. Köln: VdS-Verl., 2013. 419 S. ISBN: 9783936050202.
- [48] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 1991-1-2/NA Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [49] Zehfuß, Jochen. “Brandschutzbemessung nach Eurocode - Praxisbeispiele. Bemessung von Holzbauteilen”. In: *4. HolzBauSpezial Akustik & Brandschutz im Holz- und Innenausbau*. Forum HolzBauSpezial Akustik & Brand (Bad Wörishofen). Hrsg. von Forum-Holzbau. 2013, S. 1–11. URL: http://www.forum-holzbau.com/pdf/HBS_bauphysik_13_Zehfuss.pdf (besucht am 27.04.2020).
- [50] Ross, Robert J and others. *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*. Hrsg. von USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010. Madison, Wis., 2010. (Besucht am 07.01.2019).
- [51] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Hrsg. *Unser Wald. Natur aus Försterhand*. ger. Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Juli 2016. 111 S.
- [52] Salthammer, Tunga und Marutzky, Rainer, Hrsg. *Bauen und Leben mit Holz*. ger. Bd. 2013, März. Informationsdienst Holz Spezial. Berlin: DHWR, 2013. 37 S.
- [53] Ritzka, Yvonne. “Untersuchungen zum Abbrandverhalten von Holz- und Spanplattenproben mit einer TGA-FTIR-Kopplung”. Diss. Hannover: Universität der Bundeswehr München, 1998.
- [54] Lingens, Albert. “Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau, Diss.” Diss. München: Studienfakultät für Frostwissenschaften und Ressourcenmanagement der Technischen Universität München, 2003. 215 S.

- [55] Di Blasi, Colomba u. a. “Pyrolytic behavior and products of some wood varieties”. In: *Combustion and Flame* 124.1-2 (2001). PII: S001021800001917, S. 165–177. ISSN: 00102180. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00191-7.
- [56] Ranz, Thomas. “Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz”. In: *Beiträge zur Materialtheorie*. Hrsg. von Alexander Lion. ISBN: 1862-5703. URL: https://www.unibw.de/lrt4/veroeffentlichungen/bzm_heft_2_07.pdf (besucht am 28. 11. 2019).
- [57] Franz F. P. Kollmann und Wilfred A. Côté JR. *Principles of Wood Science and Technology. I Solid Wood*. ger. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968. Online-Ressource. ISBN: 9783642879289.
- [58] Niemz, Peter und Gereke, Thomas. “Auswirkungen kurz- und langzeitiger Luftfeuchteschwankungen auf die Holzfeuchte und die Eigenschaften von Holz”. In: *Bauphysik* 31.6 (2009), S. 380–385. ISSN: 01715445. DOI: 10.1002/bapi.200910049. (Besucht am 06. 11. 2018).
- [59] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 1052 Entwurf Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [60] Frangi, Andrea. “Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken”. Diss. Zürich: ETH Zurich, 2001. URL: 10.3929/ETHZ-A-004273454 (besucht am 09.03.2020).
- [61] Friquin, Kathinka Leikanger. “Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber”. In: *Fire and Materials* 35.5 (2011), S. 303–327. ISSN: 03080501. DOI: 10.1002/fam.1055.
- [62] Schleifer, Vanessa. “Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall”. de. Diss. ETH Zurich, 2009. 157 S. URL: 10.3929/ETHZ-A-005771863 (besucht am 10.03.2020).
- [63] Manfred Hellwig. “Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe”. Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau. Diss. München: Technische Universität München, 1988. 152 S. URL: https://www.tec.wzw.tum.de/downloads/diss/1988_hellwig.pdf (besucht am 21.12.2020).
- [64] Lache, Michael. “Untersuchungen zur Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz und zur Feuerwiderstandsdauer biegebeanspruchter Brettschichtholzträger”. Diss. München: Ludig-Maximilians-Universität, 1992.
- [65] Topf, Peter. “Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°”. ger. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 29 (1971). Topf, Peter (Verfasser), S. 269–275.
- [66] Sandermann, Wilhelm und Augustin, Hans. “Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz Erste Mitteilung; Stand der Forschung”. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 21.7 (1963). PII: BF02616316, S. 256–265. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02616316.
- [67] Sandermann, Wilhelm und Augustin, Hans. “Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz—Zweite Mitteilung; Untersuchungen mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse”. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 21.8 (1963). PII: BF02610964, S. 305–315. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02610964.
- [68] Franz Kollmann. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit*. 2., neubearb. u. erw. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer, 1951.

- [69] Kollmann, Franz. "Zur Frage des Auftretens exothermer Reaktionen bei Holz". In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 18.6 (1960). PII: BF02617976, S. 193–200. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02617976.
- [70] Metz, Ludwig. *Holzschutz gegen Feuer*. Hrsg. von VDI. 1942.
- [71] Mikkola, Esko. *Charring of wood*. eng. Bd. 689. Tutkimuksia / Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 1990. 35 S. ISBN: 951-38-3711-4.
- [72] Fischer, Nadja und Treml, Sebastian. "Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Rohdichte, der Spangröße und der Ausrichtung der Späne". In: *European Journal of Wood and Wood Products* 70.1-3 (2012). PII: 565, S. 327–335. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/s00107-011-0565-8. (Besucht am 06.07.2018).
- [73] Gilka-Bötzow, A., Heiduschke, A. und Haller, P. "Zur Abbrandrate von Holz in Abhängigkeit der Rohdichte". In: *European Journal of Wood and Wood Products* 69.1 (2011). PII: 430, S. 159–162. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/s00107-010-0430-1.
- [74] Collier, P.C.R. *Charring Rates of Timber. Study Report SR 42*. Hrsg. von Building Research Association of New Zealand. Judgeford, New Zealand, 1992.
- [75] Frangi, Andrea u. a. "Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire". In: *Fire Safety Journal* 44.8 (2009). PII: S0379711209001118, S. 1078–1087. ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007.
- [76] Schmid, Joachim u. a. "Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions". In: *Fire Technology* 51.6 (2015). PII: 516, S. 1341–1370. DOI: 10.1007/s10694-015-0516-8.
- [77] Osborne, Lindsay, Dagenais, Christian und Bénichou, N. *Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report*. Advanced Building Systems - Serviceability and Fire Group, 2012. URL: <https://www.awc.org/pdf/codeofficials/2012/Preliminary-CLT-Fire-Test-Report-FINAL-July2012.pdf> (besucht am 13.05.2020).
- [78] Klippel, M. u. a. "Fire Tests on Loaded Cross-laminated Timber Wall and Floor Elements". In: *Fire Safety Science* 11 (2014), S. 626–639. ISSN: 18174299. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.11-626. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/94442>.
- [79] Andrea Frangi und Michael Klippel. *Einfluss des Klebstoffes auf das Brandverhalten von Holzbauteilen*. ETH Zürich. 2011. URL: https://www.forum-holzbau.com/pdf/ihf11_frangi.pdf (besucht am 17.12.2018).
- [80] Klippel, Michael und Frangi, Andrea. "Brandverhalten von Brettsperholz". In: *Bautechnik* 93.8 (2016), S. 567–573. ISSN: 09328351.
- [81] Dagenais, Christian. "Assessing the Fire Integrity Performance of Cross-Laminated Timber Floor Panel-to-Panel Joints". Diss. Carleton: Carleton University, 2016.
- [82] Janssens, Marc L. und White, Robert H. "Short communication: Temperature profiles in wood members exposed to fire". In: *Fire and Materials* 18.4 (1994), S. 263–265. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.810180410.
- [83] Menis, Angese. "Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements". Diss. Cagliari: Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile e Aarchitettura, 2012.
- [84] Wilinder, Per. "Fire resistance in cross-laminated timber". Master thesis. Jönköping: Jönköping University, 2009. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:299665/FULLTEXT01.pdf> (besucht am 03.01.2021).

- [85] Aguanno, Marc. "Fire Resistance Tests on Cross-Laminated Timber Floor Panels: An Experimental and Numerical Analysis". Master Thesis. Carleton: Carleton University, 2013.
- [86] Klippel, Michael u. a. "Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettspertholz im Brandfall". In: *Bautechnik* 96.11 (2019), S. 824–831. ISSN: 09328351. DOI: 10.1002/bate.201900019.
- [87] Schaffrath, Jörg. "Untersuchungen zu Feuchttransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen". ger. Schaffrath, Jörg (Verfasser) Winter, Stefan (Akademischer Betreuer) Kuilen, Jan-Willem G. van de (Akademischer Betreuer) Niemz, Peter (Akademischer Betreuer). Diss. München: Universitätsbibliothek der TU München, 2015. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1241372/1241372.pdf>.
- [88] Schaffer, E. L. *Charring rate of selected woods - transverse to grain*. eng. Bd. FPL-RP-69. Research paper. Madison, Wis., 1967. 22 S.
- [89] White, Robert H. und Tran, Hao C. "Charring rate of wood exposed to a constant heat flux". In: *3rd International Scientific Conference: proceedings*. Wood and fire safety (The High Tatras, Slovak Republic.[Zvolen, Slovak Republic]). Technical University of Zvolen, Faculty of Wood Technology. 1996, S. 175–183.
- [90] White, Robert H. und Nordheim, Erik V. "Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure". In: *Fire Technology* 28.1 (1992). PII: BF01858049, S. 5–30. DOI: 10.1007/BF01858049. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01858049.pdf>.
- [91] König, Jürgen und Walleij Lars. *One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situation protection situation*. Trätek, Rapport I 9908029. Stockholm, 1999.
- [92] Fredlund, Bertil. *Träets antändnings- och förbränningsmekanism. Intern rapport IR 79-3*. Institutionen för Byggnadsstatik, LTH. Lund, 1979.
- [93] Knublauch, E. und Rudolphi, E. "Der Abbrand als Grundlage zur theoretischen Vorausbestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen". In: *Bauen mit Holz* 73 (1971).
- [94] Tran, Hao C. und White, Robert H. "Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter". In: *Fire and Materials* 16.4 (1992), S. 197–206. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.810160406.
- [95] Mikkola, E. "Charring Of Wood Based Materials". In: *Fire Safety Science* 3 (1991), S. 547–556. ISSN: 18174299. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-547.
- [96] Dorn, Hans und Egner, Karl. "Brandversuche an brettschichtverleimten Holzträgern unter Biegebeanspruchung". In: *European Journal of Wood and Wood Products* 25.8 (1967). PII: BF02615681, S. 308–320. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02615681.
- [97] Fahrni, Reto u. a. "Correct temperature measurements in fire exposed wood". en. In: *World Conference on Timber Engineering 2018*. Hrsg. von World Conference on Timber Engineering. Seoul, Republic of Korea, 2018. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000289850.
- [98] Scherer, Thomas u. a. *Leitungsdurchführungen im Holzbau Abschlussbericht LeitHolz*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019. ISBN: 978-3-7388-0411-9.
- [99] Peifer, Philipp. "Leitungsdurchführungen in brandschutztechnisch separierenden Holzbauteilen - Grundlagenermittlung". Masterarbeit. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2018.

- [100] Fahrni, Reto u. a. “Investigation of Different Temperature Measurement Designs and Installations in Timber Members as Low Conductive Material”. en. In: *Structures in Fire SiF'2018 : 10th International Conference on Structures in Fire, Belfast, United Kingdom, 6-8 June 2018*. Structures in Fire SiF'2018 (Belfast, United Kingdom). Hrsg. von Ulster University. Hrsg. von Ali Nadjai u. a. Ulster University. Belfast, UK: Ulster University, 2018, S. 257–264. DOI: 10.3929/ETHZ-B-000269112.
- [101] König, Jürgen. “Structural fire design according to Eurocode 5—design rules and their background”. In: *Fire and Materials* 29.3 (2005), S. 147–163. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.873.
- [102] Browne, Frederick Lincoln. *Theories of the combustion of wood and its control. A survey of the Literature*. Forest Products Laboratory, Forst Service, U.S. Department of Agriculture, 1958.
- [103] Rusche, Horst. “Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 200°C—Zweite Mitteilung: Reaktionskinetik des Masseverlustes bei Wärmebehandlung von Holz”. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 31.8 (1973). PII: BF02607365, S. 307–312. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02607365.
- [104] Harmathy T.Z., Kodur V.K.R. “Properties of Building Materials”. In: *SFPE handbook of fire protection engineering*. Hrsg. von Morgan Hurley. Fifth edition. New York, Heidelberg und Dordrecht: Springer, 2016, S. 277–324. ISBN: 9781493925643.
- [105] Fredlund, Bertil. “Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire”. In: *Fire Safety Journal* 20.1 (1993). PII: 037971129390011E, S. 39–69. ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/0379-7112(93)90011-E. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/037971129390011E> (besucht am 03.01.2021).
- [106] KANURY, A. MURTY und BLACKSHEAR, PERRY L. “Some Considerations Pertaining to the Problem of Wood-Burning”. In: *Combustion Science and Technology* 1.5 (1970), S. 339–356. ISSN: 0010-2202. DOI: 10.1080/00102206908952214.
- [107] P. Clancy. “Advances in modelling heat transfer through wood framed walls in fire”. en. In: *Fire and Materials* 25.6 (2001), S. 241–254. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.773. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fam.773>.
- [108] H. Takeda und J. R. Mehaffey. “WALL2D: A model for predicting heat transfer through wood–stud walls exposed to fire”. en. In: *Fire and Materials* 22.4 (1998), S. 133–140. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(1998070)22:4<133::AID-FAM642>3.0.CO;2-L.
- [109] Janssens, Marc L. “Thermo-Physical Properties for Wood Pyrolysis Models”. In: *Pacific timber engineering conference. Papers*. Hrsg. von Jodie Wells. Timber Research and Development Advisory Council, 1994. ISBN: 9781875432288.
- [110] Fuller, James J., Leichti, Robert J. und White, Robert H. “Temperature distribution in a nailed gypsum–stud joint exposed to fire”. In: *Fire and Materials* 16.2 (1992), S. 95–99. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.810160206.
- [111] Ragland, K. W., Aerts, D. J. und Baker, A. J. “Properties of wood for combustion analysis”. In: *Bioresource Technology* 37.2 (1991). PII: 096085249190205X, S. 161–168. ISSN: 09608524. DOI: 10.1016/0960-8524(91)90205-X.
- [112] Tenwolde, Anton, McNatt, J. D. und Krahn, L. *Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings*. 1988.
- [113] Spearpoint, M.J und Quintiere, J.G. “Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model — effect of species, grain orientation and heat flux”. In: *Fire Safety Journal* 36.4 (2001). PII: S0379711200000552, S. 391–415. ISSN: 03797112. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00055-2.

- [114] Glass, Samuel V. und Zelinka, Samuel L. “Moisture Relations and Physical Properties of Wood”. In: *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*. Hrsg. von USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010. Madison, Wis., 2010, S. 4-1 –4-19. (Besucht am 07.01.2019).
- [115] Steinhagen, Peter H. *Thermal Conductive Properties of Wood, Green or Dry, From -40° to +100° C: A Literature Review. General Technical Report FPL - 9*. Hrsg. von U.S. Department of Agriculture. Forst Products Lab Madson Wisconsin, USA: USDA Forest Service, 1977.
- [116] Jansson, Robert. *Measurement of thermal properties at elevated temperatures. Brandforsk project 328-031*. 2004.
- [117] Köhlmann, Günter. “Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroskopischen Bereich”. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 20.7 (1962). PII: BF02604682, S. 259–270. ISSN: 0018-3768. DOI: 10.1007/BF02604682.
- [118] MacLean, J. D. “Thermal Conductivity of Wood”. In: *Heating, piping & air conditioning* 13.6 (1941), S. 380–391.
- [119] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN V ENV 1995-1-2 Eurocode 5 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1995-1-2:1994 Vornorm*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [120] Maku, Takamaro. *Studies on the Heat Conduction in Wood*. Kyoto University, 1954. URL: <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/52793/1/KJ00002615417.pdf> (besucht am 03.01.2021).
- [121] Thomas, Geoffrey Charles. “Fire resistance of light timber framed walls and floors”. eng. Diss. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1997. 318 S.
- [122] Naser, M. Z. “Properties and material models for common construction materials at elevated temperatures”. In: *Construction and Building Materials* 215 (2019). PII: S0950061819310712, S. 192–206. ISSN: 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.182.
- [123] Committee on Fire Protection editiert von Lie, Tiam T. *Structural Fire Protection*. eng. Bd. v.78. Manuals and Reports on Engineering Practice. s.l.: American Society of Civil Engineers, 1992. 258 S. ISBN: 9780872628885.
- [124] Harper, Charles A., Hrsg. *Handbook of building materials for fire protection*. McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN: 0071388915. URL: <http://www.loc.gov/catdir/bios/mh041/2003273634.html>.
- [125] Mehaffey, J. R., Cuerrier, P. und Carisse, G. “A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire”. In: *Fire and Materials* 18.5 (1994), S. 297–305. ISSN: 1099-1018. DOI: 10.1002/fam.810180505.
- [126] Koch, Peter. “Specific Heat of Owendry Spruce Pine Wood and Bark”. In: *Wood Science* 1.4 (1969), S. 203–214.
- [127] Dunlap, Frederick. *The specific Heat of wood*. eng. Bd. 110. Bulletin / U.S. Dep. of Agric., Forest Service. Washington: Gov. Pr. Off, 1912. 28 S. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112104108011&view=1up&seq=14>.
- [128] Schneider, Klaus-Jürgen und Albert, Andrej. *Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. 24. Auflage. 2020. 1696 S. ISBN: 978-3-8462-1140-3.

- [129] Schäfer, Klaus u. a., Hrsg. *Kalorische Zustandsgrößen. Quelle nicht verfügbar*. ger. 6. Aufl. Bd. / hsg. von J. Bart ; Teil 4. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik Eigenschaften der Materie in ihren Aggregatzuständen. Berlin: Springer, 1961. 863 S.
- [130] Widell, Torsten. *Thermal investigations into carbonization of wood*. eng. Bd. 199. Ingeniörsvetenskapsakademiens handlingar. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, 1948. 35 S.
- [131] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 1366-3 Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [132] European Organisation for Technical Approvals, Hrsg. *ETAG 026 - 2 Guideline for European Technical Approval of Fire Stopping and Fire Sealing Products Part 2 Penetration Seals*. 2011.
- [133] European Organisation for Technical Assessment, Hrsg. *ETAG 026 - Teil 2: Abschottungen Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für Brandschutzprodukte zum Abdichten und Verschließen von Fugen und Öffnungen und zum Aufhalten von Feuer im Brandfall*. 2008.
- [134] Stürmer, Markus. *Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz. Untersuchung von ausgewählten Brandschutzmängeln der Ausführungsphase*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2006. ger. Forschungsberichte aus den Ingenieurwissenschaften. Berlin: Mensch & Buch Verl., 2006. 218 S. ISBN: 3866640978.
- [135] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-9 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Kabelabschottungen - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990.
- [136] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-11 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen: Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Anschlüsse ihrer Revisionsöffnungen Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1985.
- [137] Deutsches Institut für Bautechnik. *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen*. MVV TB. Version 2018.
- [138] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN ISO 20484 Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Begriffe Deutsche Fassung EN ISO 20484:2017*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [139] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 18095-1 Rauchschutztüren Begriffe und Anforderungen Teil 1*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1988.
- [140] Technische Universität München. *Forschungsprojekt TIMpuls*. 2020. URL: <https://www.bgu.tum.de/timpuls/startseite/> (besucht am 05.06.2020).
- [141] European Organisation for Technical Approvals. *EAD 13-350005-00-1104 Intumescent products for fire sealing and fire stopping purposes*. Mai 2015.
- [142] Werther, Norman u. a. "Fire safe service installations in timber buildings". In: *Timber Engineering Challenges and Solutions*. 12th World Conference on Timber Engineering 2012 (WCTE 2012) (Auckland, New Zealand). Hrsg. von World Conference on Timber Engineering. 2012, S. 61–69. ISBN: 162276305X.
- [143] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 13963 Materialien für das Verspachteln von Gipsplattenfugen - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.

- [144] Ranger, Lindsay u. a. "Fire Performance of Firestops, Penetrations, and Fire Doors in Mass Timber Assemblies". In: *World Conference on Timber Engineering 2018*. Hrsg. von World Conference on Timber Engineering, Seoul, Republic of Korea, 2018.
- [145] Dagenais, Christian. *Fire Stops and Sealing Joints in Cross-laminated Timber Construction*. Hrsg. von FPInnovations. Mai 2014.
- [146] ASTM International, Hrsg. *ASTM E814, Standard Test Method for Fire Tests of Penetration Firestop Systems*. West Conshohocken (PA), 2017.
- [147] Underwriters Laboratories Inc., Hrsg. *CAN/ULC-S115. Standard Method of Fire Tests of Firestop Systems*. Toronto, Ontario.
- [148] MPA Braunschweig. *Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Rohrschottungen der Feuerwiderstandsklasse R90 für nichtbrennbare Rohrleitungen mit der Conlit 150U Schale P-3725/4130-MPA BS*. Braunschweig, 2018. URL: <https://p-cdn.rockwool.com/siteassets/rw-d/prufzeugnisse/rohrleitungen/pz-abp-conlit-150u-nichtbrennbare-rohrleitungen-r90-rockwool.pdf?f=20200402130022> (besucht am 07. 12. 2020).
- [149] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-B in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-B / B*. 2020.
- [150] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-BL P (Längseinbau) in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-H / BLP200*. 2020.
- [151] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-BL P (Quereinbau) in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-I / BLP130*. 2020.
- [152] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-C EL in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-J / EL*. 2020.
- [153] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-CC in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-E / CC*. 2020.
- [154] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-S ACR als Ringspaltverschluss in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-C / ACR*. 2020.
- [155] IBS Linz. *Klassifizierungsbericht nach EN 13501-2:2016 Hilti CFS-SL GA (DIN) in Holzbauteilen. Klassifizierungsbericht Nr.: 319091602-G / ALD*. 2020.
- [156] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Kabelmanschette_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [157] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Kabelmanschette_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [158] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Kupfer_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [159] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Kupfer_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [160] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Rohrmanschette_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [161] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Rohrmanschette_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [162] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Weichschott_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [163] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht BSH_Weichschott_02*. Kaiserslautern, 2018.

Literatur

- [164] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Kabelmanschette_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [165] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Kabelmanschette_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [166] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Kupfer_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [167] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Kupfer_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [168] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Rohrmanschette_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [169] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Rohrmanschette_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [170] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Weichschott_01*. Kaiserslautern, 2018.
- [171] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht OSB_Weichschott_02*. Kaiserslautern, 2018.
- [172] Österreichisches Institut für Bautechnik. *ETA-13/0704 Hilti Brandschutzkabelmanschette CFS-CC*. Wien, 2013.
- [173] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.53-2282 Feuerwiderstandsfähige Abschottung für elektrische Leitungen System Hilti Brandschutzkabelmanschette CFS-CC*. 2018.
- [174] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.15-1597 Kabelabschottung (Kombiabschottung) Hilti Brandschutz-System CP 673 - Kombi S 90 der Feuerwiderstandsklasse S 90 nach IDN 4102-9*. 2014.
- [175] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.17-1577 Rohrmanschette Hilti Cp 644*. 2015.
- [176] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.17-1577 Rohrmanschette Hilti Cp 644*. 2019.
- [177] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.53-2330 Feuerwiderstandsfähige Abschottung für Rohrleitungen aus Kunststoff Hilti Brandschutzsystem CP 644*. 2019.
- [178] Hilti. *Hilti Brandschutz-Acryldichtmasse CFS-S ACR. Technisches Datenblatt*. 2012. URL: https://www.hilti.de/medias/sys_master/documents/h81/h72/9505244119070/CFS-S-ACR-Montageanleitung-Technische-Information-ASSET-DOC-LOC-1818898.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [179] Deutsches Institut für Bautechnik. *Z-19.53-2210 Abschottung für Rohrleitungen aus Metall mit Isolierung aus flexiblem Elastomerschaum Hilti System CFS-B für nichtbrennbare Rohre*. 2016.
- [180] MPA Braunschweig. *P-3725/4130-MPA BS Rohrabschottungen Rockwool Rohrabschottung für nichtbrennbare Rohrleitungen der Feuerwiderstandsklasse R 30, R 60, R 90 bzw. R 120 nach DIN 4102-11 : 1985-12*. 2016.
- [181] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN 4102-8 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [182] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht B1_Holzrahmenwand*. 2019.
- [183] Scherer, Thomas und Thiele, Catherina. *Versuchsbericht B2_Brettsperrholzwand*. 2019.
- [184] Holzforschung Austria – Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. *Kurzbericht 2430/2015/05 - BB. Verlängerung des Kurzberichts (Auftrags-Nr.: 1720/2001/05) über den Feuerwiderstands REI 90/Ei 90 gemäß En 13501-2 von Stora Enso CLT als tragende Brettsperrholz-Decken-/Dachelemente ≥ 140 mm, unbeplankt und beplankt mit Gipsplatten*. Wien, 2015.

- [185] IBS Linz. *Prüfbericht Hilti, Holzdecke mit Abschottungen, Bericht Nr.: 318092507-1*. 2019.
- [186] MPA Braunschweig. *Prüfbericht Hilti, Prüfung von diversen Abschottungssystemen [...] Holzwandkonstruktion aus Brettsperholz [...] Holzrahmenwandkonstruktion [...] zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer, Prüfbericht (2401/086/16) - Wsp vom 13.11.2017*. 2016.
- [187] MFPA Leipzig GmbH. *Prüfbericht Hilti, Fire-resistance test on pipe bulkheads in a vertically installed state in a cross laminated timber element [...], Test Report No. PB 3.2/16-135-2*. 2016.
- [188] Mayr Melnhof Holz. *MM masterline Brettschichtholz*. 2016. URL: <http://www.mm-holz.com/produkte/weiterverarbeitung/mm-masterline/> (besucht am 18.12.2018).
- [189] storenso. *CLT - Cross Laminated Timber Brandschutz. Brandschutz von CLT*. 2016. URL: <https://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/CLT-Dokumentation-Brandschutz-DE1.pdf> (besucht am 10.07.2019).
- [190] Maas, Maximilian. "Untersuchung der Anwendbarkeit von Erleichterungen nach Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie in Holzbauteilen". Studienprojekt. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2020.
- [191] Hilti Deutschland AG. *Brandschutzfüllmasse CFS-FIL Hilti Firestop Filler Mastic*. URL: https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_BLOCKS_PLUGS_CUSHIONS_7131/r68870?itemCode=2052899 (besucht am 15.06.2020).
- [192] Scherer, Thomas, Thiele, Catherina und Lorenz, Dirk. "Sealing of service penetrations in timber buildings utilizing timber in timber installation". In: *fib - Fédération Internationale du Béton International Federation for Structural Concrete (Hg.) 2020 - No. 50. Proceedings*, S. 102–109.
- [193] Maas, Maximilian und Scherer, Thomas. *Brandversuche an Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile mit unterschiedlichen Dichtmaterialien*. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2019.
- [194] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *DIN EN 1366-4 Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 4: Abdichtungssysteme für Bauteilfugen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [195] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht: Brandversuche an Durchführungen metallischer Leitungen durch Holz und Beton*. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2020.
- [196] Risch, Manuel. "Untersuchung des Abbrandes um metallische Leitungen in Brettschichtholz". Studienprojekt. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2020.
- [197] Klein, Bernd. *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 10., verbesserte Auflage. Lehrbuch. Klein, Bernd (VerfasserIn). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-06053-4.
- [198] Werther, Norman und Matthäus, Carla. "Wärmeenergie und Holzfeuchte als Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holz". In: *Bautechnik* 97.8 (2020), S. 540–548. ISSN: 09328351. DOI: 10.1002/bate.201900112.
- [199] Risch, Manuel. "Untersuchung von Fugen im Holzbau unter Brandbeanspruchung". Studienprojekt. Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2019.
- [200] Deutsches Kupferinstitut. *Cu-DHP. Werkstoff-Datenblätter*. 2005. URL: <https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/11/Cu-DHP.pdf> (besucht am 26.03.2020).

Literatur

- [201] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [202] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [203] ASTM International, Hrsg. *ASTM E2226-10, Standard Practice for Application of Hose Stream*. West Conshohocken (PA), 2010.
- [204] European Organisation for Technical Approvals, Hrsg. *ETAG 026 - 3 Guideline for European Technical Approval of Fire Stopping and Fire Sealing Products Part 3 Linear Joint and Gap Seals*. 2011.
- [205] Unifrax I LLC. *Insulfrax LTX Matte. Produktdatenblatt*. 2018. URL: https://www.unifrax.com/wp-content/uploads/2018/09/18107-Unifrax-Insulfrax-Form-U_216_DE.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [206] Hilti Deutschland AG. *Hilti Brandschutzschaum CP 620*. URL: https://www.hilti.de/c/CLS_FIRESTOP_PROTECTION_7131/CLS_FIRESTOP_FOAMS_7131/r1002 (besucht am 18.06.2020).
- [207] Rex Industrie-Produkte Graf von Rex GmbH. *Fugenschmur SG 300 N. Datenblatt*. URL: https://www.rex-industrie-produkte.de/fileadmin/user_upload/Broschuere_Fugenschmur_SG_300_N_DB-FSG300N-2020-5de_E1.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [208] Zapp-Zimmermann GmbH. *Brandschutzfugendichtung ZZ 530. Technisches Datenblatt*. 2017. URL: https://www.z-z.de/media/catalog/downloads/TDB_Brandschutzfugendichtung_ZZ_530.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [209] Rex Industrie-Produkte Graf von Rex GmbH. *flaton-flex A. Dämmschichtbildner für den Brand- und Hitzeschutz Kurzbeschreibung*. 2009. URL: https://www.rex-industrie-produkte.de/uploads/tx_products/flaton-flex_A_02.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [210] Zapp-Zimmermann GmbH. *Brandschutzsilikon ZZ 345. Technisches Datenblatt*. 2017. URL: https://www.z-z.de/media/catalog/downloads/TDB_Brandschutzsilikon_ZZ_345.pdf (besucht am 18.06.2020).
- [211] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 01 ZZ-Brandschutzfugendichtung16 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [212] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 02 ZZ-Brandschutzfugendichtung16 13mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [213] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 03 ZZ-Brandschutzfugendichtung24 15mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [214] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 04 ZZ-Brandschutzfugendichtung24 21mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [215] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 05_Insulfrax gestopft 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [216] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 06 Brandschutzschaum 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [217] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 07 Insulfrax25mm gelegt 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [218] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 08 Brandschutzsilikon 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.

- [219] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 09 Brandschutzacrylat 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [220] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 10 Dämmschichtbildner1 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [221] Risch, Manuel und Scherer, Thomas. *Versuchsbericht Fuge 11 Brandschutzfugendichtung12 10mm*. TU Kaiserslautern, 2019.
- [222] Suttner, Elisabeth, Werther, Norman und Dumler, Patrick. *Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch*. de. 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.20566.80964.

11 Anlagen

Verzeichnis der Anlagen

Anlage A: Temperaturverläufe Einzelleitungen mit Dichtmaterialien^{1,2}

Anlage B: Abbrand Querschnitt um Einzelleitungen ³

Anlage C: Bewertung des Abbrands Querschnitte Einzelleitungen

Anlage D: Temperaturverläufe metallische Leitungen⁴

Anlage E: Abbrandtrichter metallische Leitungen

Anlage F: Simulationsergebnisse Temperaturen Kupferleitungen⁵

Anlage G: Simulationsergebnisse Moduldicken ⁶

Anlage H: Simulationsergebnisse Abbrand Kupferleitungen

¹ Lager der Messstellen: siehe Abb. 7.2

² Die Bezeichnungen der Graphen in Anhang A ergeben sich aus einem Buchstaben für das jeweilige Dichtmaterial (G = Gips, S = Steinwolle, I = Intumeszenzmaterial, A = Brandschutzacryl), dem Wort Holz für Thermoelemente auf der Holzoberfläche sowie eine Abkürzung für die Art der Leitung (Cu12 = Kupferrohr \varnothing 12 mm, Cu22 = Kupferrohr \varnothing 22 mm, Kabel = Einzelkabel NYM-J 5x16 PVC Mantelleitung, Bündel = Kabelbündel aus einmal NYM-J 5x16 PVC Mantelleitung und zweimal (NYM/St)-J 3x1,5 PVC Mantelleitung).

³ Kabel und Kabelbündel entsprechen den Bezeichnungen aus Anhang A. BS-Acryl = Hilti Firestop Acrylic Sealant CFS-S ACR [178], Intumeszenz = Hilti Firestop Filler Mastik CFS-FIL [191]. Die Bezeichnungen der Rohrleitungen setzen sich jeweils aus dem Rohrmaterial, abgekürzt mit CU für Kupferrohre und PVC für PVC-Rohre und dem Rohrdurchmesser in mm zusammen.

⁴ Lage der Messstellen: siehe Abb. 7.5

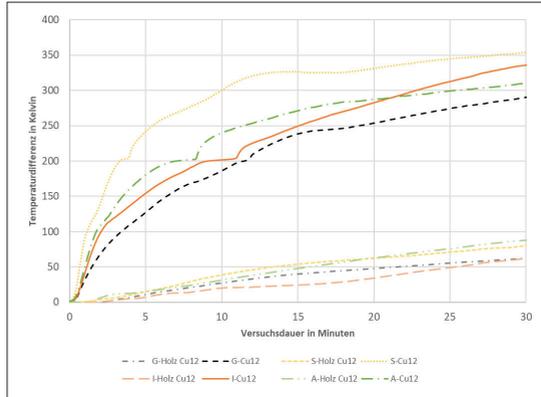
⁵ Lage der Messstellen 1 - 8: siehe Abb. 7.5; Die Bezeichnung Simulation x/y bezeichnet den simulierten Temperaturverlauf, passend zu den jeweils genannten Messstellen. (Bei den Simulationen ergeben sich keine Unterschiede hinsichtlich den Temperaturen auf und unter den Leitungen. Aus diesem Grund wird jeweils nur ein Wert angegeben.)

⁶ Lage der Messstellen 1 - 8: siehe Abb. 7.5 sowie Erläuterung der Fußnote zuvor.

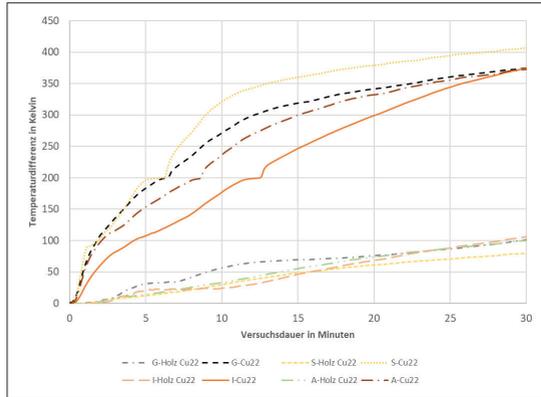
Anlage A Temperaturverläufe Einzelleitungen mit Dichtmaterialien

Tab. 11.1: Temperaturverläufe: Modul 60 mm; Leitungen: Cu 12 mm, Cu 22 mm, Einzelkabel

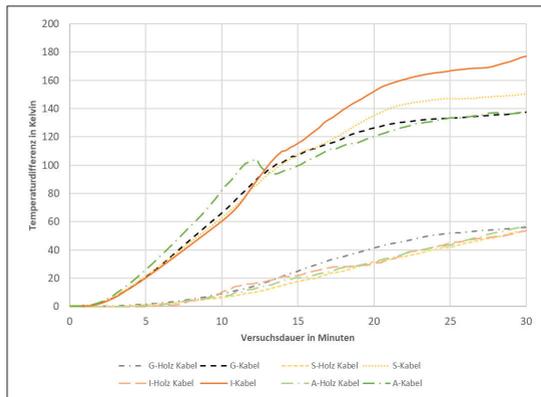
60 mm Cu 12 mm



60 mm Cu 22 mm

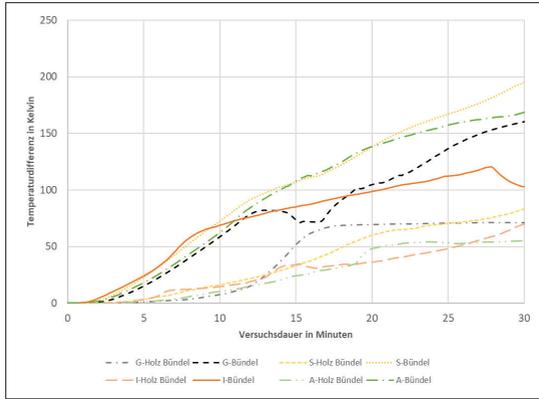


60 mm Einzelkabel

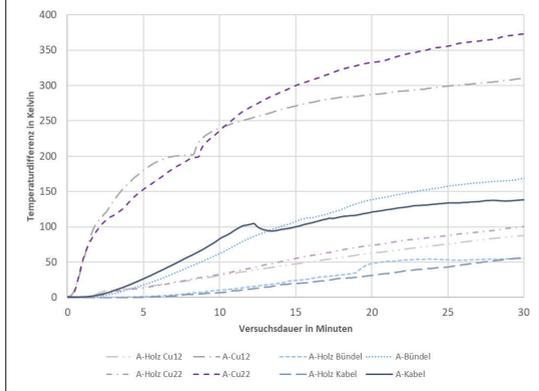


Tab. 11.2: Temperaturverläufe: Modul 60 mm; Leitungen: Kabelbündel; Dichtmittel: Brandschutz-Acryl, Gips

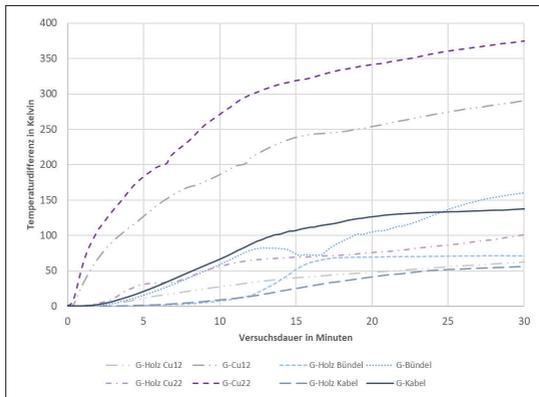
60 mm Kabelbündel



60 mm Acryl

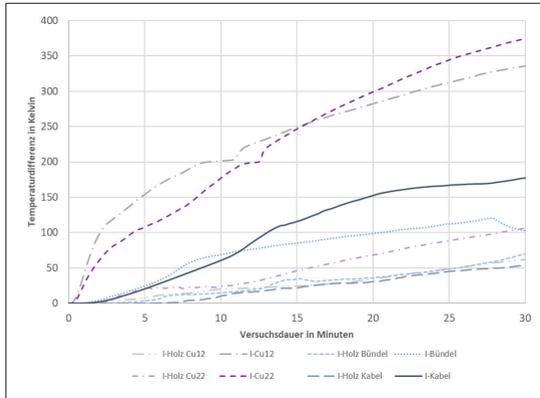


60 mm Gips

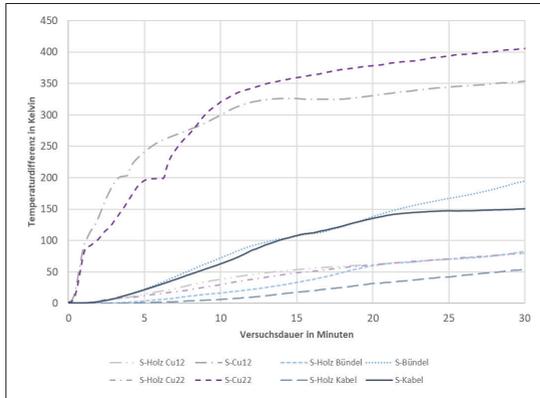


Tab. 11.3: Temperaturverläufe: Modul 60 mm; Dichtmittel: Intumeszenzmasse, Steinwolle

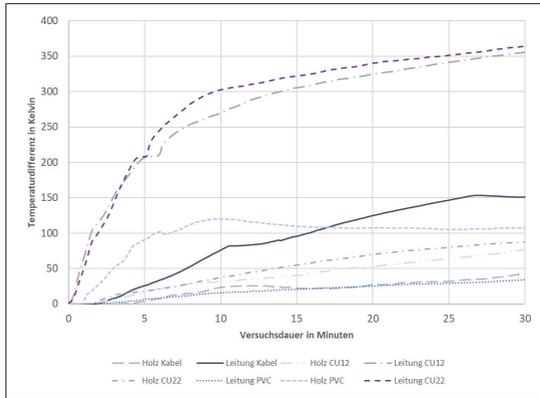
60 mm Intumeszenz



60 mm Steinwolle

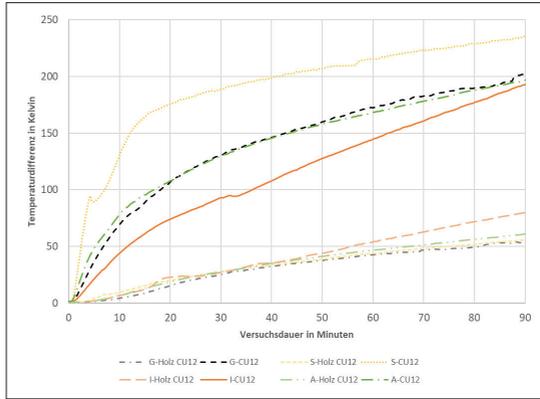


60 mm passegenau

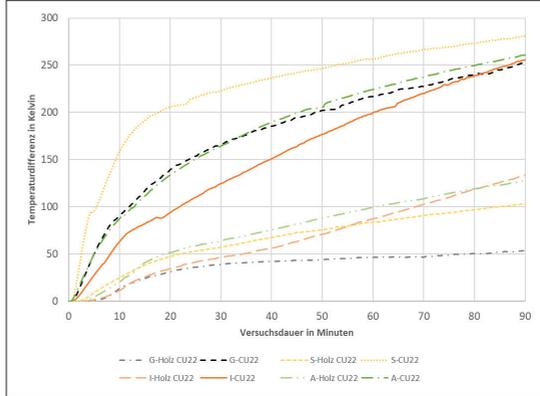


Tab. 11.4: Temperaturverläufe: Modul 160 mm; Leitungen: Cu-Rohr 12 mm, Cu-Rohr 22 mm, Einzelkabel

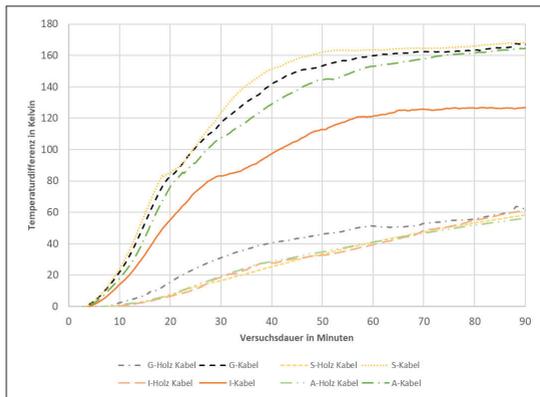
160 mm Cu 12 mm



160 mm Cu 22 mm

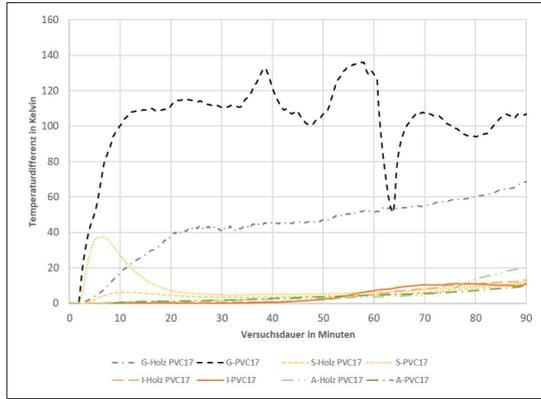


160 mm Einzelkabel

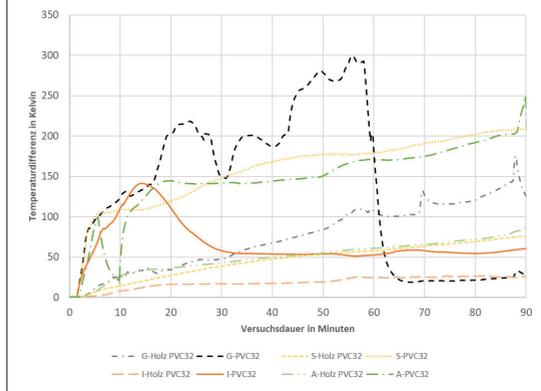


Tab. 11.5: Temperaturverläufe: Modul 160 mm; Leitungen: PVC-Rohr 17 mm, PVC-Rohr 32 mm; Dichtmittel: Brandschutz-Acryl

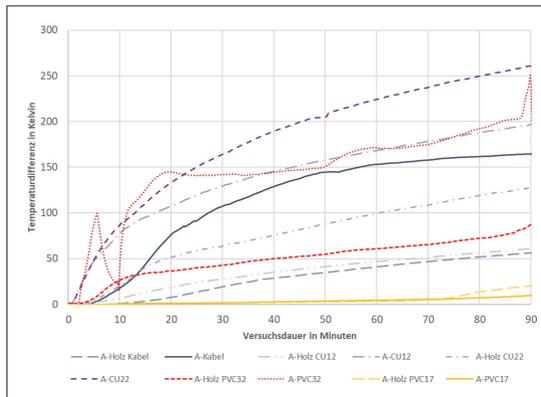
160 mm PVC 17 mm



160 mm PVC 32 mm

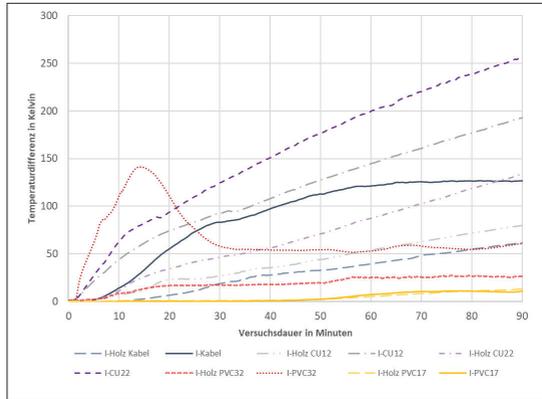


160 mm Acryl

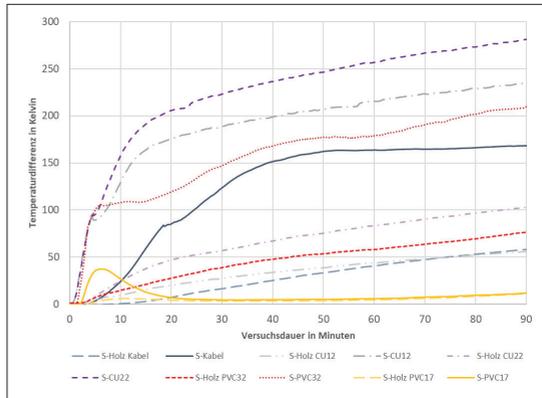


Tab. 11.6: Temperaturverläufe: Modul 160 mm; Dichtmittel: Intumeszenzmasse, Steinwolle

160 mm Intumeszenz

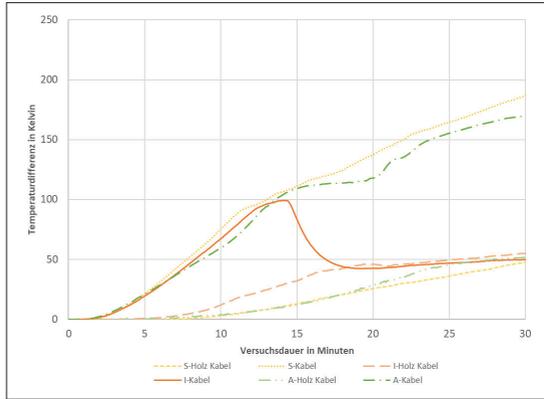


160 mm Steinwolle

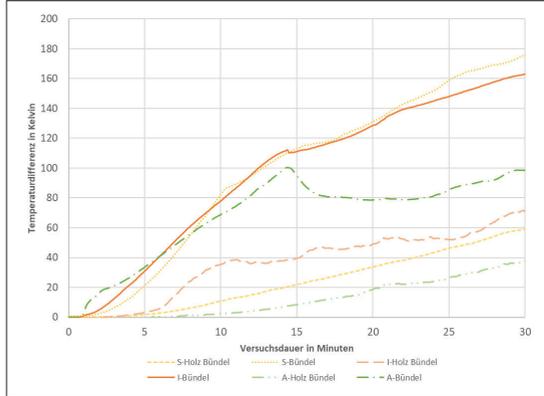


Tab. 11.7: Temperaturverläufe: Modul 60 mm, minimaler Abstand; Leitungen: Einzelkabel, Kabelbündel, Cu-Rohr 12 mm

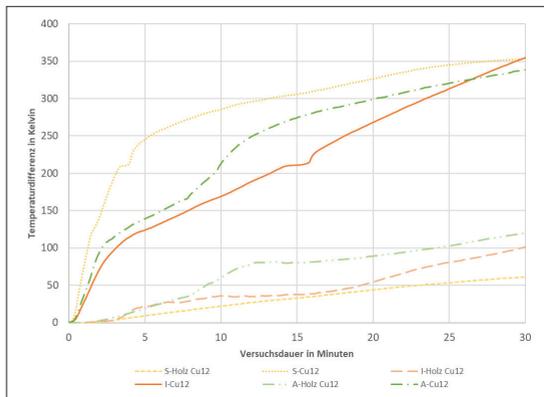
60 mm minimal Einzelkabel



60 mm minimal Kabelbündel

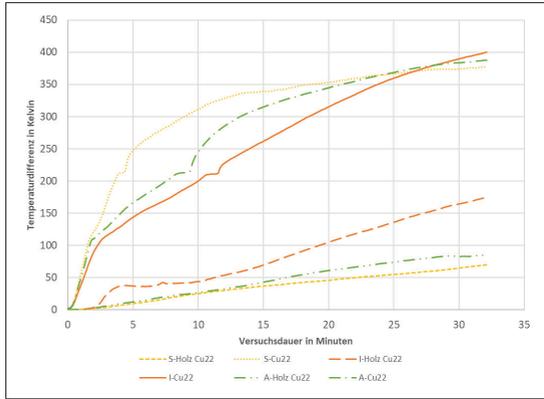


60 mm minimal Cu 12 mm

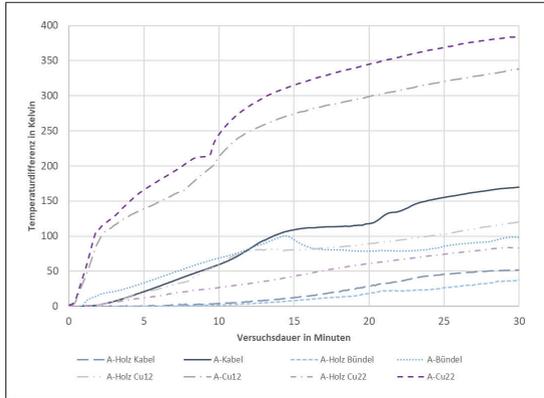


Tab. 11.8: Temperaturverläufe: Modul 60 mm, minimaler Abstand; Leitungen: Cu-Rohr 22 mm; Dichtmittel: Brandschutz-Acryl, Intumeszenzmasse

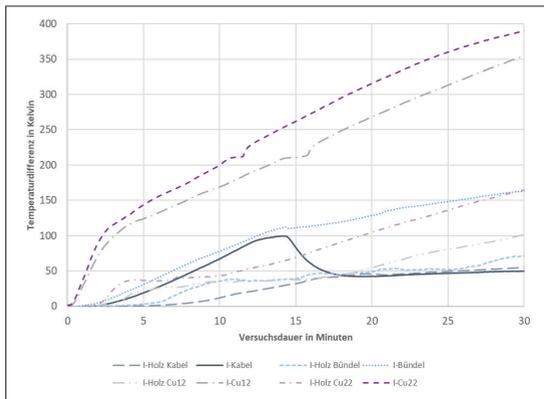
60 mm minimal Cu 22 mm



60 mm minimal Acryl

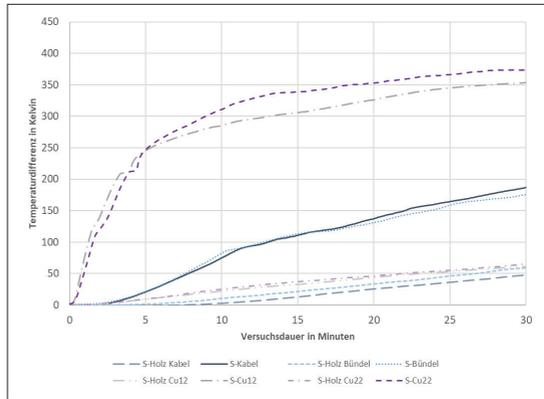


60 mm minimal Intumeszenz



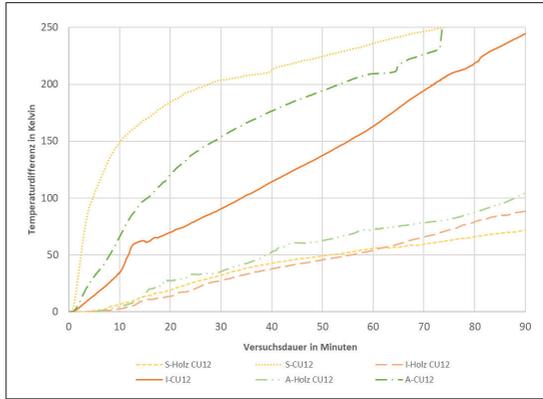
Tab. 11.9: Temperaturverläufe: Modul 60 mm, minimaler Abstand; Dichtmittel: Steinwolle

60 mm minimal Steinwolle

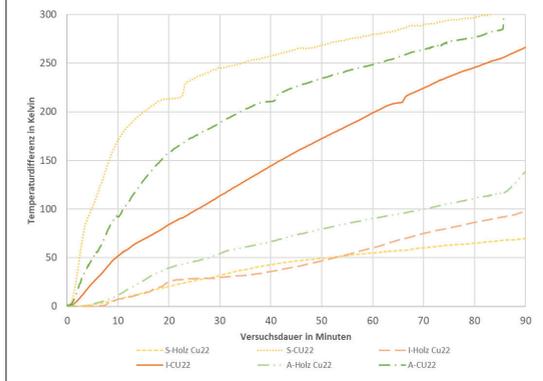


Tab. 11.10: Temperaturverläufe: Modul 160 mm, minimaler Abstand; Leitungen: Cu-Rohr 12 mm, Cu-Rohr 22 mm, Einzelkabel

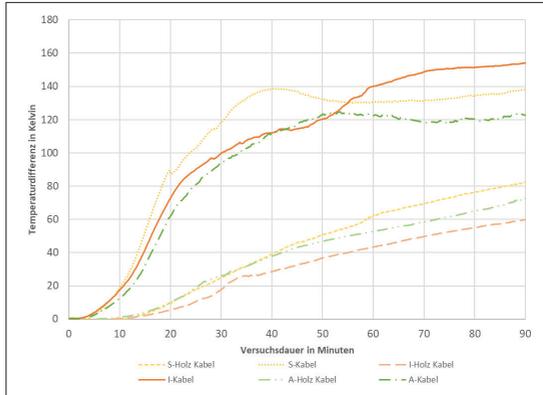
160 mm minimal Cu 12 mm



160 mm minimal Cu 22 mm

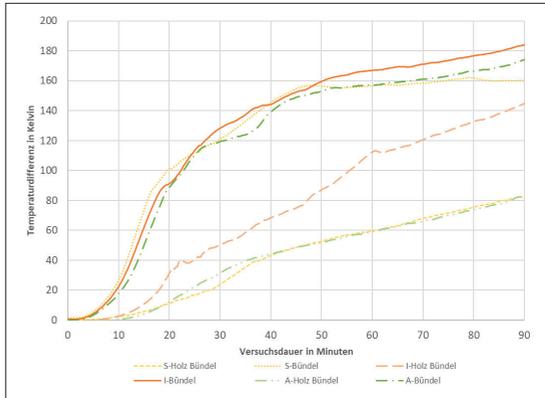


160 mm minimal Einzelkabel



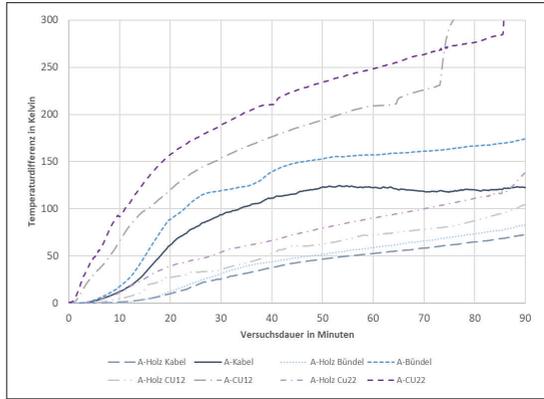
Tab. 11.11: Temperaturverläufe: Modul 160 mm, minimaler Abstand; Leitungen: Kabelbündel

160 mm minimal Kabelbündel

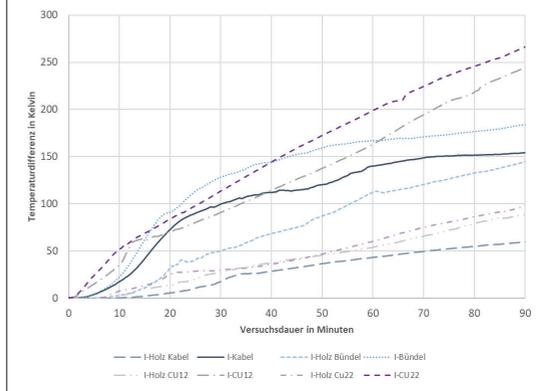


Tab. 11.12: Temperaturverläufe: Modul 160 mm, minimaler Abstand; Dichtmittel: Brandschutz-Acryl, Intumeszenzmasse, Steinwolle

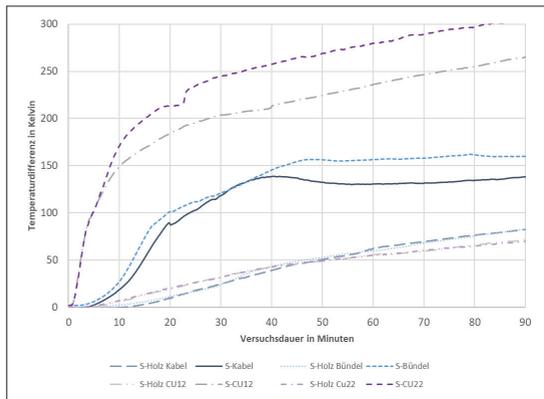
160 mm minimal Acryl



160 mm minimal Intumeszenz

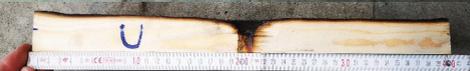


160 mm minimal Steinwolle



Anlage B: Abbrand Querschnitt um Einzelleitungen

Modul Nr.	Bilder: Jeweils Unterseite der Schnitte durch die Bohrungen	Leitung und Dichtmaterial, v. l. n. r
3		Leitung und Dichtmaterial, v. l. n. r Kabel Steinwolle, Kabel Intumeszenz, Kabel BS-Acryl
3		Kabelbündel Steinwolle, Kabelbündel Intumeszenz, Kabelbündel BS-Acryl
3		CU12 Gips, CU12 Steinwolle, CU12 Intumeszenz, CU12 BS-Acryl
4		CU22 BS-Acryl, CU22 Intumeszenz, CU22 Steinwolle
4		Kabel Gips, CU22 Gips, Kabelbündel Gips,
5		PVC32 Gips, PVC17 Gips
5		Kabel Gips, CU12 Gips, CU22 Gips

6		PVC32 BS-Acryl, PVC17 BS-Acryl
6		Kabel BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, CU22 BS-Acryl,
7		PVC32 Intumeszenz, PVC17 Intumeszenz
7		Kabel Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, CU22 Intumeszenz,
8		PVC32 Steinwolle, PVC17 Steinwolle
8		Kabel Steinwolle, CU12 Steinwolle, CU22 Steinwolle
9		PVC17 ohne

9		Kabel ohne, CU12 ohne, CU22 ohne
10		Kabel BS-Acryl, Bündel BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, CU22 BS-Acryl
10		Kabel Intumeszenz, Kabelbündel Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, CU22 Intumeszenz
10		Kabel Steinwolle, Kabelbündel Steinwolle, CU12 Steinwolle, CU22 Steinwolle
11		Stahlrohr160 Steinwolle
12		Kabel BS-Acryl, Kabelbündel BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, CU22 BS-Acryl
12		Kabel Intumeszenz, Kabelbündel Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, CU22 Intumeszenz
12		Kabel Steinwolle, Kabelbündel Steinwolle, CU12 Steinwolle, CU22 Steinwolle

Modul Nr.	Bilder der Oberseite der Schnitte durch die Bohrungen	Leitung und Dichtmaterial, v. l. n. r.
3		Leitung und Dichtmaterial, v. l. n. r. Kabel BS-Acryl, Kabel Intumeszenz, Kabel Steinwolle
3		Bündel BS-Acryl, Bündel Intumeszenz, Bündel Steinwolle
3		CU12 BS-Acryl, CU12 Intumeszenz, CU12 Steinwolle, CU12 Gips
4		CU22 Steinwolle, CU22 Intumeszenz, CU22 BS-Acryl
4		Kabelbündel Gips, CU22 Gips, Kabel Gips
5		PVC17 Gips, PVC32 Gips
5		CU22 Gips, CU12 Gips, Kabel Gips

6		PVC17 BS-Acryl, PVC32 BS-Acryl
6		CU22 BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, Kabel BS-Acryl
7		PVC17 Intumeszenz, PVC32 Intumeszenz
7		CU22 Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, Kabel Intumeszenz
8		PVC17 Steinwolle, PVC32 Steinwolle
8		CU22 Steinwolle, CU12 Steinwolle, Kabel Steinwolle
9		PVC17

9		<p>CU22 ohne, CU12 ohne, Kabel ohne</p>
10		<p>CU22 BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, Kabelbündel BS-Acryl, Kabel BS-Acryl</p>
10		<p>CU22 Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, Kabelbündel Intumeszenz, Kabel Intumeszenz</p>
10		<p>CU22 Steinwolle, CU12 Steinwolle, Kabelbündel Steinwolle, Kabel Steinwolle</p>
11		<p>Stahlrohr160 Steinwolle</p>
12		<p>CU22 BS-Acryl, CU12 BS-Acryl, Kabelbündel BS-Acryl, Kabel BS-Acryl</p>
12		<p>CU22 Intumeszenz, CU12 Intumeszenz, Kabelbündel Intumeszenz, Kabel Intumeszenz</p>
12		<p>CU22 Steinwolle, CU12 Steinwolle, Kabelbündel Steinwolle, Kabel Steinwolle</p>

Anlage C: Bewertung des Abbrands Querschnitte Einzelleitungen

Tabelle C.1

Bewertung des Einbrandes und der Verfärbung in den Bohrföhrungen

Oberseite der Bohrföhrer

Aufbau	Brandschurzart				Intumeszenzmaterial				Steinwolle				Gips		passend
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
Leitung															
Kabel	XX2/X1	XX2	X1	XXX3/XX2	X3	XX3	XX2	XXX3	X3/X2	XX3	XX3/X2	XX3/X2	X1	XX2/X1	XXX3
Kabelbündel	X2/X1		X2/X1	XXX3	X3	XX3	XXX3	XXX3	X2	XX3	XX3	XX3	X2/X1		
CU12	X3	X3	XX2/XX1	XX2	XXX3	XXX3	XXX3	XXX3	X3/X2	X2	XXX3/XX2	XX3/X2	X1	XX2/X1	XXX3
CU22	XX3/X2	XX3	XX3	XXX3	XX3	XX3	XXX3	XXX3	X3/X2	XX3	XX3/X2	XX3/X2	XX3/X2	XX3/X2	XXX3/XX3
PVC17	X1				X2				X1					XXX3/XXX3	XX2
PVC32	XX3				X3				XXX3					XXX3/XXX3	
Stahlrohr 160									XXX3						

Legende

- X Kante ist gerade (nahezu gerade an Abbrandebene)
- XX Kante teilweise schräg durch Abbrand
- XXX Kante komplett schräg durch Abbrand
- 1 nahezu keine Verkohlung
- 2 teilweise Verkohlung
- 3 komplette Verkohlung
- .../... links und rechts
- unterschiedliches Abbrand/ Verkohlungsverhalten

Unterseite der Bohrföhrer

Aufbau	Brandschurzart				Intumeszenzmaterial				Steinwolle				Gips		passend
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
Leitung															
Kabel	X3/XX3	X3/XX2	X2	X2/XX2	X3	XX2	XX3	XX3/XX2	X3	XX3/XX2	XX3	X3/XX3	X1	X3/XX2	XXX3
Kabelbündel	X1		X2	XXX3	X3	XX3	XXX3	XXX3	X2	XX3	XX3	XX3	X3/X2		
CU12	X1	X2	X2/XX3	XXX3	XXX3	XX2	XXX3	XXX3	X2	X3/X2	XX3/XXX3	X1	XX3/XX3	XXX3	XXX3
CU22	X3/X2	X3/XX3	XX3	XXX3	XX3	XX3	XXX3	XXX3	X3	XX3	XX3/X2	XX3/XX3	XX3/XX3	XX3/XX3	XXX3
PVC17	X1				X1				X1					XXX3/XXX3	XX2
PVC32	XX3/XX2				X2				XXX3/XX3					XXX3/XX3	
Stahlrohr 160									XXX3						

- I Modul 60 mm / 30 min
- II Modul 160 mm / 90 min
- III Modul 60 mm / 30 min; minimaler Abstand
- IV Modul 160 mm / 90 min; minimaler Abstand

- X1
- X2
- X3
- XX1
- XX2
- XX3
- XXX1
- XXX2
- XXX3

Abbrand / Verkohlung im Durchföhrungsbereich entspricht dem Abbrand auf der Fläche.
 Kein zusätzlicher Einbrand im Durchföhrungsbereich. Verkohlung im Ringspalt nicht bis zur unbeflammten Seite
 kein zusätzlicher Einbrand allerdings (starke) durchgehende Verfärbung der Bohrföhrungsleitung.
 nicht möglich.
 Moderater zusätzlicher Einbrand. Verkohlung im Ringspalt von nicht bis zur unbeflammten Seite.
 nicht möglich.
 Moderater zusätzlicher Einbrand. Verfärbung der gesamten Bohrföhrungsleitung bis zur unbeflammten Seite.
 nicht möglich.
 Abbrand bis zur unbeflammten Seite.

Tabelle C.2

Abgleich des Einbrandes und der Verfärbungen mit der Richtung der exzentrischen Anordnung

Oberseite der Bohrröhre

Aufbau	Brandschutz-Acryl				Intumeszenzmasse				Steinwolle				Gips		passend
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
Leitung	XZ/X1	XX2	X1	XXX3/XX2	X3	XXX3	XX2	XXX3	X3/X2	XX3	XX3/X2	XX3/X2	X1	XX2/X1	XXX3
Kabel	XZ/X1	XX2	X1	XXX3/XX2	X3	XXX3	XX2	XXX3	X3/X2	XX3	XX3/X2	XX3/X2	X1	XX2/X1	XXX3
Kabelbündel	X3	X3	XZ/X1	XX2	XXX3	XXX3	XXX3	XXX3	X3/X2	X2	XX3/XX2	X3/X2	X1	XX2/X1	XXX3
CU12	X3	XX3/XX2	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	X3/X2	XX3	XX3/XX2	XX3/XX2	XXX3/XX2	XX3/XX3	XXX3/XX3
CU22	X1	XX3	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	X1	XX3	XX3/XX3	XX3/XX3	XX2	XX3/XX3	XX2
PV C17	X1	XX3	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	XX3	XX3	XX3/XX3	XX3/XX3	XX2	XX3/XX3	XX2
PV C32	X3	XX3	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	XX3	XX3	XX3/XX3	XX3/XX3	XX2	XX3/XX3	XX2
Stahlrohr 160								XXX3							

Unterseite der Bohrröhre

Aufbau	Brandschutz-Acryl				Intumeszenzmasse				Steinwolle				Gips		passend
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	
Leitung	X3/XX3	X3/XX2	X2	XX2/XX2	X3	XX2	XX3	XX3/XX2	X3	XX3/XX2	XX3	XX3/XX3	X1	XX3/XX2	XXX3
Kabel	X3/XX3	X3/XX2	X2	XX2/XX2	X3	XX2	XX3	XX3/XX2	X3	XX3/XX2	XX3	XX3/XX3	X1	XX3/XX2	XXX3
Kabelbündel	X1	X2	XX3	XXX3	X3	XX3	XX3	XXX3	X2	X3/XX2	X3/XX3	XX3/XXX3	X1	X3/XX3	XXX3
CU12	X1	X2	XX3	XXX3	XX3	XX3	XXX3	XXX3	X2	X3/XX2	X3/XX3	XX3/XXX3	X1	X3/XX3	XXX3
CU22	X3/XX2	X3/XX3	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	X3	XX3	XX3/XX2	XX3/XX3	XX3/XX3	XX3	XX3
PV C17	X1	XX3	XX3	XXX3	XX3	XXX3	XXX3	XXX3	X1	XX3	XX3/XX3	XX3/XX3	XX2	XX3	XX2
PV C32	XX3/XX2							XXX3						XX3	XX2
Stahlrohr 160								XXX3							



Unterschiedlicher seitlicher Abbrand spiegelt Richtung der exzentrischen Anordnung wider
 Unterschiedlicher seitlicher Abbrand passt nicht zur exzentrischen Anordnung
 Lage der Leitung in der Durchführung nicht eindeutig zuzuordnen

Legende

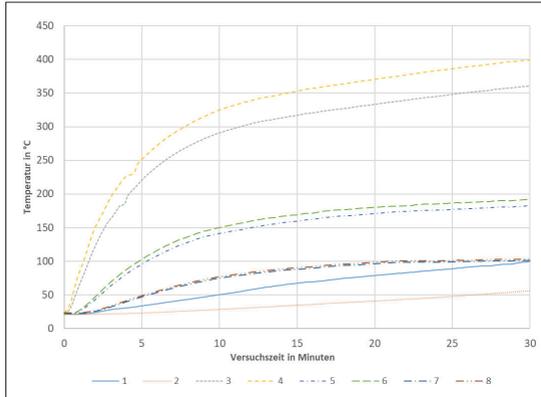
- X Kante ist gerade (nahezu gerade an Abbrandebene)
- XX Kante teilweise schräg durch Abbrand
- XXX Kante komplett schräg durch Abbrand
- 1 nahezu keine Verkohlung
- 2 teilweise Verkohlung
- 3 komplette Verkohlung
- .../... links und rechts
- unterschiedliches Abbrand/ Verkohlungsverhalten

- I Modul 60 mm / 30 min
- II Modul 160 mm / 90 min
- III Modul 60 mm / 30 min; minimaler Abstand
- IV Modul 160 mm / 90 min; minimaler Abstand

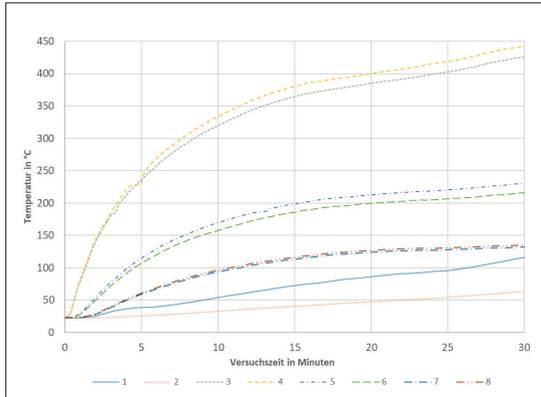
Anlage D: Temperaturverläufe metallische Leitungen

Tab. 11.13: Temperaturverläufe: Holzmodul, 60 mm, Kupferrohre, Ringspalt verschlossen

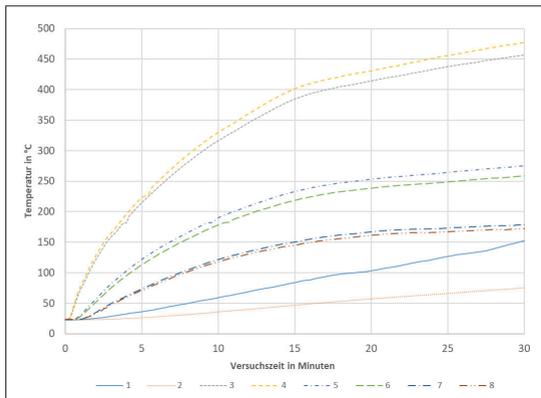
H60Cu12v



H60Cu22v

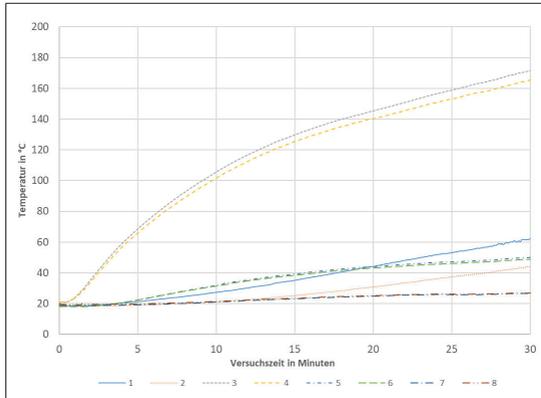


H60Cu42v

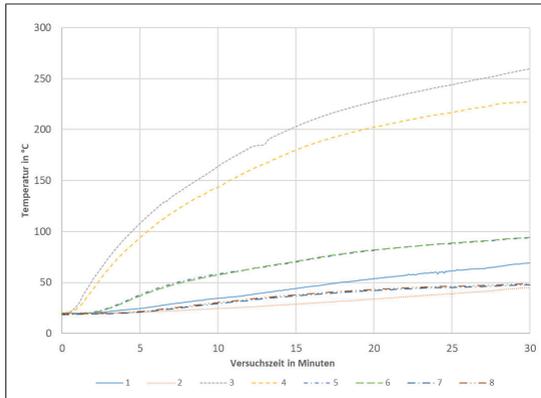


Tab. 11.14: Temperaturverläufe: Holzmodul, 60 mm, Stahlrohre, Ringspalt verschlossen

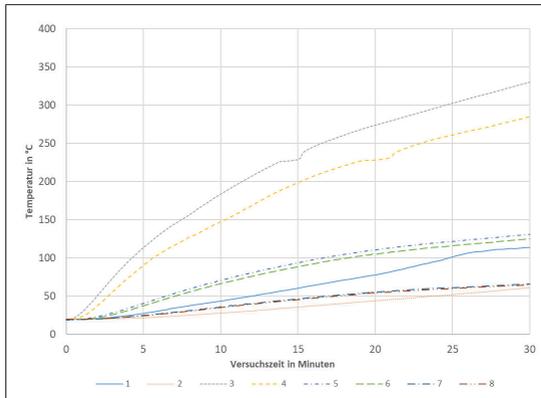
H60St12v



H60St22v

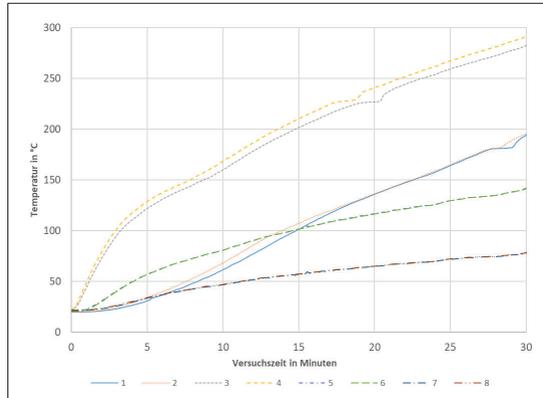


H60St42v

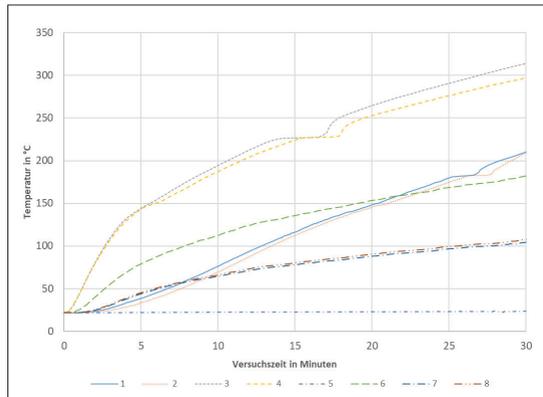


Tab. 11.15: Temperaturverläufe: Betonmodul, 60 mm, Kupferrohre, Ringspalt verschlossen

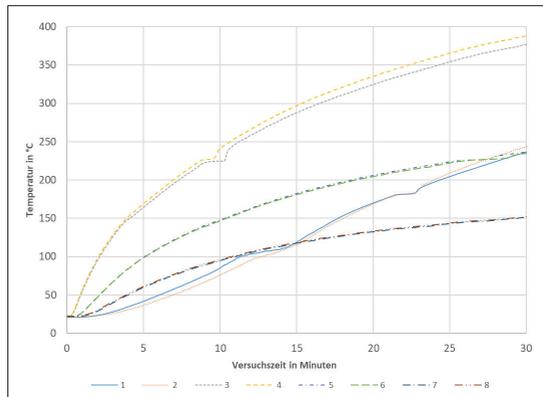
B60Cu12v



B60Cu22v

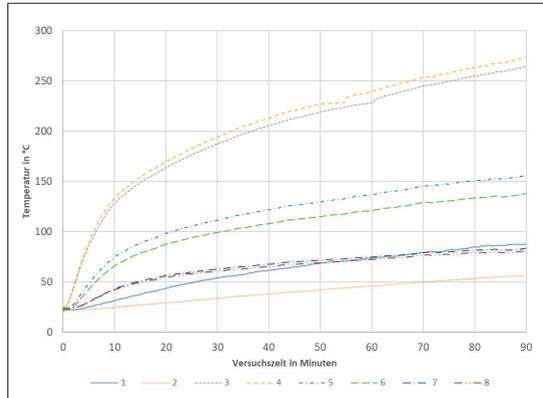


B60Cu42v

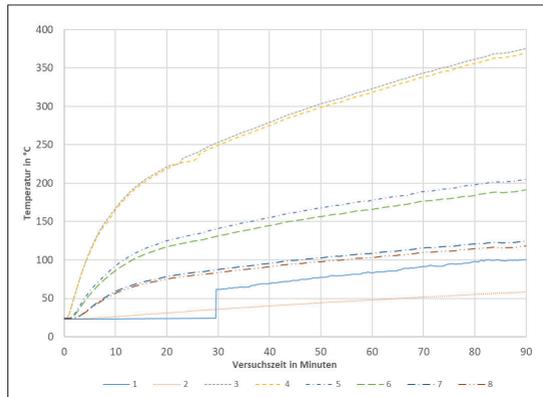


Tab. 11.16: Temperaturverläufe: Holzmodul, 160 mm, Kupferrohre, Ringspalt verschlossen

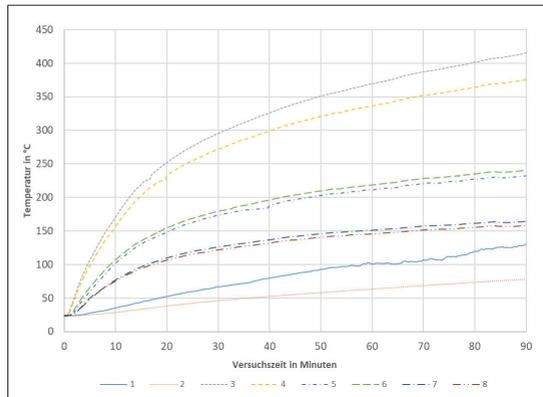
H160Cu12v



H160Cu22v

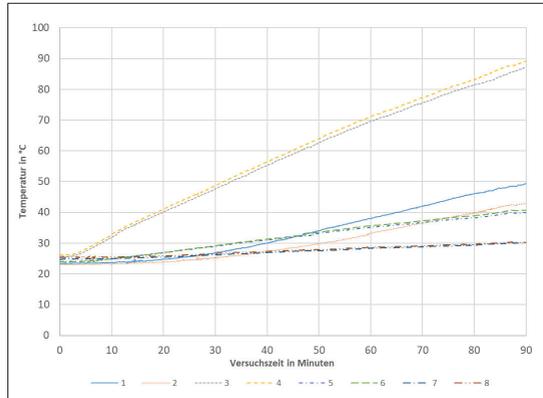


H160Cu42v

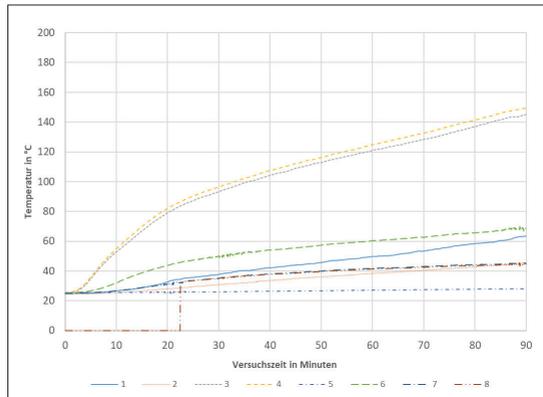


Tab. 11.17: Temperaturverläufe: Holzmodul, 160 mm, Stahlrohre, Ringspalt verschlossen

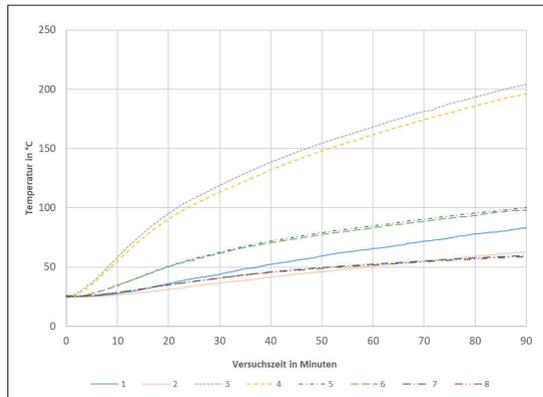
H160St12v



H160St22v

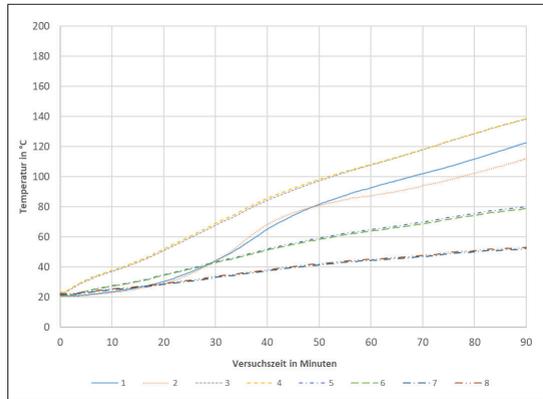


H160St42v

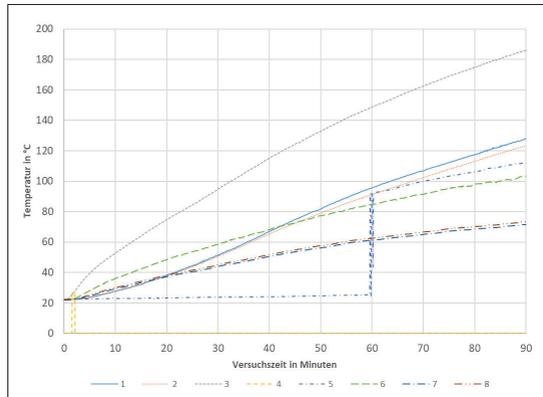


Tab. 11.18: Temperaturverläufe: Betonmodul, 160 mm, Kupfer- und Stahlrohre, Ringspalt verschlossen

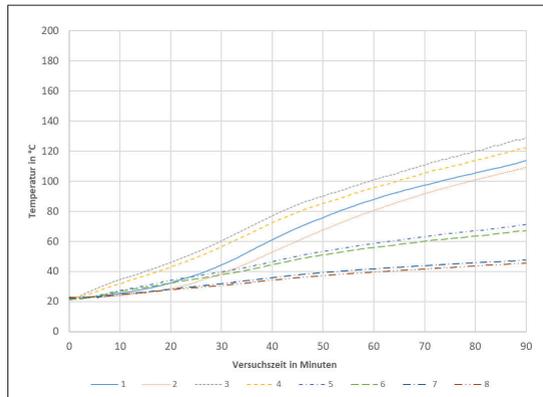
B160Cu12v



B160Cu22v



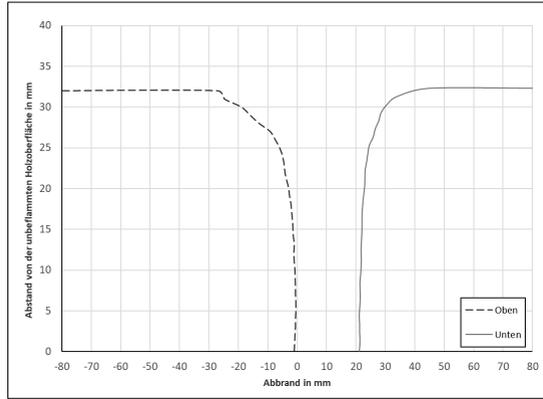
B160St42v



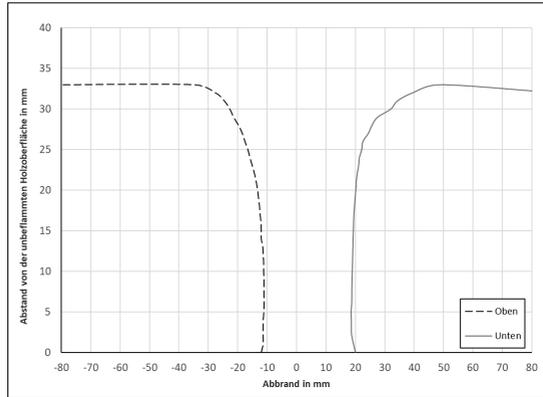
Anlage E: Abbrandtrichter metallische Leitungen

Tab. 11.19: Abbrandtrichter H60CuV

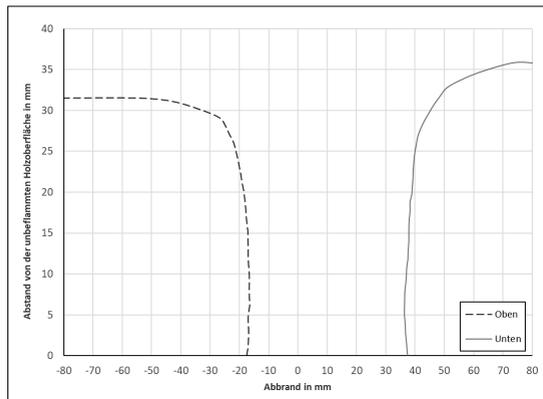
∅ 12



∅ 22

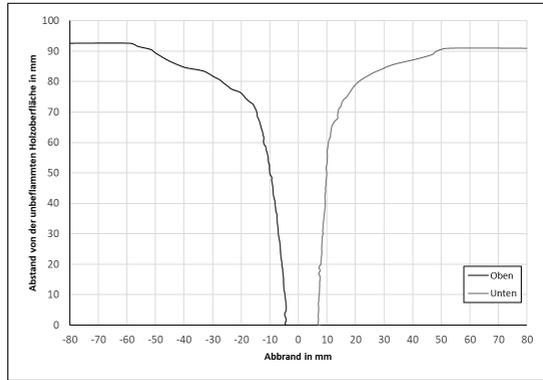


∅ 42

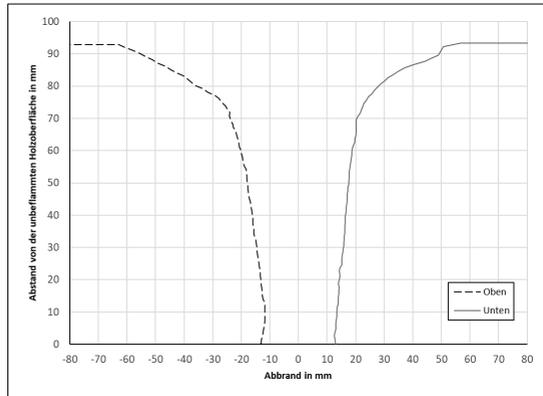


Tab. 11.20: Abbrandtrichter H160CuV

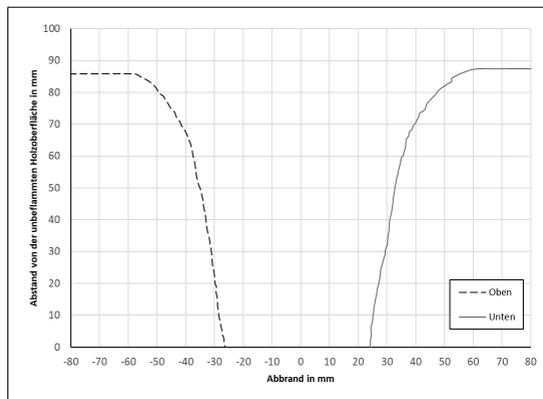
∅ 12



∅ 22

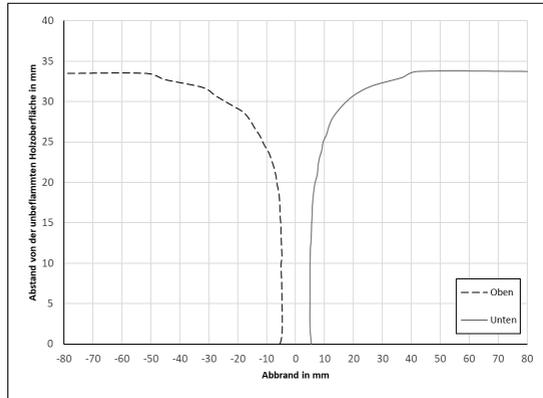


∅ 42

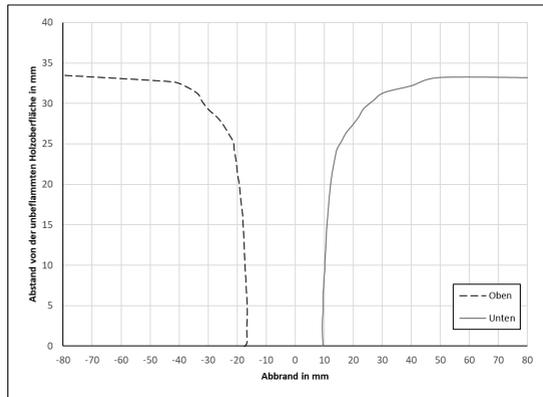


Tab. 11.21: Abbrandtrichter H60StV

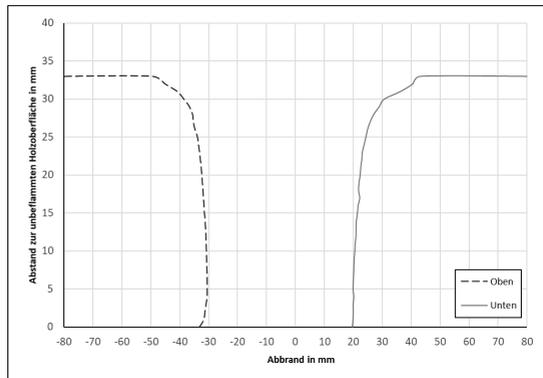
∅ 12



∅ 22

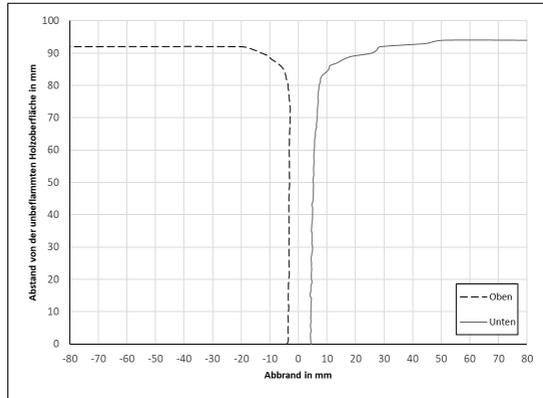


∅ 42

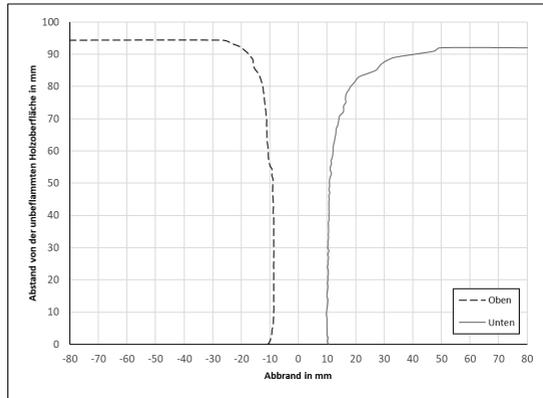


Tab. 11.22: Abbrandrichter H160StV

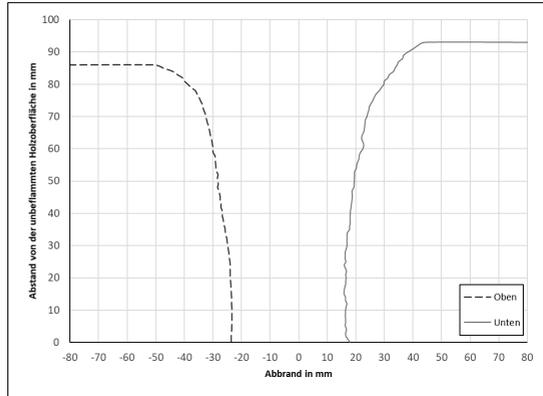
∅ 12



∅ 22



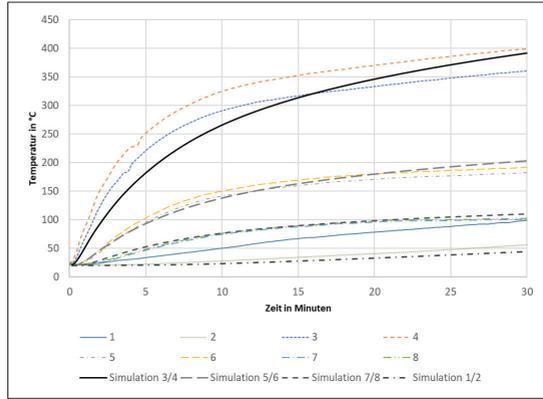
∅ 42



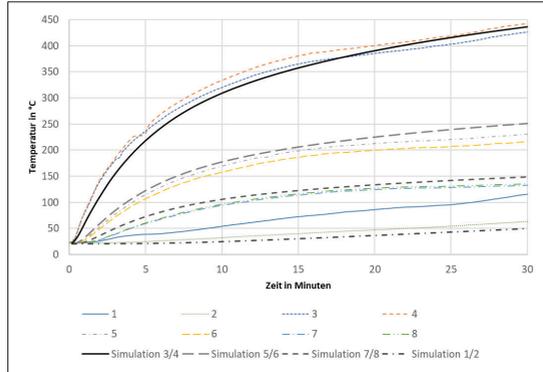
Anlage F: Simulationsergebnisse Temperaturen Kupferleitungen

Tab. 11.23: Simulationsergebnisse Temperatur H60CuV

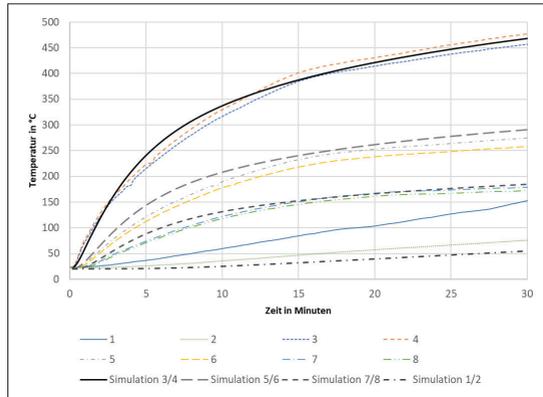
∅ 12



∅ 22

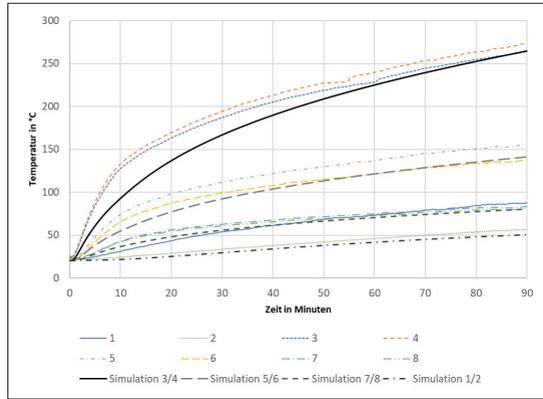


∅ 42

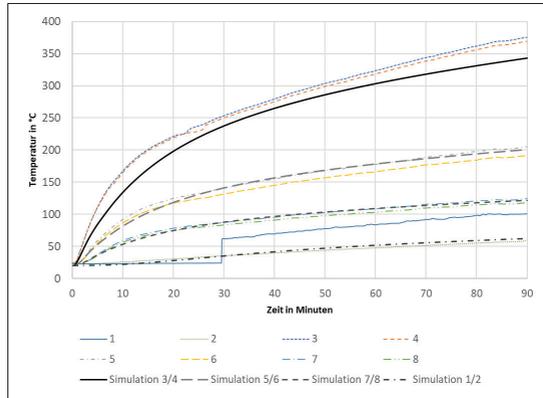


Tab. 11.24: Simulationsergebnisse Temperatur H160CuV

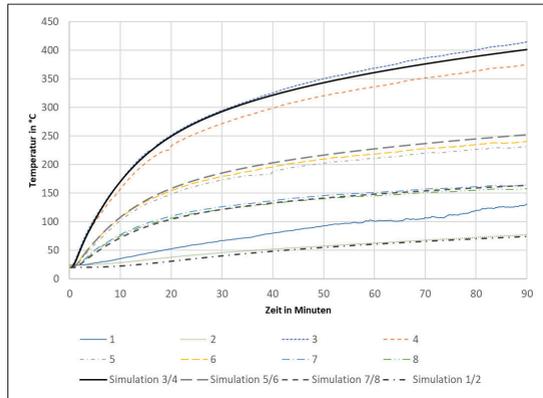
∅ 12



∅ 22



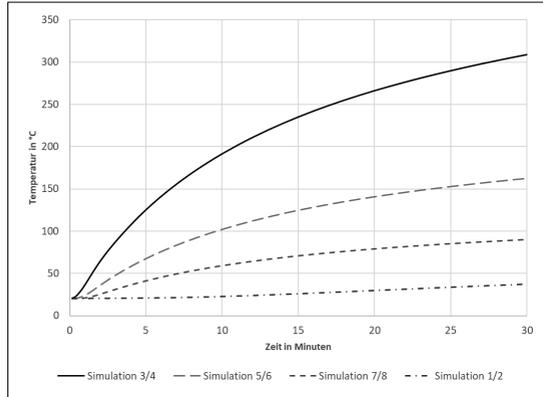
∅ 42



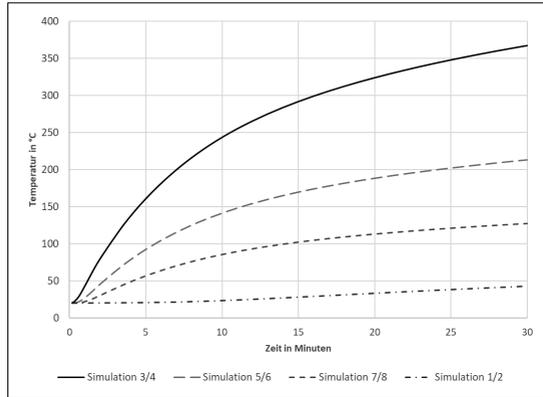
Anlage G: Simulationsergebnisse Moduldicken

Tab. 11.25: Simulationsergebnisse Temperaturen Moduldicke 90 mm

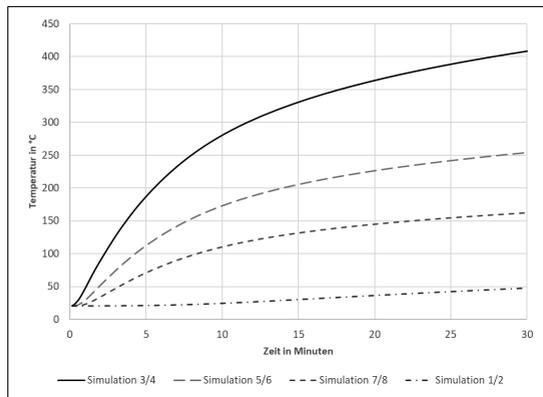
∅ 12



∅ 22

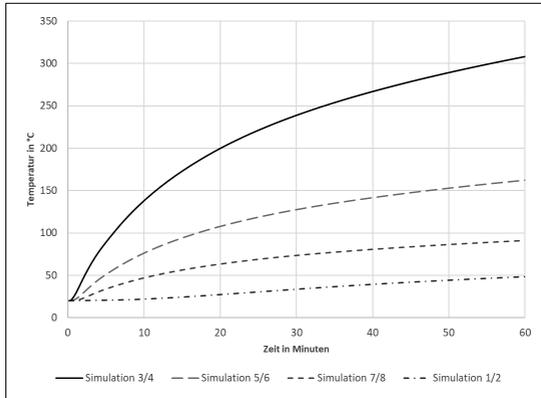


∅ 42

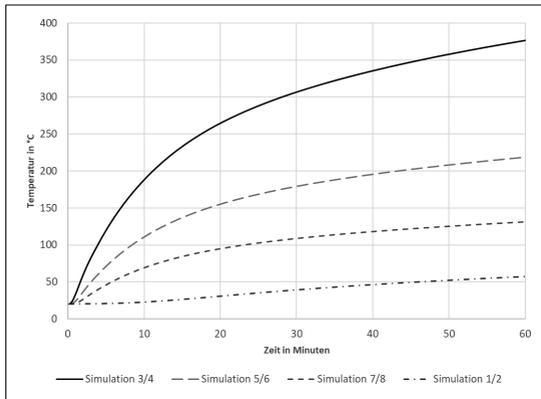


Tab. 11.26: Simulationsergebnisse Temperaturen Moduldicke 120 mm

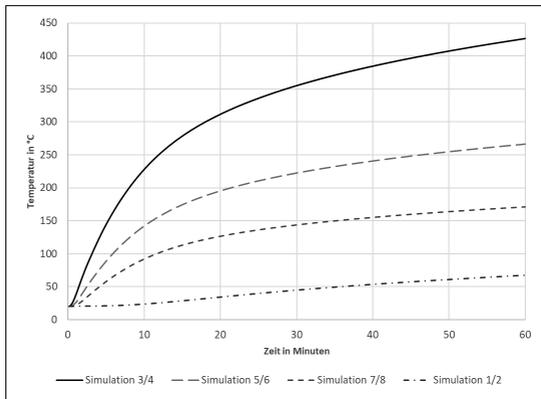
∅ 12



∅ 22



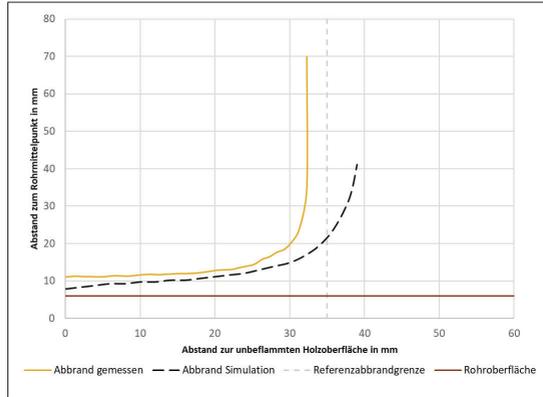
∅ 42



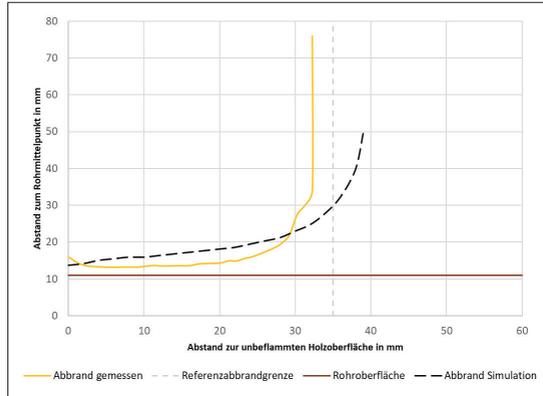
Anlage H: Simulationsergebnisse Abbrand Kupferleitungen

Tab. 11.27: Simulationsergebnisse Abbrand H60CuV

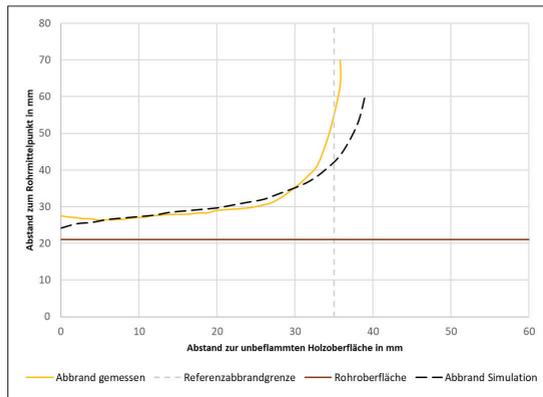
∅ 12



∅ 22

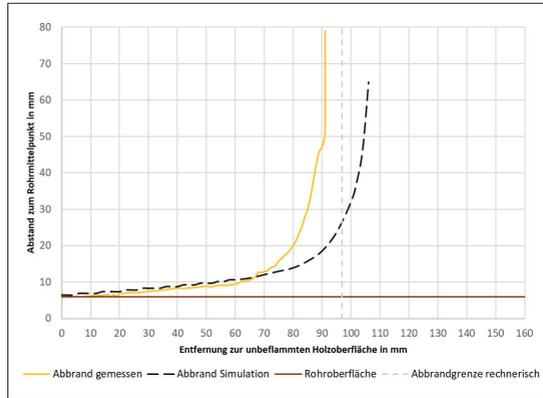


∅ 42

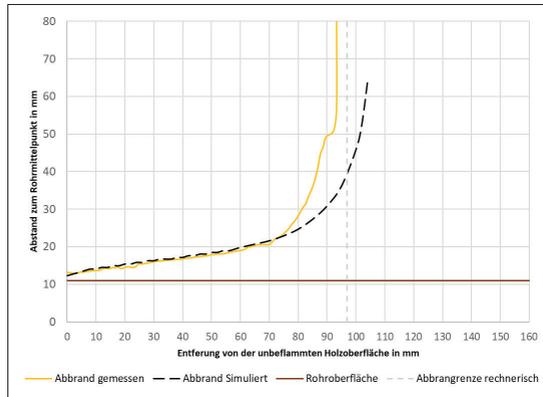


Tab. 11.28: Simulationsergebnisse Abbrand HI60CuV

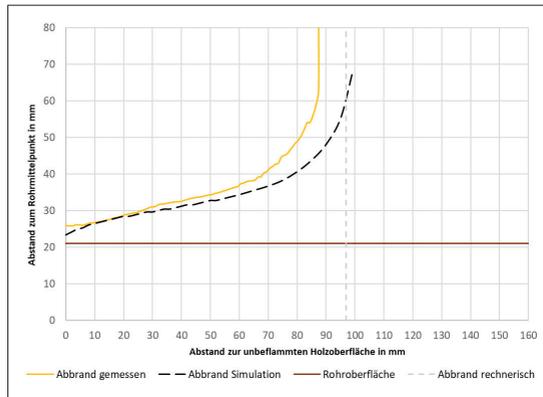
∅ 12



∅ 22



∅ 42



Veröffentlichungen:

Scherer, Thomas, Thiele, Catherina und Lorenz, Dirk. "Sealing of service penetrations in timber buildings utilizing timber in timber installation". In: fib - Fédération Internationale du Béton International Federation for Structural Concrete (Hg.) 2020 – No. 50. Proceedings, S. 102–109.

Scherer, Thomas, Thiele, Catherina und Lorenz, Dirk. 2020 „Leitungsdurchführungen im Holzbau“. In: Bauen+, 6, 5/2020, S.15 – 20.

Scherer, Thomas u. a. „Untersuchung von Leitungsdurchführungen im Holzbau_und Versuchserkenntnisse des Ansprechverhaltens von Holzbauteilen hinsichtlich des Löscherfolgs“. 2020. In: vfdb Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 69, 1/2020, S. 9 – 14.

Lorenz, Dirk, Götz, Winter und Scherer, Thomas. *Studienbrief Baustoffe für den Fernstudiengang Brandschutzplanung des DISC (TU Kaiserslautern)*, Kaiserslautern, 2019.

Scherer, Thomas u. a. *Leitungsdurchführungen im Holzbau Abschlussbericht LeitHolz*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019. ISBN: 978-3-7388-0411-9.

Scherer, Thomas, Peifer Philipp und Lorenz, Dirk. 2019. „Neuerungen im Bauproduktenrecht - praxistauglich? aBG, abZ, ETA, abP, ZIE, vBG, Ü, CE, etc.: Die Verwirrung um Nachweise“ In: Technische Sicherheit 9, 9/2019. S.

Scherer, Thomas, Thiele, Catherina und Lorenz, Dirk. „Leitungsdurchführungen im Holzbau“ In: 6th Symposium Structural Fire Engineering - TU Braunschweig 2019, Braunschweig, 2019. ISBN:978-3-906226-24-8.

Scherer, Thomas, Thiele, Catherina und Lorenz, Dirk. „LeitHolz - Leitungsabschottungen im Holzbau“ In: 10. HolzbauSpezial Bauphysik & Gebäudetechnik 2019 am 12./13. März 2019 in Bad-Wörishofen (Tagungsband), Biel (Schweiz), 2019. S. 275 – 284.

Scherer, Thomas, Diewald, Philipp und Lorenz, Dirk. 2018. „Dokumentation brandschutztechnisch relevanter Daten“ In: Technische Sicherheit 8, 9/2018. S. 10 – 16.

Scherer, Thomas, Diewald, Philipp und Lorenz, Dirk. „Baulicher Brandschutz Anforderungen an Flucht- und Rettungswege“ In: statikus Das Kundenmagazin von Schöck (Hg.) 1/2017, S. 14 – 17. Baden-Baden, 2017.

Ausbildung:

Studium:

seit 02/2018	Promotionsstudent (Baulicher Brandschutz)
10/2017	Facility Management, Master M. Sc.
09/2016-12/2016	Auslandsstudium Edinburgh Napier University
10/2015	Facility Management, Bachelor B. Sc.
seit 10/2011	Technische Universität Kaiserslautern

Schule:

08/2002-04/2011	Hugo-Ball-Gymnasium in Pirmasens
-----------------	----------------------------------

Stipendien und Preise:

10/2015-10/2017	Stipendiat „Deutschlandstipendium“
11/2015	“Bilfinger HSG Facility Management Preis 2015”
10/2012-09/2014	Stipendiat „Deutschlandstipendium“

Erfahrung:

04/2018-02/2021	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Fachgebiet Baulicher Brandschutz und Massivbau und Baukonstruktion TUK
seit 11/2017	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Fachgebiet Baulicher Brandschutz TUK
seit 02/2017	Wissenschaftliche Hilfskraft Fachgebiet Baulicher Brandschutz
05/2016-07/2016	Tutor für die Lehrveranstaltung „Präsentationstechniken“ beim Fachbereich Bauingenieurwesen
03/2016-07/2016	Wissenschaftliche Hilfskraft Baulicher Brandschutz
09/2014-11/2014	CANZLER INGENIEURE GmbH (Frankfurt am Main)
10/2012-4/2013	Mathe Tutor als studentische Hilfskraft

Sprachkenntnisse:

Deutsch (Muttersprache)
Englisch (fließend/C1)
Französisch (Grundkenntnisse)

Sonstiges:

10/2015-07/2016	Zertifizierter Soft Skills-Trainer (Präsentationstechniken)
-----------------	---

Schriftenreihe Baulicher Brandschutz

bereits veröffentlicht wurden

- 01 Philipp Diewald: Entwicklung eines Konzepts für Brandmeldeanlagen mit erhöhtem Aussagevermögen
ISBN 978-3-95974-024-1
198 Seiten; erschienen am 15.03.2017 € 25,-
- 02 Dirk Lorenz, Thomas Höhne: Bericht zum Forschungsprojekt: Brandschutz im Schulbau
ISBN 978-3-95974-078-4
122 Seiten; erschienen am 05.01.2018 € 25,-
- 03 Thomas Scherer: Untersuchungen zu Leitungsdurchführungen durch Holzbauteile im Brandfall
ISBN 978-3-95974-148-4
250 Seiten; erschienen am 01.04.2021 € 25,-

Technische Universität Kaiserslautern | Fachgebiet Baulicher Brandschutz | Gottlieb-Daimler-Straße | 67663 Kaiserslautern

ISSN: 2509-4742
ISBN: 978-3-95974-148-4