

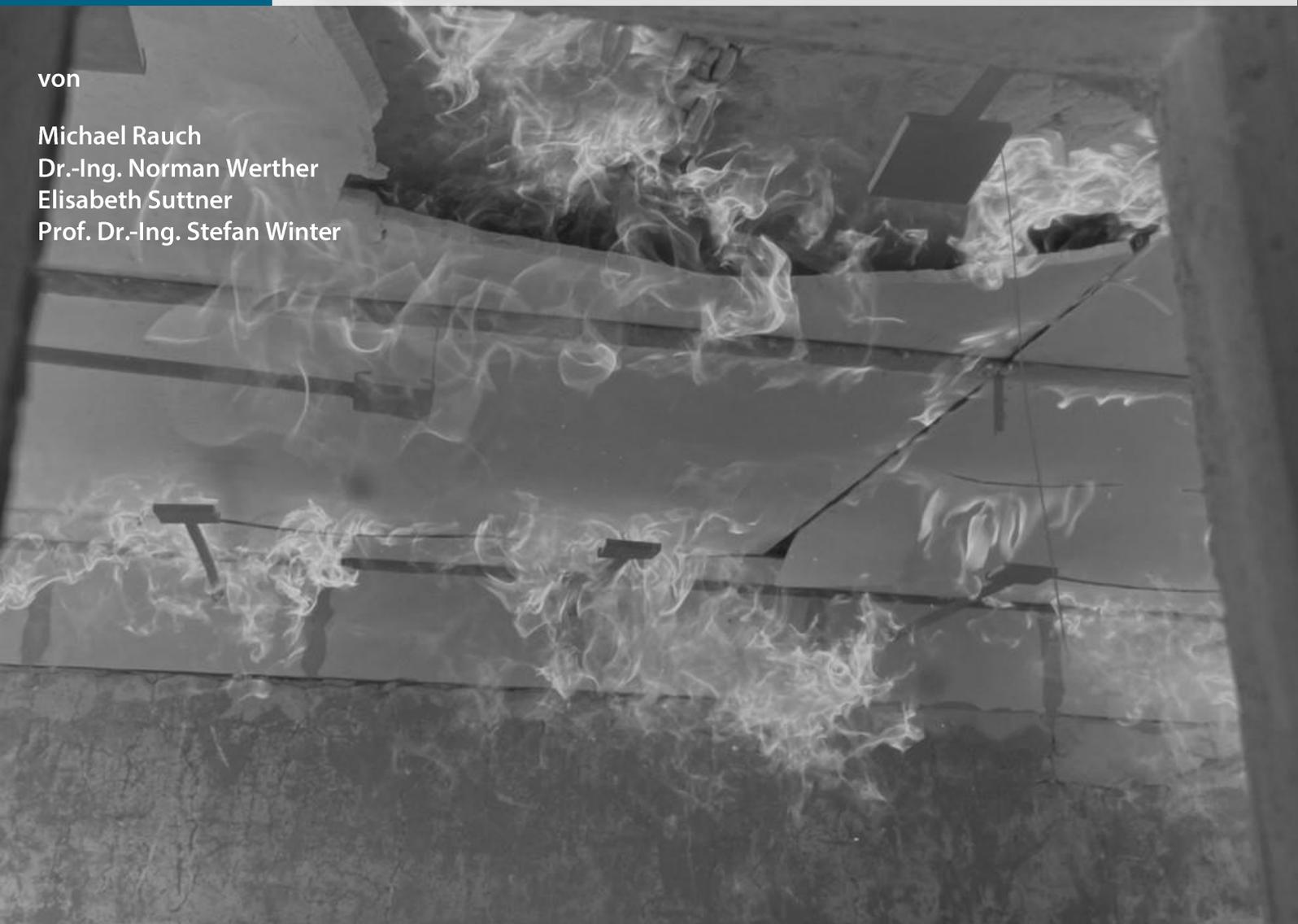
BBSR-
Online-Publikation
24/2022

F-REI 90

Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile

von

Michael Rauch
Dr.-Ing. Norman Werther
Elisabeth Suttner
Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter



F-REI 90

Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.38

Projektlaufzeit: 01.2019 bis 11.2021

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Michael Rauch, M. Sc.
m.rauch@tum.de

Dr.-Ing. Norman Werther
n.werther@tum.de

Elisabeth Suttner, M. Sc.
elisabeth.suttner@tum.de

Stand

Juni 2022

Gestaltung

Michael Rauch
Elisabeth Suttner

Bildnachweis

Titelbild: Michael Rauch
L. Goth: S. 41; M. Mändl: S. 56; M. Rauch: S. 34, 35, 37, 41 (Abb. 36, 37), 50, 51, 53, 57, 58, 59, 60, 61, 71, 85; Abb. 34, 35

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Rauch, Michael; Werther, Norman; Suttner, Elisabeth; Winter, Stefan: F-REI 90: Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. BBSR-Online-Publikation 24/2022, Bonn, Juni 2022.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	6
Kurzfassung	7
Abstract	8
1 Einführung	9
1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens	9
1.2 Zweck und Ziel des Projekts	9
1.3 Abgrenzung	9
1.4 Forschungsergebnisse und der erwartete Nutzen	10
1.5 Ergebnistransfer	10
2 Grundlagenermittlung	11
2.1 Baurechtliche Grundlagen	11
2.2 Rechnerische Nachweisverfahren	13
2.3 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit	15
2.4 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Raumabschlusses	20
3 Voruntersuchungen	24
3.1 Darstellung der Anwendungsgrenzen rechnerischer Nachweismethoden	24
3.2 Zusammenstellung und Auswertung der durch die Industrie zur Verfügung gestellten Bauteilversuche	27
3.3 Bedarfsanalyse der Baupraxis in Gebäudeklasse 5	29
4 Erweiterungskonzept für rechnerische Nachweise bis zur GK 5	30
4.1 Allgemeines	30
4.2 Konzept zur Modifikation und Erweiterung vorbenannter Rechenmodelle	30
4.3 Lückenanalyse und Lösungskonzept	31
4.4 Qualitative Bewertung von Einzelschichten	31
5 Experimentelle Untersuchung	33
5.1 Grundlagen zur experimentellen Untersuchung	33
5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Vergleich von Dämmstoffen	35
5.3 Experimentelle Untersuchungen zu den Abbrandraten von Holzwerkstoffplatten	39
5.4 Experimentelle Untersuchungen zur Durchwärmung und zum Versagen von Gipsplatten	43
5.5 Experimentelle Untersuchungen zu Estrichaufbauten und Dämmstoffen mit hohen Rohdichten	52
5.6 Experimentelle Untersuchungen zu Elektroeinbauteilen	55
5.7 Experimentelle Ergebnisse herstellereinspezifischer Bauteilprüfungen	58
6 Ein numerisches Simulationsmodell zur thermischen Analyse	59
6.1 Grundlagen	59
6.2 Thermische Materialkennwerte für die numerische Simulation	59
6.3 Ein thermisches Simulationsmodell für raumabschließende Holztafelbauelemente	61
6.4 Simulationsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung	63

7	Ergebnisse und Ableitung analytischer Ansätze	64
7.1	Ergebnisse für Einzelschichten	64
7.2	Ergebnisse für lange Brandbeanspruchungen	77
7.3	Ein überarbeiteter analytischer Berechnungsansatz für Brettspertholz­wände	78
7.4	Die Auswirkung von Einbauteilen auf den Raumabschluss	82
8	Ergebniszusammenstellung	84
8.1	Ein erweitertes Modell für den Raumabschluss	84
8.2	Diskussion des Modells zur Bestimmung der Tragfähigkeit	87
9	Beispielnachweise	88
9.1	Vorbemerkung	88
9.2	Bauteilaufbau	88
9.3	Raumabschluss der Wandseite A	89
9.4	Tragfähigkeit der Wandseite A	96
9.5	Raumabschluss der Wand Seite B	103
9.6	Tragfähigkeit der Wandseite B	103
10	Zusammenfassung und Ausblick	106
11	Mitwirkende	108
12	Verzeichnisse	110
12.1	Literaturverzeichnis	110
12.2	Abbildungsverzeichnis	115
12.3	Tabellenverzeichnis	119

Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde mit finanzieller Unterstützung des Innovationsprogramms Zukunft Bau durchgeführt. Zusätzliche Unterstützung in finanzieller Art, sowie durch die Lieferung von Material oder die Zurverfügungstellung von Prüfergebnissen erfolgte durch die Beteiligung folgender Industriepartner:

- Holzbau Deutschland-Institut e.V., Berlin
- Studiengemeinschaft Holzleimbau, Wuppertal
- Gump & Maier GmbH, Binswangen
- MFPA Leipzig
- Knauf Gips KG, Iphofen
- James Hardie Europe GmbH, Düsseldorf
- Saint-Gobain Rigips GmbH, Bodenwerder
- Egger Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG
- Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Gladbeck
- Saint-Gobain Isover G+H AG, Ludwigshafen

Hierfür möchten wir uns besonders bedanken, da dieses Forschungsprojekt nur in enger Zusammenarbeit mit der Praxis und deren Unterstützung umgesetzt werden konnte.

Besonderer Dank gilt außerdem den studentischen Hilfskräften des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion an der TU München für die tatkräftige Unterstützung des Forschungsvorhabens sowie den Studierenden, die durch Abschlussarbeiten einen wichtigen Beitrag zum Forschungsprojekt beitrugen.

Kurzfassung

Durch seine positiven ökologischen Eigenschaften gewinnt der nachwachsende und somit ressourceneffiziente Baustoff Holz zunehmend an Bedeutung im mehrgeschossigen Bauen. Die Eurocodes mit rechnerischen Nachweisverfahren zur brandschutztechnischen Bauteilbemessung werden zeitgleich zur Laufzeit dieses Forschungsvorhabens novelliert. Um die höheren brandschutztechnischen Anforderungen der mehrgeschossigen Holzgebäude nachzuweisen, ist eine Erweiterung der Berechnungsverfahren bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erforderlich. Eine Analyse der bestehenden Rechenmethoden zeigt, dass die „Component Additive Method“ eine geeignete Basis zur Bestimmung der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen darstellt und auf eine Anwendung bis 90 Minuten Feuerwiderstand erweitert werden kann. Die dort ermittelten Schutzzeiten der Einzelschichten bilden die Grundlage zur Bestimmung des Abbrandes von tragenden Holzbauteilen und beeinflussen somit maßgeblich das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit.

Ausgehend von der Analyse der Berechnungsverfahren wird ein Erweiterungskonzept für die „Component Additive Method“ vorgeschlagen. Hierfür wurden experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Schutzzeiten von Holzwerkstoffplatten, Gipsplatten, Estrichaufbauten und dem Einfluss von Einbauteilen auf den Feuerwiderstand durchgeführt. Ein parallel zum Forschungsprojekt laufendes Promotionsvorhaben lieferte die theoretische Basis für ein Optimierungsverfahren von effektiven Materialparametern und ein optimiertes Simulationsmodell. In Kombination mit den experimentellen Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens konnten praktisch anwendbare Bestimmungsgleichungen für Schutzzeiten von Einzelschichten ermittelt werden.

Für Brettsperrholzbauteile wurde das bestehende Stufenmodell für Deckenbauteile optimiert und zur Anwendung auf Wandbauteile erweitert. Somit sind wirtschaftlichere Bemessungsansätze möglich.

Alle Ergebnisse wurden mit den Methoden des Entwurfs zur prEN 1995-1-2 abgeglichen, so dass eine direkte Kompatibilität zu den zukünftigen normativen Berechnungsmethoden besteht. Hierfür wurden folgende Ansätze entwickelt:

- Ein homogenisiertes Modell zur Bestimmung des Abbrandes bzw. der Schutz- und Isolationszeiten von Holz- und Holzwerkstoffplatten.
- Optimierte Bestimmungsgleichungen zur Ermittlung der Schutzzeiten von Gipsplatten sowie Gipsfaserplatten.
- Neue Bestimmungsgleichungen zur Berücksichtigung von Estrichaufbauten in den Berechnungsverfahren sowie zur Beurteilung von Deckenbauteilen bei einer Brandbeanspruchung von der Oberseite.
- Randabstände sowie Hinterlegungsvorschläge für Einbauteile in Holztafelbauelementen.
- Eine Stufenmodell zur optimierten Berechnung des Abbrandes von Brettsperrholzwänden.
- Validierung der Ansätze für lange Brandbeanspruchungen (90 min Feuerwiderstand).

Neben der Untersuchung der Einzelschichten wird ein schrittweises Berechnungsbeispiel vorgestellt.

Der additive Modellansatz ermöglicht es, zukünftige Erkenntnisse sowie neue Materialien in das Berechnungsmodell zu implementieren und somit die Bemessungsmethodik kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Abstract

Due to its beneficial ecological footprint, the renewable and thus resource-efficient building material wood is becoming increasingly important for multi-storey timber buildings. The Eurocodes with calculation methods for timber assemblies under fire exposure were further developed at the same time as this research project. According to higher fire safety requirements of multi-storey timber buildings, the calculation methods must be extended up to a fire resistance of 90 minutes. An analysis of the existing calculation methods shows that the "Component Additive Method" is a suitable basis to determine the separating function of timber building and can be extended up to 90 minutes fire resistance. Protection times of individual layers determined by this method also form the basis for the start time of charring of timber elements and thus these results significantly influence the load-bearing capacity of timber assemblies.

Based on the analysis of the calculation methods, an optimised approach for the "Component Additive Method" is proposed. For this purpose, experimental investigations were carried out to determine the protection times of wood-based panels, gypsum boards, screed structures and the influence of sockets. A PhD project running parallel to the research project provides the theoretical basis for an optimization method of effective material parameters and an extended simulation model. In combination with the experimental results of this research project, practically applicable equations for protection times of single layers could be determined.

For CLT- elements, the existing step model for floors is extended for the application to walls. Thus, more economical design approaches are possible.

All results were compared with the methods of the draft prEN 1995-1-2 to ensure direct compatibility with the future normative calculation methods. The following approaches were developed for this purpose:

- A homogenized model to determine the charring, the protection times and insulation times of wood and wood-based panels.
- Optimised equations for the determination of the protection times of Type F- gypsum boards as well as gypsum fibre boards.
- New equations to determine the contribution of screed layers to the fire resistance of floor constructions are proposed.
- Edge distances and backing materials for sockets in timber frame assemblies are investigated.
- A step model for the optimized calculation of the charring of CLT- walls.
- Validation of the calculation methods for long fire exposure (90 min).

In addition to the study of the individual layers, a step-by-step calculation example is presented. The additive model approach enables the implementation of future results and new materials in the calculation model and thus this design methodology to be continuously developed.

1 Einführung

1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Ein gesteigertes ökologisches Bewusstsein verbunden mit den Vorteilen der Holzbauweise und den geforderten Verdichtungen im urbanen Raum führen dazu, dass der Holzbau zunehmend für mehrgeschossige Gebäude bis zur Hochhausgrenze nachgefragt wird. Trotz der vielen Vorteile dieser Bauweise ist Holz ein brennbarer Baustoff, der einerseits im Brandfall mit zunehmender Dauer der Brandbeanspruchung seine Festigkeit bzw. Steifigkeit verliert – das gilt genauso für andere nichtbrennbare Baustoffe - und andererseits im ungeschützten Zustand einen zusätzlichen Beitrag zum Brand leisten kann. Baurechtlich werden brennbare und nichtbrennbare Baustoffe somit auch unterschiedlich behandelt. Seit Jahrzehnten existierende baurechtliche Anforderungen und Nachweismethoden bilden allerdings den aktuellen technologischen Stand des Holzbaus nicht ausreichend ab und führen bei Planung und Ausführung häufig zu Diskussionen und Unklarheiten. Durchgeführte Forschungsprojekte und Referenzbeispiele wie der Prinz-Eugen-Park (Hafner et al. 2017) in München zeigen deutlich die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Holz. Gegenwärtige Entwicklungen im Baurecht ermöglichen durch die Novellierung der Bauordnungen und die Veröffentlichung der Musterholzbaurichtlinie (MHolzBauRL) (Bauministerkonferenz 2021) die Anwendung brennbarer Baustoffe bis zur Hochhausgrenze. Im Gegensatz zu den Ausführungslösungen der Praxis weisen die rechnerischen Nachweise dieser Bauteile noch große Lücken auf, so dass im Regelfall kosten- und zeitintensive Verwendbarkeitsnachweise und Anwendbarkeitsnachweise auf Basis von Bauteilprüfungen als Nachweis herangezogen werden müssen. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine Nachweismöglichkeit für den Planer in Deutschland auf Basis rechnerischer Methoden die geforderte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten sowie die Leistungseigenschaft von Bekleidungsmaterialien oder biogenen Dämmstoffen umfassend nachzuweisen. Einzelbauteile der DIN 4102-4:2016 decken das baupraktisch geforderte Spektrum nicht ausreichend ab und die Berechnungsverfahren der DIN EN 1995-1-2:2012-Anhang C und E sind auf eine Beanspruchung von 60 Minuten begrenzt.

1.2 Zweck und Ziel des Projekts

Ziel des Forschungsprojekts ist es, neue allgemeine Berechnungsansätze, angepasst auf die sich im Wandel befindlichen baurechtlichen Anforderungen, bereitzustellen. Diese dienen dem Planer und Ausführenden als Werkzeug für den brandschutztechnischen Bauteilnachweis bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Die neuen Nachweismethoden sollen die gegenwärtig vorhandene Lücke zwischen geregelten Nachweismethoden (DIN EN 1995-1-2 oder DIN 4102-4) und baurechtlich gestellten Anforderungen schließen und dem Planer, Ingenieur oder ausführenden Holzbauer eine wirtschaftliche Brandbemessung für die seitens der Praxis geforderten Bauteilaufbauten ermöglichen.

1.3 Abgrenzung

Die Berechnungsansätze beinhalten Untersuchungen zur Tragfähigkeit sowie zum Raumabschluss von Holztafel- und Holzmassivbauteilen. Es werden Feuerwiderstandsdauern bis 90 Minuten betrachtet. Hierbei sind primär Bekleidungen wie Holz- bzw. Gipsbekleidungen sowie Dämmstoffe aus Mineralwolle (Glas- bzw. Steinwolle) relevant. Biogene Dämmstoffe werden nur am Rande betrachtet, da diese bereits im Zukunft Bau-Forschungsprojekt „Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen“ (Winter et al. 2019) bzw. im Verbundvorhaben „Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen“ (Kampmeier 2020) untersucht wurden. Als Einwirkung wird die Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102-2:1997-09 bzw. DIN EN 1363-1:2010-12 oder DIN 1991-1-2:2010-12 verwendet. Es werden keine Naturbrandbeanspruchungen untersucht.

1.4 Forschungsergebnisse und der erwartete Nutzen

Der rechnerische Bauteilnachweis für Feuerwiderstandsdauern bis zu 90 Minuten kann als alternatives, zeit- und kosteneffizienteres Nachweisverfahren gegenüber den bisherigen Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweisen wie allgemeine Bauartgenehmigung (abP), allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ), bzw. allgemeine Bauartgenehmigung (abG) oder einer Zulassung im Einzelfall (ZiE) bzw. einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vbG), herangezogen werden. Ergänzend kann in Europäisch Technischen Bewertungen (ETA) auf rechnerische Nachweismethoden verwiesen werden. Zudem kann diese Methode in Softwaretools zur Brandbemessung implementiert werden. Somit wird der Planungsprozess beschleunigt und der Holzbau den alternativen Bauweisen hinsichtlich des brandschutztechnischen Nachweises gleichgestellt. Die entwickelten Methoden können außerdem in die Überarbeitung der aktuellen DIN EN 1995-1-2 mit eingebracht werden.

1.5 Ergebnistransfer

Die ersten Teilergebnisse der Auswertung wurden im Symposium Heißbemessung bei den Braunschweiger Brandschutztagen (Rauch et al. 2019) vorgestellt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse in unterschiedlichen Fachzeitschriften wie der Bautechnik (Suttner et al. 2019), der neuen Holzbau Quadriga (Rauch et al. 2020a; Suttner und Werther 2019) und auf Tagungen, wie beispielsweise WCTE 2021 (Rauch et al. 2020b) veröffentlicht. Ein kontinuierlicher Austausch mit der Arbeitsgruppe der EN 1995-1-2 (WG 4) ermöglichte es, mit den erarbeiteten Ergebnissen den normativen Entwicklungsprozess zu unterstützen.

2 Grundlagenermittlung

2.1 Baurechtliche Grundlagen

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden die baurechtlichen Grundlagen zusammengestellt. Parallel zur Bearbeitung dieser Forschungsvorhaben fand eine ständige Weiterentwicklung des Baurechts statt. Während zu Beginn dieses Vorhabens nur in einzelnen Bundesländern, wie beispielsweise Baden-Württemberg, Berlin oder Hamburg die Bauordnungen mehrgeschossigen Holzbau bis zur Hochausgrenze ermöglichten, wurde inzwischen die Musterbauordnung (Bauministerkonferenz 2020) angepasst. Hochfeuerhemmende Bauteile mit tragenden und aussteifenden Teilen aus brennbaren Baustoffen waren ursprünglich nur mit einer allseitig brandschutztechnische wirksamen Bekleidung möglich. Für feuerbeständige Bauteile wurde neben der Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten auch die Nichtbrennbarkeit der Baustoffe gefordert. Mehrgeschossiger Holzbau (> Gebäudeklasse 4) war somit nur über eine objektspezifische Abweichung im präskriptiven Brandschutznachweis möglich.

Durch die Novellierung wurden die ursprünglichen Anforderungen für hochfeuerhemmende bzw. feuerbeständige Bauteile beibehalten und ergänzend hierzu ein neuer Weg für den Holzbau eröffnet:

„4Abweichend von Abs. 2 Satz 3 sind andere Bauteile, die feuerbeständig oder hochfeuerhemmend sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, sofern sie den Technischen Baubestimmungen nach § 85a entsprechen. 5Satz 4 gilt nicht für Wände nach § 30 Abs. 3 Satz 1 und Wände nach § 35 Abs. 4 Satz 1 Nr. 1.“ (Bauministerkonferenz 2020).

Als Technische Baubestimmung wurde die bisher bestehende M-HFHolzR (Bauministerkonferenz 2004) in eine neue Richtlinie, die „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise“ (MHolzbaURL) (Bauministerkonferenz 2021) überführt.

Somit können zukünftig Gebäude in Gebäudeklasse vier und fünf in Holzbauweise inklusive einem Anteil sichtbarer Holzoberflächen ohne eine Abweichung vom präskriptiven Baurecht realisiert werden.

Tabelle 1: Gebäudeklassen in Deutschland

Gebäudeklasse	1 ⁽¹⁾	2	3	4	5 ⁽²⁾
Gesamtfläche	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²			
Fläche einer Nutzungseinheit				≤ 400 m ²	
Anzahl der Nutzungseinheiten	≤ 2	≤ 2			
Höhe des obersten Geschossfußbodens	≤ 7 m	≤ 7 m	≤ 7 m	≤ 13 m	≤ 22 m ⁽³⁾
<p>⁽¹⁾ zusätzlich: freistehende land- und forstwirtschaftlich genutzte Gebäude ⁽²⁾ einschließlich unterirdischer Gebäude ⁽³⁾ Gebäude mit einer Höhe des obersten Geschossfußbodens von mehr als 22 m gehören zur Gebäudeklasse 5, gelten aber zusätzlich als Hochhaus. Die Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR) stellt höhere Anforderungen als die MBO für die Gebäudeklasse 5, so dass die Abgrenzung der Gebäudebetrachtung im Rahmen dieses Projektes bis zur Hochhausgrenze von 22 m erfolgt.</p>					

Die geforderte Feuerwiderstandsklasse von 60 min für Gebäudeklasse vier, bzw. 90 min. für Gebäudeklasse fünf wurde beibehalten.

Diese neue Möglichkeit, mehrgeschossige Holzgebäude ohne baurechtliche Abweichung zu realisieren, stellt eine Chance für den Holzbau dar. Um die neu entstandenen Anforderungen einzuhalten sind Nachweismöglichkeiten für Holzbauteile bis zu einem Feuerwiderstand von 90 min notwendig. Somit schafft die parallel zum Forschungsvorhaben fortschreitende baurechtliche Entwicklung die Basis, um die erarbeiteten Ergebnisse praktisch anzuwenden.

Eine bestehende Problematik der gegenwärtigen baurechtlichen Regelungen ist neben fehlenden Nachweismöglichkeiten die fehlende Umsetzung vorhandener technischer Regeln als „Eingeführte Technische Baubestimmung“. Hierfür müssen diese Regeln über die Verwaltungsvorschriften der Länder bekannt gemacht werden. Seit langem in Europa etablierte Verfahren, wie beispielsweise die Methode zur rechnerischen Bestimmung des Raumabschlusses entsprechend dem nationalen Anhang der ÖNORM B 1995-1-2:2011-09, ursprünglich in der Schweiz eingeführt über die Lignum Dokumentation Brandschutz zur Feuerwiderstandsbemessung (Frangi et al. 2011) sind in Deutschland nicht möglich. Widersprüche zwischen nationalen (F- Klassen) und europäischen Klassifikationen (REI – Klassen) führen zu formalen Hürden ohne technischen Hintergrund.

Eine einheitliche europäische Klassifikation sowie die gegenseitige Anerkennung eingeführter technischer Baubestimmungen würden den brandschutztechnischen Nachweisprozess erheblich vereinfachen und zu einer enormen Zeit- und Kostenersparnis führen.

2.2 Rechnerische Nachweisverfahren

- Im Rahmen dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus auf den rechnerischen Methoden. Tabellierte Verfahren wie beispielsweise nach DIN 4102-4:2016-05 werden nicht genauer vorgestellt. Hierzu wird auf entsprechende Literatur wie beispielweise das Holz-Brandschutz-Handbuch verwiesen (Scheer und Peter 2009). Die gegenwärtig vorhandenen rechnerischen Nachweismethoden lassen sich in zwei Kategorien splitten:
- Rechnerische Nachweismethoden für die Tragfähigkeit (R)
- Rechnerische Nachweismethoden für den Raumabschluss (EI)

Für beide Nachweise sind in der DIN EN 1995-1-2:2010-12 bereits entsprechende Bemessungskonzepte enthalten. Für lineare Holzbauteile mit oder ohne Bekleidung kann gemäß Abs. 3.4 ein effektiver Restquerschnitt ermittelt und eine Bemessung vergleichbar zur Kaltbemessung, aber mit reduziertem Querschnitt durchgeführt werden. Zusätzlich existieren in Anhang C und D Berechnungsmodelle zur Bemessung gedämmter sowie ungedämmter Holztafelbauelemente bezüglich der Tragfähigkeit und in Anhang E zum Raumabschluss.

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN EN 1995-1-2:2010-12 wurden die bestehenden Rechenmethoden weiterentwickelt. Folgende Modelle ergänzen die bisher bestehenden und oben dargestellten Berechnungsmethoden:

- Berechnung der Tragfähigkeit von Brettsperrholzelementen nach dem „Stufenmodell“ Klippel und Just (2018).
- Erweitertes Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Holztafelbauelementen nach Tiso (2018).
- Erweitertes Modell zur Beurteilung der raumabschließenden Funktion nach Mäger und Tiso(2018), basierend auf dem Modell zum Raumabschluss nach Schleifer (2009).

Die maßgebenden Änderungen werden in der unten dargestellten Tabelle erläutert. Die detaillierten Berechnungsmodelle können den entsprechenden Veröffentlichungen entnommen werden.

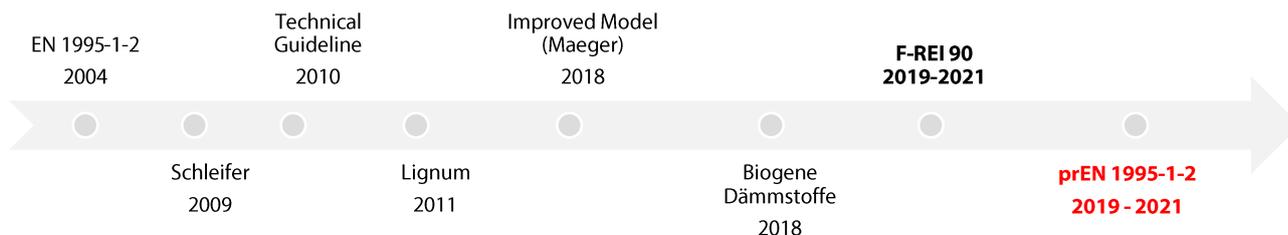
Tabelle 2: Grundlagen der Berechnungsmodelle zum Nachweis des Feuerwiderstandes von Holzkonstruktionen

Berechnungsmodell	Wesentliche Inhalte
Stufenmodell für Brettsperrholzelemente (BSP) (Klippel und Just 2018)	Berechnungsmodell zur Berücksichtigung des Einflusses der Klebefuge zwischen den einzelnen BSP-Lagen und somit des möglichen Abfallens von Einzellagen im Brandfall.
Erweitertes Berechnungsmodell für Holztafelbauelemente (Tiso 2018)	Erweitertes Berechnungsverfahren mit neuen Beiwerten zur Berücksichtigung der Schutzwirkung von Dämmstoffen auf den Holzständer in Holztafelbauelementen. Neuer Werte zur Bestimmung der Grenzsicht d_b . Kategorisierung der Dämmstoffe anhand deren „Protection-Level“.
Erweitertes Berechnungsmodell zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion (Maeger et al. 2018)	Erweiterung zum Lignum-Verfahren zur Berücksichtigung des positiven Einflusses von Gipsplatten. Das Abfallen der Gipsplatten wird im Verfahren für den Raumabschluss mit Erfasst. Aufnahme zusätzliche Faktoren zur Begrenzung der Schutzzeiten von Dämmstoffen, die bisher überschätzt wurden.

¹ Bei den Nachweisen zum Raumabschluss wird davon ausgegangen, dass durch den rechnerischen Nachweis von I auch E als erfüllt anzusehen ist (DIN EN 1995-1-2:2010-12).

Alle Berechnungsmethoden basieren im ersten Schritt auf der Ermittlung der Schutzwirkung der Bekleidung bzw. der vor der Tragkonstruktion liegenden Schichten. Aus diesem Grund wird im Rahmen des Forschungsvorhabens der Schwerpunkt auf das Modell zur Ermittlung der Schutzzeiten für die einzelnen Bauteillagen gelegt, da der daraus ermittelte Wert für den Beginn des Abbrandes bzw. der Vorerwärmung die Grundlage für die anderen Verfahren darstellt. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der unterschiedlichen Rechenmodelle zur Ermittlung des Raumabschlusses von Holzkonstruktionen bis zum gegenwärtigen Entwurf der prEN 1995-1-2:2021-11.

Abbildung 1: Zeitstrahl - Rechenmethoden für die Ermittlung des Raumabschlusses



Aus dem Vergleich der Berechnungsmodelle ergeben sich folgende Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht werden:

- Validierung des Berechnungsverfahrens für Brandbeanspruchungen über 60 Minuten hinaus.
- Im Verfahren nach Lignum wird für Holzwerkstoffplatten und massive Holzplatten eine Grundschutzzeit errechnet, die durch einen Faktor aus dem Quotienten aus Dicke und einer Abbrandrate von 0,65 mm/min begrenzt wird. Für Holzwerkstoffe ist in DIN EN 1995-1-2:2012 – Tabelle 3.1 eine Abbrandrate von 0,9 für Holzwerkstoffplatten angegeben. Hier wird untersucht, ob zukünftig eine einheitliche Lösung möglich ist, die eventuell nur von der Abbrandrate abhängt.
- Im „Improved Model“ nach Mäger (Mäger et al. 2018) wurde die Abfallzeit von Bekleidungen mit implementiert. Dies führt zu höheren Schutzzeiten der Konstruktionen. Für Dämmschichten wurde in Anlehnung an Tiso (2018) über die Rückzugsgeschwindigkeit ein experimentell ermittelter, Grenzwert eingeführt. Dieses Verfahren muss anhand der vorliegenden Versuchsdatenbank validiert werden.
- In Deutschland müssen Deckenkonstruktionen von der Oberseite nachgewiesen werden. Hierfür ist eine Erweiterung des Berechnungsverfahrens notwendig.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit lässt sich ebenfalls die Entwicklung der rechnerischen Methoden darstellen (vgl. Abbildung 2)

Abbildung 2: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Berechnung der Tragfähigkeit



Ein Vergleich der beiden Zeitstrahle zeigt, dass eine Berechnung des Feuerwiderstandes in Deutschland nur über die baurechtlich eingeführte DIN EN 1995-1-2:2010-12 möglich ist, die wiederum auf den Verfahren der EN 1995-1-2:2004 basiert und deren Entwicklung über 17 Jahre zurückliegt. Im Gegensatz zu Deutschland wurden in der Schweiz und Österreich bereits 2011 die rechnerischen Verfahren aktualisiert. Die mit dem Ende der COST- Action FP 1404 (Schmid 2018), vorgestellten Verfahren dienen zur Weiterentwicklung der EN 1995-

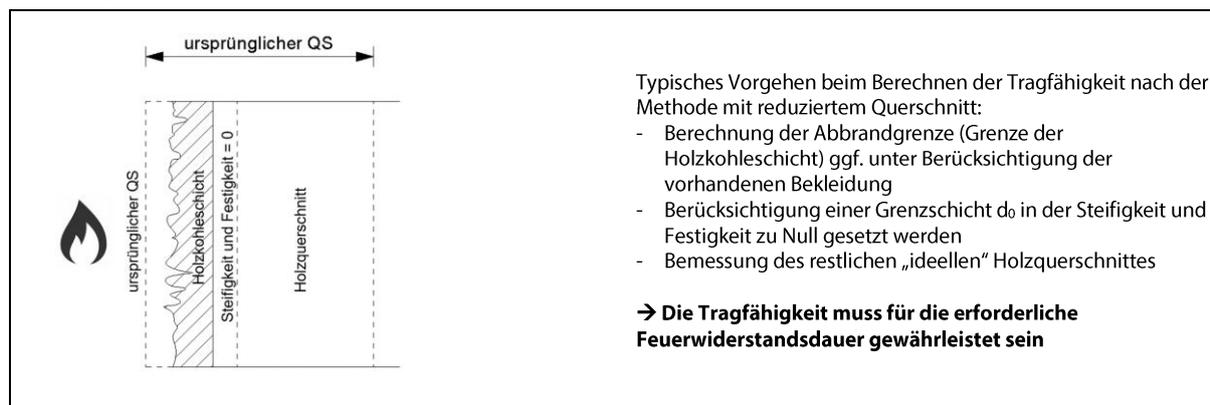
1-2 und wurden in den Entwurf der prEN 1995-1-2:2020 (E) mit aufgenommen. Alle rechnerischen Verfahren zur Tragfähigkeit von geschützten Querschnitten hängen von der Schutzwirkung davorliegender Bauteilschichten ab. Somit sind die Schutzzeiten der Einzelschichten aus der Berechnung des Raumabschlusses gleichzeitig die Voraussetzung zur Bewertung der Tragfähigkeit.

2.3 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit

2.3.1 Grundlagen

Die Berechnung für massive Holzbauteile ist in den Ländern Österreich und Schweiz identisch zu Deutschland, basierend auf DIN EN 1995-1-2:2010-12 geregelt.

Abbildung 3: Systematik – Modell des Abbrandes massiver Holzquerschnitte



Davon unterscheidet sich die Möglichkeit der Anwendung von Anhang C (Tragende Deckenbalken und Wandstiele in vollgedämmten Konstruktionen) und D (Abbrand von Bauteilen in Wand- und Deckenkonstruktionen mit ungedämmten Hohlräumen) der DIN EN 1995-1-2:2010-12. Hier wird der schützende Einfluss der Dämmung sowie die Reduktion der Festigkeiten und Steifigkeiten der Holzständer mitberücksichtigt. Diese Anhänge können in Deutschland und Österreich herangezogen werden. Die Schweiz schließt über den Nationalen Anhang zur EN 1995-1-2 (EN 1995-1-2/NA:2014) die Anwendung dieser Anhänge C und D aus und verweist auf das Berechnungsmodell entsprechend Lignum Dokumentation (Frangi et al. 2011).

2.3.2 Berechnungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010-12

Für die Bemessung von massiven Vollholzquerschnitten im Brandfall bietet die DIN EN 1995-1-2:2010-12 zwei Möglichkeiten. Entweder kann auf die Methode mit reduziertem Querschnitt oder die Methode mit reduzierten Eigenschaften zurückgegriffen werden. Da die Methode mit reduzierten Eigenschaften in der prEN 1995-1-2:2020 (E) nicht mehr enthalten ist, wird dieses Berechnungsverfahren nicht weiter betrachtet. Grundlage beider Bemessungsprinzipien ist die Berechnung der Abbrandtiefe. Der Restquerschnitt wird durch Reduzierung des Ausgangsquerschnitts um die Dicke der verkohlten Schicht, definiert durch die Lage der 300 °C-Isotherme, berechnet. Die ermittelte Abbrandtiefe $d_{char,0}$ errechnet sich aus der Abbrandrate β und der Zeit der Brandbeanspruchung nach Gl. 1. Eine genaue Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Abbrandrate, aus der zeitabhängig der Restquerschnitt ermittelt wird, wurde durch Werther (2016) durchgeführt.

$$d_{char,0} = \beta_0 * t$$

Gl. 1

β_0	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
$d_{char,0}$	[mm]	Bemessungswert der Abbrandtiefe für den eindimensionalen Abbrand
t	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung

Zur Berechnung des Abbrandes ist zu berücksichtigen, ob das Bauteil geschützt oder ungeschützt dem Brand ausgesetzt ist. Sowohl die brandschutztechnische Bekleidung als auch die Dämmung können zu einem verlangsamten Abbrand bzw. späterem Verkohlungsbeginn des Holzes beitragen. Anhang C der DIN EN 1995-1-2:2010-12 liefert diesbezüglich Beiwerte zur Anpassung der Abbrandrate. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass Hohlräume mit Stein- oder Glaswolle vollgedämmt sind und eine Brandschutzbekleidung an der feuerzugewandten Seite angebracht ist. Die Anwendung des Rechenmodells ist für Konstruktionen, gedämmt mit Glaswolle, nur bis zum Versagen der vor der Dämmung liegenden Bekleidung gültig.

Der Beginn des Abbrandes t_{ch} der Holzständer tritt nach Erreichen der 300° C an der Holzoberfläche ein. Bei Holzwerkstoff- und Gipsplatten ist dieser Zeitpunkt mit dem Versagen der Brandschutzbekleidung gleichzusetzen (vgl. Abbildung 4) mit $t_{ch} = t_f$. Für Typ F- Platten können experimentell ermittelte Versagenszeiten (t_f) die über dem Beginn des Abbrandes liegen, ermittelt werden. Aufgrund der vorhergehenden Erwärmung des Bauteils tritt nach Abfallen der Bekleidung (Zeitpunkt t_f) ein beschleunigter Abbrand auf, welcher sich nach Bilden einer 25 mm dicken Holzkohleschicht (Zeitpunkt t_a) der Abbrandrate β_0 angleicht (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 4: Abbrandmodell ($t_{ch} = t_f$) nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)

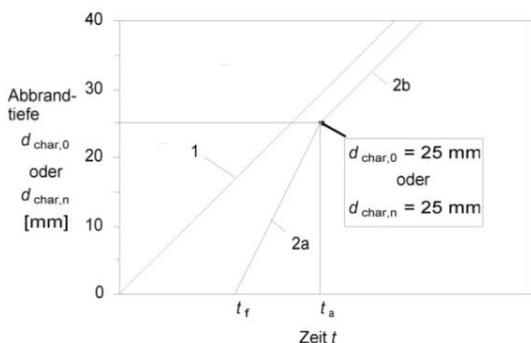
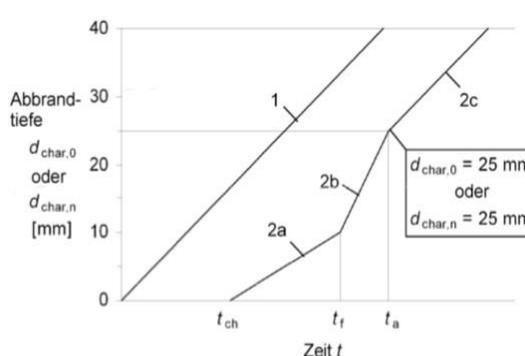


Abbildung 5: Abbrandmodell ($t_{ch} < t_f$) nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)

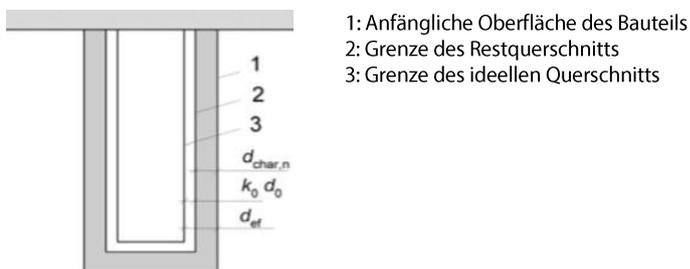


Die dargestellten Modelle sind für eine Bemessung bis 60 Minuten Feuerwiderstand gültig (DIN EN 1995-1-2:2010-12). Berücksichtigt man die Beiwerte aus Anhang C der DIN EN 1995-1-2:2010-12, ergibt sich für den Holzständer in einem mit Steinwolle gedämmten Holztafelelement folgende Abbrandtiefe $d_{char,n}$:

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

$d_{char,n}$	[mm]	Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe
β_0	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
k_n	[-]	Faktor zur Umwandlung des verbleibenden Restquerschnitts in einen ideellen, rechteckigen Querschnitt
k_s	[-]	Querschnittsfaktor
k_2	[-]	Dämmungsfaktor
k_3	[-]	Koeffizient für das Verhalten nach Versagen einer Brandschutzbekleidung
t	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung
t_f	[min]	Versagenszeitpunkt der Bekleidung
t_{ch}	[min]	Beginn des Abbrandes des Holzbauteils

Abbildung 6: Berechnung des Restquerschnitts nach DIN EN 1995-1-2:2012-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)



Nahe der Abbrandgrenze wird innerhalb der Methode mit reduziertem Querschnitt aufgrund der reduzierten Materialeigenschaften unter erhöhten Temperaturen (insbesondere Festigkeit und Steifigkeit) die ideale Abbrandtiefe um maximal 7 mm, dem Produkt aus k_0 und d_0 , erhöht (Abbildung 6).

Folglich ergibt sich für die Heißbemessung eine ideale Abbrandtiefe von [1]:

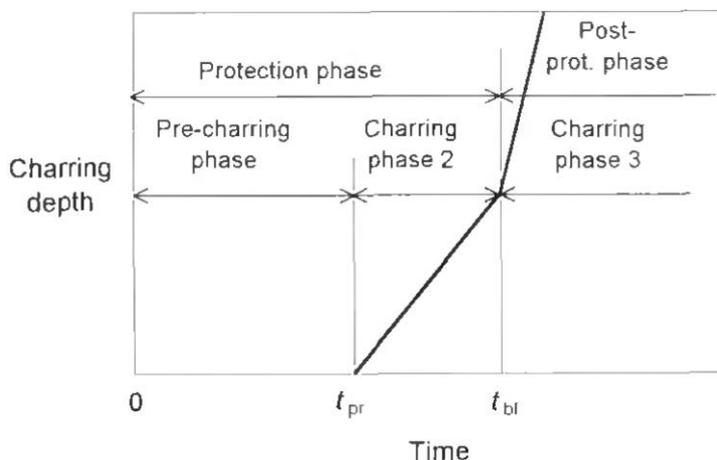
$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \tag{Gl. 3}$$

d_{ef}	[mm]	Ideelle Abbrandtiefe
$d_{char,n}$	[mm]	Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe
k_0	[-]	Faktor zur Berücksichtigung der Brandbeanspruchung
d_0	7 mm	

Je nach auftretender Brandbeanspruchung – einseitig oder mehrseitig – sind die Querschnittsabmessungen um d_{ef} zu reduzieren.

Das Berechnungsmodell basiert auf den Ergebnissen von König und Walleij (König und Walleij 2000). Bereits hier wird das Abbrandmodell in eine „Protection Phase“ und „Post-Protection Phase“ (PP-Phase) unterteilt (vgl. Abbildung 7). Maßgebend hierfür ist der Versagenszeitpunkt der Brandschutzbekleidung t_f . Mit dem Brand beginnt die „Pre-Charring Phase“, hier schützt die brandschutztechnische Bekleidung das Konstruktionsholz vor dem Abbrand bis zum Zeitpunkt t_{prot} . Während der „Charring Phase 2“ beginnt hinter der Bekleidung bereits der Abbrand des Holzständers. Nach dem Versagen der Bekleidung (z.B. durch ein Herabfallen großer Stücke oder einem Komplettversagen) folgt „Charring Phase 3“, in der das Holzbauteil ungeschützt dem Feuer ausgesetzt ist und durch die nicht vorhandene Holzkohleschicht sowie der Vorerwärmung ein erhöhter Abbrand auftritt. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Abbrandphasen nach DIN EN 1995-1-2:2010-12.

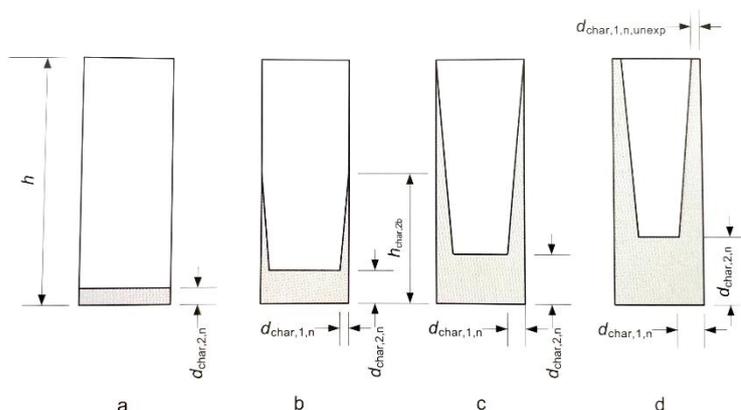
Abbildung 7: Abbrandmodell für geschützte Querschnitte nach König und Walleij (2000)



2.3.3 Berechnungsverfahren nach Technical guideline for Europe – Fire safety in timber buildings für den mehrseitigen Abbrand

Im Gegensatz zum Eurocode 5 ist in der aktuellen *Technical guideline for Europe – Fire safety in timber buildings* (FSITB) (Östman 2010) ein Verfahren zur Bestimmung des Restquerschnitts bei einem mehrseitigen Abbrand während der Post-Protection Phase von Holzkonstruktionen, deren Gefache mit Glaswolle gedämmt sind, enthalten. Dieses Rechenmodell berücksichtigt dabei den Rückzug der Dämmung über die Zeit der direkten Brandbeanspruchung.

Abbildung 8: Abbrandmodell für Holztafelbauelemente mit einer Gefachdämmung aus Glaswolle nach (Östman 2010)



Nach Versagen der Bekleidung beginnt die Glaswolle sich langsam im Gefach zurückzuziehen. Folglich wird der Holzständer zunehmend dem Feuer ausgesetzt und die Verkohlung findet nun an allen freiliegenden Oberflächen statt (vgl. Abbildung 8, Bild b – c).

Dieses Modell basiert auf den Untersuchungen von Just (2010) und erweitert das Berechnungsverfahren der DIN EN 1995-1-2:2010-12. Aus experimentellen Versuchen wurde eine Rückzugsgeschwindigkeit $v_{rec,ins}$ der Glaswolle am Holzständer mit 30 mm/min bestimmt. Das gesamte Modell kann der FSITB (Östman 2010) entnommen werden.

2.3.4 Berechnungsverfahren für den mehrseitigen Abbrand nach Tiso

Das Berechnungsverfahren für Holztafelelemente wurde durch Tiso (2018) weiterentwickelt. Hier wurde das Modell unabhängig von den Dämmstoffen Steinwolle und Glaswolle generalisiert. Durch eine Kategorisierung der Dämmstoffe in Protection- Level, wird die Leistungseigenschaft des Dämmstoffes abhängig von deren Schutzwirkung auf den Holzständer beurteilt. Tiso (2018) stellt hier ein entsprechendes Prüfverfahren vor.

Abhängig vom Protection Level des Dämmstoffes ergibt sich der Abbrand des Holzständers und somit die Tragfähigkeit. Ebenso wird in Tiso eine Möglichkeit zur Berechnung des „Zero-Strenght-Layers“ (d_0) angegeben.

Das Protection Level eines Dämmstoffes wird durch den Abstand der 300 °C Isotherme am Holzständer $d_{300,s}$ nach einer Brandbeanspruchung von 60 min von dessen Vorderkante bestimmt. Dabei wird vor dem Holzständer eine Gipsplatte Typ F mit einer Dicke von 15 mm angeordnet. Diese muss nach 45 min (z.B. durch eine mechanische Konstruktion) zum Abfallen gebracht werden. Danach kann das Protection Level entsprechend Tabelle 3 bestimmt werden.

Tabelle 3: Protection Level (PL) der Dämmstoffe nach (Tiso 2018)

Protection Level (PL)	Kriterium
PL 1	Rückzug der Dämmung geringer als 100 mm nach 60 min. Branddauer → $d_{300,s} < 100$ mm für $t = 60$ min
PL 2	Rückzug der Dämmung größer als 100 mm innerhalb der Post-Protection Phase (bis zur 60. min) → $d_{300,s} \geq 100$ mm für $t > t_f$
PL 3	Rückzug der Dämmung größer als 100 mm während der Protection Phase (45. Minute) → $d_{300,s} \geq 100$ mm für $t < t_f$

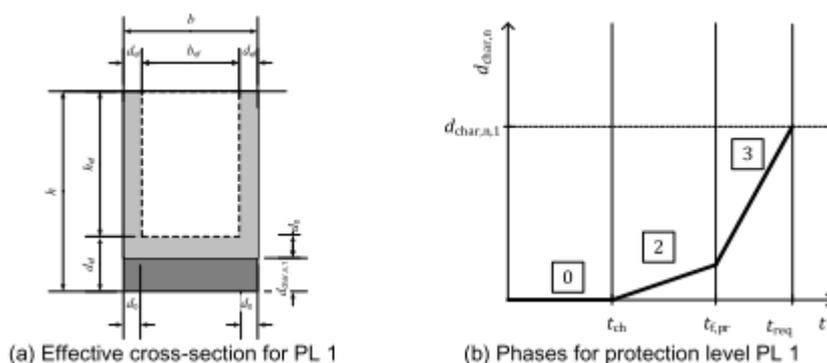
Dementsprechend lässt sich beispielsweise Steinwolle (SW) als PL 1 klassifizieren; Glaswolle (GW), Zellulosefasern (ZF) und Polyurethan Platten (PUR) als PL 2 sowie Expandiertes Polystyrol (EPS) als PL 3 (Tiso 2018).

Diese Verfahren ermöglicht es somit, auch biogene Dämmstoffe wie Holzfaserdämmstoffe (Matten) oder Zelluloseeinblasdämmstoffe (hergestellt aus Papier oder Holzfaser) im Berechnungsverfahren zu berücksichtigen. Hierzu wurden Untersuchungen im Forschungsvorhaben „Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen“ (Winter et al. 2019) durchgeführt, die auf dem Verfahren nach Tiso (2018) aufbauen.

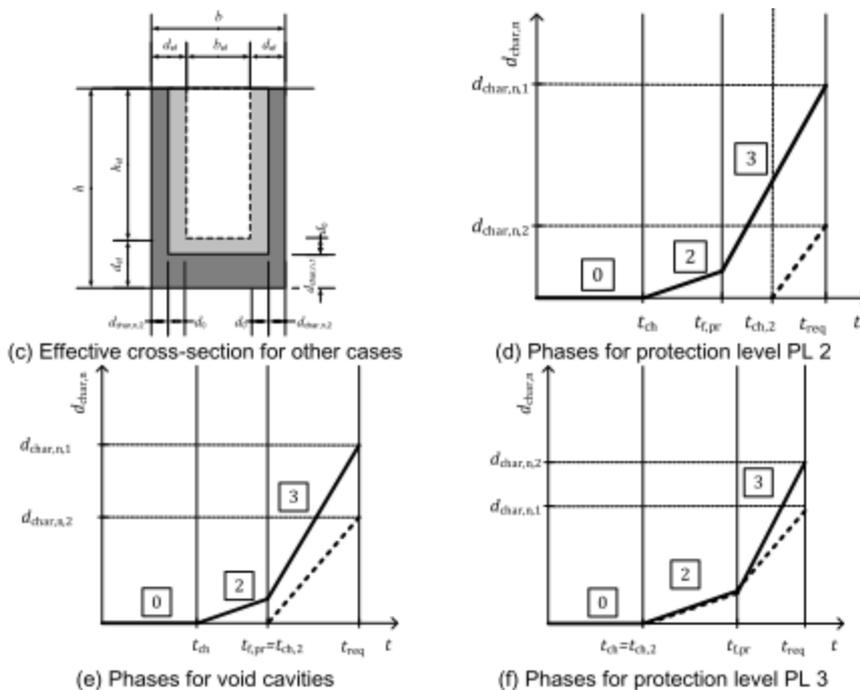
2.3.5 Berechnungsverfahren nach prEN 1995-1-2:2021-11

Die dargestellten Berechnungsverfahren der *Technical guideline for Europe – Fire safety in timber buildings* (FSITB) (Östman 2010), erweitert durch Tiso (2018) sowie das Forschungsvorhaben „Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen“ (Winter et al. 2019) bilden die Grundlage für die rechnerischen Verfahren der prEN 1995-1-2:2021-11.

Abbildung 9: Abbrandmodell für Holzquerschnitte in Holztafelbauteilen (prEN 1995-1-2:2020 (E))



Fortsetzung Abbildung 9: Abbrandmodell für Holzquerschnitte in Holztafelbauteilen (prEN 1995-1-2:2020 (E))



2.4 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Raumabschlusses

2.4.1 Grundlagen

Von den Berechnungsverfahren zur Tragfähigkeit ist das Verfahren zur Ermittlung der raumabschließenden Wirkung von Holzbauteilen abzugrenzen. Zur Bauteilberechnung ist immer der maßgebende Wärmedurchgangspfad (mit der geringsten Feuerwiderstandsdauer) durch das Bauteil zu betrachten.

Abbildung 10: Systematische Darstellung – Lagenweise Ermittlung der Schutzzeiten

Typisches Vorgehen zur Berechnung des Raumabschlusses:

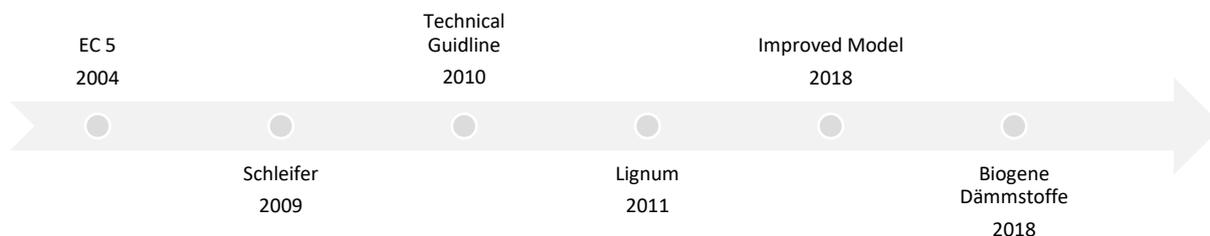
- Identifikation der brandbeanspruchten Seite, für welche die Feuerwiderstandsdauer berechnet wird. Bei asymmetrischen Aufbauten mit beidseitiger Anforderung müssen beide Richtungen betrachtet werden.
- Berechnung der Schutzzeiten und Isolationszeit von Einzelschichten.
- Gesamtschutzzeit ergibt sich aus der Summe der Einzelschutzzeiten.

→ Berechnete Schutzzeit muss größer oder gleich der geforderten Feuerwiderstandsdauer sein.

Bei der Berechnung des Raumabschlusses hat sich in der Schweiz, basierend auf Schleifer (Schleifer et al.) ein Verfahren etabliert, dass auf der Systematik des Verfahrens nach DIN EN 1995-1-2 Anhang E (EC 5) basiert, aber einen erheblich größeren Anwendungsbereich bietet. Das Bemessungsverfahren darf in der Schweiz und in Österreich angewendet werden. Da dieses Verfahren neben dem Raumabschluss auch die Berechnung der 270 °C Grenze, die annähernd dem Beginn des Abbrandes entspricht, ermöglicht, können die Ergebnisse in der Schweiz auch als Eingangsgrößen zur Bemessung tragender Holztafelbauelemente herangezogen werden. Alle beschriebenen Verfahren nach Anhang C und E sowie das Berechnungsverfahren nach Lignum sind gegenwärtig auf eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten begrenzt.

Alle Berechnungsmethoden, auch die der Tragfähigkeit, basieren im ersten Schritt auf der Ermittlung der Schutzwirkung der Bekleidung bzw. der vor der Tragkonstruktion liegenden Schichten. Aus diesem Grund wird im Rahmen des Forschungsvorhabens der Schwerpunkt auf das Modell zur Ermittlung der Schutzzeiten für die einzelnen Bauteillagen gelegt, da der daraus ermittelte Wert für den Beginn des Abbrandes bzw. der Vorerwärmung die Grundlage für die anderen Verfahren darstellt.

Abbildung 11: Zeitstrahl - Rechenmethoden für die Ermittlung des Raumabschlusses – bisher existierende Methoden



2.4.2 Berechnungsmodell nach EN 1995-1-2:2010

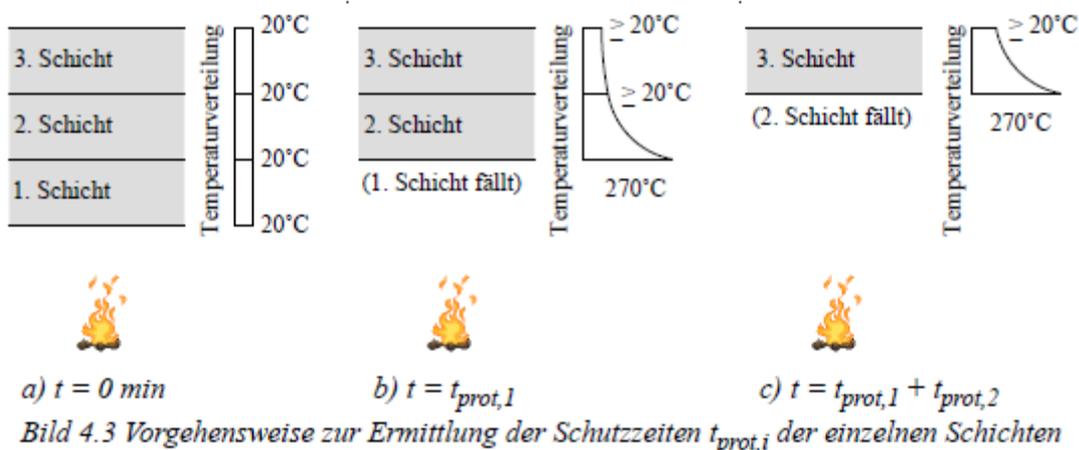
Das ursprüngliche Verfahren zur Berechnung der raumabschließenden Funktion von Holzbauteilen des Entwurfs zur EN 1995-1-2:2010 basierte auf dem Wärmedurchgang der 300 °C Isotherme - die dem Beginn des Abbrandes entspricht - durch das Bauteil. Der Zeitraum bis 300 °C auf der Rückseite einer Lage erreicht werden, wurde als Schutzzeit ($t_{p,r}$) der Bauteilschicht definiert und ermöglichte daraus eine Berechnung des Raumabschlusses der Konstruktion durch Addition der einzelnen Schutzzeiten. Um ein Sicherheitsniveau festzulegen und das geringere Kriterium des Raumabschlusses von 140 K (160 °C) - im Vergleich zur 300 °C Isotherme - auf der feuerabgewandten Seite zu berücksichtigen, wurde ein pauschaler Wert von 15 min definiert, um den die Zeit bis zum Erreichen der 300 °C Isotherme reduziert wurde. Im Bereich von Fugen, in denen das Kriterium von 180 K (200 °C) Temperaturerhöhung maßgebend wird, wurden 5 min als Differenz angesetzt. Im Gegensatz zu den nachfolgenden Versionen war hier bereits ein Wärmedurchgangspfad für eine Brandbeanspruchung von der Oberseite einer Decke angegeben. Die Versagenszeit der Konstruktion durfte hierfür um 20 % im Vergleich zur Brandeinwirkung von der Unterseite erhöht werden.

Ein Schwachpunkt dieser additiven Methode bestand darin, dass der Einfluss von davor- bzw. dahinterliegenden Bauteilschichten nicht mitberücksichtigt wurde (König und Rydholm 2003). Das im Entwurf zur EN 1995-1-2:2010 vorhandene Verfahren für den Raumabschluss wurde nicht in die finale Version mit aufgenommen. Basierend auf den schwedischen Untersuchungen von Norén (1994) wurde das später in EN 1995-1-2:2010 in Anhang E aufgenommene Verfahren für den Raumabschluss entwickelt. Durch Positionskoeffizienten konnte nun der Einfluss davor- und dahinterliegender Schichten auf die Schutzzeit einer Lage mitberücksichtigt werden. Für zweilagige Konstruktionen wurde dieser Positionsbeiwert tabelliert und beinhaltet den Einfluss der davor- und dahinterliegenden Schicht für den jeweiligen spezifischen Konstruktionsaufbau. Dieses Berechnungsverfahren ist dadurch flexibler als tabellierte Konstruktionsaufbauten und genauer als das ursprüngliche Verfahren im Entwurfsdokument (ENV 1992-1-2:1994), ermöglicht aber keine Variation abweichend von den vorgegebenen Schichtenfolgen und dazugehörigen tabellierten Positionsbeiwerten. Zusätzlich wurde im Gegensatz zum Verfahren der DIN V ENV 1995-1-2:1994-05 für jede Schicht eine Temperaturerhöhung von 140 K (160 °C) als Grenzkriterium angesetzt und diese Schutzzeiten aufaddiert. Da im rechnerischen Verfahren nur das Kriterium der Isolation (I) nachgewiesen wird, gilt das Kriterium des Raumabschlusses (E) als erfüllt, wenn I eingehalten wird. Dieses Berechnungsverfahren wurde anhand von Konstruktionen bis zu einem Feuerwiderstand von 60 Minuten validiert und somit auf eine Anwendung von bis zu 60 Minuten begrenzt. Der negative Einfluss von Fugen wurde über Fugenbeiwerte berücksichtigt.

2.4.3 Berechnungsverfahren nach Schleifer

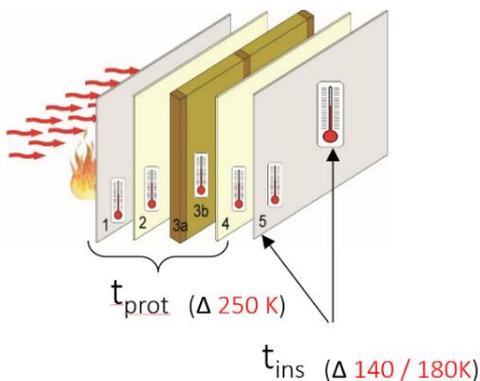
Eine Weiterentwicklung im europäischen Raum basiert auf den Untersuchungen von Schleifer (2009). Diese Methodik wurde in der Schweiz über die Lignum Dokumentation (Frangi et al. 2019) und in Österreich über den nationalen Anhang zur ÖNORM [ÖNORM B 1995-1-2] sowie in Frankreich als baurechtlich zulässiger Nachweis eingeführt. Vergleichbar zum bestehenden additiven Verfahren nach Anhang E der DIN EN 1995-1-2:2010-12 wurde hier ein höheres Temperaturkriterium im Vergleich zur Isolationszeit innerhalb der Konstruktion angesetzt. In Anlehnung an das Kapselkriterium entsprechend DIN EN 13501-2:2016-06 wurde ein Kriterium von 250 K Temperaturerhöhung über die Ausgangstemperatur (i.d.R. 20 °C und somit 270 °C als Grenzkriterium) angenommen, bei dem eine Schicht versagt und somit die Brandbeanspruchung direkt auf die nächste Schicht einwirkt (vgl. Abbildung 12)

Abbildung 12: Modellbeschreibung Bild 4.3 nach Schleifer (2009)



Bekleidungen wie beispielsweise Gipsplatten Typ F oder Gipsfaserplatten, die länger an der Konstruktion verbleiben und die nachfolgenden Schichten somit auch nach Erreichen des Grenzkriteriums von 270 °C schützen, werden über einen erhöhenden Beiwert (Δt) berücksichtigt. Die erhöhte Schutzzeit ergibt sich durch eine temperaturabhängige Abfallzeit der Schicht, basierend auf experimentellen Untersuchungen, mit einer Versagenstemperatur von 600 °C für Wände und 400 °C für Decken. Um das vom Modell abweichende Kriterium von 140 K Temperaturerhöhung auf der feuerabgewandten Seite zu erfüllen, wird für die letzte Schicht eine von der Schutzzeit abweichende Isolationszeit, basierend auf dem Grenzkriterium der Temperaturerhöhung von 140 K (160 °C bei 20 °C Ausgangstemperatur) berechnet (vgl. Abbildung 2-2).

Abbildung 13: Systematische Bauteildarstellung als Grundlage für das additive Berechnungsverfahren entsprechend der Lignum Dokumentation in der Schweiz, basierend auf dem Verfahren nach Schleifer (2009).



Basierend auf numerischen Untersuchungen wurde für jede Schicht, abhängig von der Materialität davor- und dahinterliegender Schichten ein Positionsbeiwert ermittelt. Neben der Materialität der davorliegenden Lage wird auch die Vorerwärmung mitberücksichtigt, wodurch eine hohe Flexibilität im Modell vorhanden ist. Zusätzlich lassen sich durch die Entkopplung der Einzelschichten vom Gesamtmodell neue Baustoffschichten integrieren (Maeger 2016). Die Bestimmungsgleichungen, Positionsbeiwerte sowie das Berechnungsmodell basieren auf einer Validierung bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten. Somit wurde das ursprüngliche Modell nach Schleifer auf eine Anwendbarkeit von 60 Minuten begrenzt. Da mit zunehmender Lagenanzahl die Sicherheit zunimmt (Schleifer 2009) wurde die Methode in der Überarbeitung der Lignum Dokumentation 2019 (Frangi et al. 2019) auf eine Anwendbarkeit bis 90 Minuten erweitert. Vergleichsuntersuchungen auf Basis einer Datenbank mit Brandversuchen im Rahmen der COST- Action FP 1404 bestätigen diese Extrapolation (Rauch et al. 2018).

2.4.4 Erweiterung nach Mäger und Just

Das vorgestellte Verfahren nach Schleifer berücksichtigt den Beitrag von brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen, wie z.B. Schichten auf Basis von Gipswerkstoffen, die nach dem Erreichen von 270 °C noch an der Konstruktion verbleiben, durch den temperaturabhängigen Erhöhungsfaktor Δt . Der positive Einfluss hält an, bis die davorliegende Bekleidung versagt bzw. von der Konstruktion abfällt und die dahinterliegende Schicht direkt beansprucht wird (Zeitpunkt t_f). In (Schleifer 2009) wurde dieser Faktor auf Basis numerischer Untersuchungen, abhängig eines Temperaturkriteriums (vgl. Abs. 2.4.3) im Modell implementiert. In einer umfangreichen Studie, basierend auf einer Datenbank mit Großversuchen nach Just (2010) konnte jedoch kein einheitliches, temperaturabhängiges Abfallkriterium für Gipsplatten gezeigt werden. Somit wurde durch Maeger et al. (2018) eine Erweiterung vorgeschlagen, die im Wesentlichen auf dem Grundmodell nach Schleifer basiert, aber das Versagen der feuerzugewandten Bekleidung und daraus folgend die Erhöhung der Schutzzeit nicht über eine numerisch abgeleitete Gleichung, sondern über einen expliziten, zeitabhängigen Eingangswert für das Versagen der Bekleidung mit erfasst. Dadurch können individuelle Versagenszeitpunkte des Bekleidungssystems in das Berechnungsverfahren integriert werden, falls entsprechende Kennwerte vorliegen. Die Erhöhung der Schutzzeit des Bekleidungssystems wird nicht wie im Modell nach Schleifer nur auf die nachfolgende Schicht angerechnet, sondern auf alle nachfolgenden Bauteillagen addiert. Dieses Berechnungsmodell wurde in die (prEN 1995-1-2:2020 (E)) mit aufgenommen.

3 Voruntersuchungen

3.1 Darstellung der Anwendungsgrenzen rechnerischer Nachweismethoden

Resultierend aus der Zusammenfassung können folgende Anwendungsgrenzen bzw. Vor- und Nachteile der einzelnen Berechnungsverfahren abgeleitet werden (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Vergleich der Berechnungsverfahren für den Raumabschluss

Verfahren	Vor- / Nachteile
Verfahren der DIN EN 1995-1-2:2010-12	<ul style="list-style-type: none"> + additives Verfahren - eingeschränkter Anwendungsbereich durch definierte Positionsbeiwerte mit festgelegtem Schichtenaufbau bei mehrlagigen Bekleidungs-systemen - begrenzt auf 60 Minuten
Lignum Dokumentation Schweiz (basierend auf „Schleifer“ für den Raumabschluss) (Anhang C,D und E der EN 1995-1-2 sind nicht zulässig)	<ul style="list-style-type: none"> + additives Verfahren mit größerem Anwendungsbereich durch flexible Positionsbeiwerte + durch das 250 K Kriterium kann das Verfahren auch zur Bestimmung des „Beginn des Abbrandes“ herangezogen werden → Grundlage für den R- Nachweis + Neue Materialien können implementiert werden - Versagenszeit einer Bauteilschicht ist implizit über eine Gleichung für den Δt-Wert enthalten - begrenzt auf 60 Minuten
Verfahren der prEN 1995-1-2:	<ul style="list-style-type: none"> + basierend auf dem Verfahren nach Lignum → großer Anwendungsbereich + explizite Berücksichtigung des Versagens einer Bauteilschicht + Anwendungsbereich für hohe Feuerwiderstandsdauern (vgl. Ergebnisse dieses Vorhabens) - Versagen und Δt-Wert können nur für die erste, feuerzugewandte Schicht bestimmt werden

Bezugnehmend auf Abbildung 11 existieren aktuell sechs unterschiedliche Modelle und Stände zur Berechnung des Raumabschlusses von Holztafel- und Holzmassivbauelementen. Aus diesem Grund muss eine Abgrenzung für die weitere Untersuchung getroffen werden. Als Grundlage dient das 2011 in der Lignum Dokumentation (Frangi et al. 2017) veröffentlichte Verfahren. Diese Methode hat sich in der Praxis bereits etabliert, bietet die erweiterte Flexibilität und ist gleichzeitig die Grundlage für die neuen Ansätze wie das „Improved Model“ nach (Mäger et al. 2018). Eine Validierung sowie ein Vergleich der Methoden wurde in (Rauch et al. 2018) durchgeführt.

Abbildung 14: Wand – Vergleich der Berechnungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (EC5) und Lignum

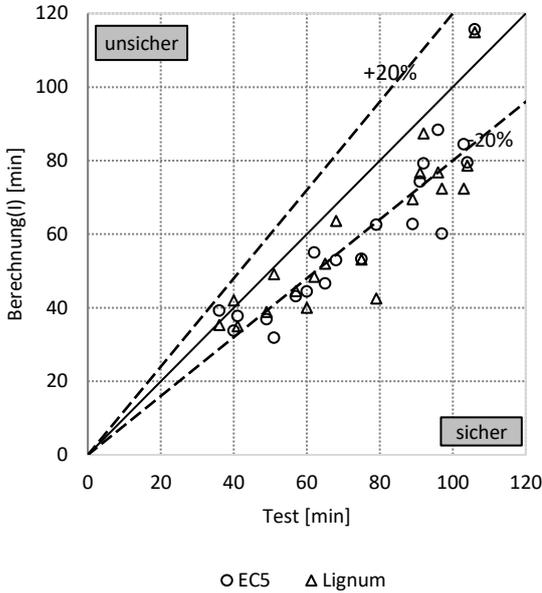


Abbildung 15: Vergleich der Schutzzeiten von Bekleidungsmaterialien nach Lignum

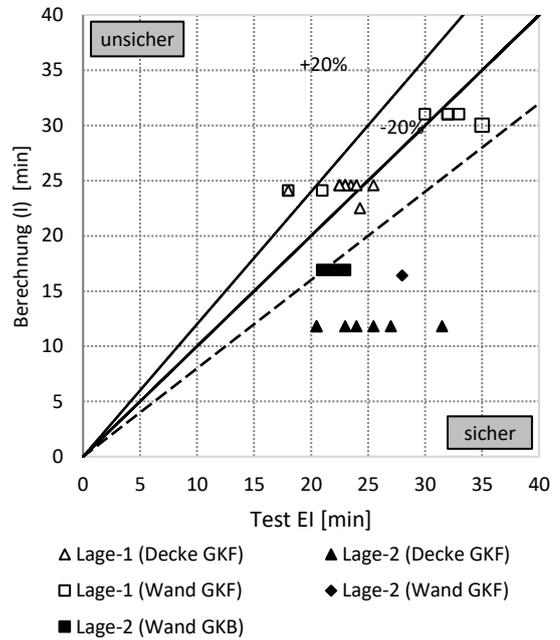


Abbildung 16: Vergleich von vorhandenen Prüfergebnissen (Rauch et al. 2019) mit den Berechnungsergebnissen und der daraus resultierenden Klassifikation (SFM = Separating-Function-Method, entspricht dem Verfahren nach Lignum)

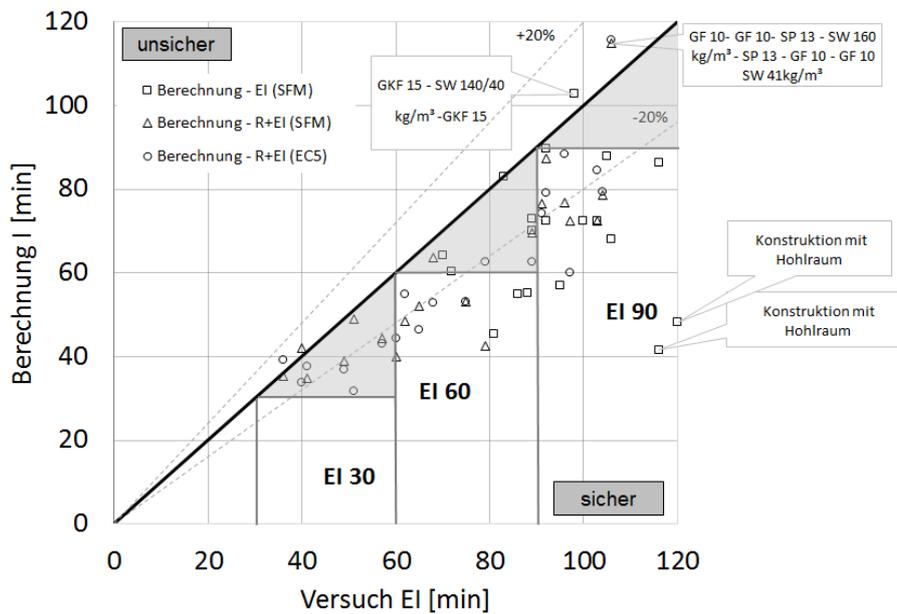


Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen einen Vergleich des bestehenden EN 1995-1-2 (EC 5) Berechnungsmodells (mit eigenen Extrapolationen zur erweiterten Anwendung für lange Brandbeanspruchungen und asymmetrische Konstruktionen) im Vergleich zum Lignum Verfahren bzw. den Vergleich von Schutzzeiten ermittelt mit dem Lignum-Verfahren. Es lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Abbildung 14 zeigt: Die Berechnungsergebnisse liegen in der Regel auf der sicheren Seite, unabhängig davon, ob nach Lignum oder EN 1995-1-2 (EC 5) Berechnungsverfahren.
- Abbildung 15 zeigt: Ab der zweiten Lage der Bekleidung wird die Schutzwirkung im Berechnungsverfahren (nach Lignum) unterschätzt. Für die erste Bekleidungslage sind Berechnungs- und Versuchsergebnis nahezu identisch.
- Abbildung 16 zeigt: Für hohe Feuerwiderstandsdauern (90 min) werden alle berechneten Konstruktionen geringer klassifiziert (EI 30 oder EI 60 statt EI 90), ausgenommen zweier Konstruktionen, gedämmt mit Steinwolle, die auf der „unsicheren“ Seite liegen.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit wurden durch Ernstberger (2020) Validierungsbeispiele auf Grundlage des 2. Draft der prEN 1995-1-2:2020 gegengerechnet. Es hat sich gezeigt, dass in den untersuchten Beispielen das Berechnungsverfahren sehr konservativ ist und teilweise zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führt.

Abbildung 17: Validierungsbeispiele für die Tragfähigkeit nach Ernstberger (2020)

Nummer (Seite der Brandbeanspruchung)	Nummer des Validierungsbeispiels nach Ernstberger (2020)			
	1 (unten)	2 (außen)	4 (innen)	6 (symmetrisch)
Beanspruchung:	Biegung	Druck	Druck	Druck
Dämmstoff:	Steinwolle	Glaswolle	Holzweichfaser	Glaswolle
Biegung berechnet	R 30 erfüllt			
Knicken aus der Wandebene (berechnet)		R 30 erfüllt	R 60 erfüllt	R 60 nicht erfüllt
Knicken in der Wandebene (berechnet)		R 30 nicht erfüllt	R 60 nicht erfüllt	R 60 nicht erfüllt
Tragfähigkeit (Versuch)	45 min	> 50 min	> 82 min	89 min

Das Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit hängt maßgeblich vom zu bemessenden Restquerschnitt und somit auch vom Beginn des Abbrandes ab. Durch die Änderungen im Verfahren des Raumabschlusses muss dieser Einfluss auch für die Tragfähigkeit mitberücksichtigt werden. Ergänzend kommt hinzu, dass Teilaspekte des Berechnungsverfahrens an sich (die Ermittlung der d_0 -Werte) parallel zu diesem Vorhaben im Rahmen der Weiterentwicklung der prEN 1995-1-2 modifiziert werden. Somit bilden diese Ergebnisse nicht

den finalen Stand ab und müssen mit den neuen Ergebnissen aus den Untersuchungen des Raumabschlusses sowie den Modifikationen für die d_0 -Werte erneut überprüft werden.

3.2 Zusammenstellung und Auswertung der durch die Industrie zur Verfügung gestellten Bauteilversuche

Insgesamt wurden 36 unterschiedliche Prüfberichte seitens der Projektpartner zur Verfügung gestellt, um die Berechnungsverfahren zu validieren. Die Versagenszeiten variieren von 30 bis 90 Minuten. So weit als möglich (nur wenn im Versuch entsprechende Thermoelemente platziert waren) wurden die Bauteilprüfungen schichtenweise ausgewertet, um die bisher vorhandenen Verfahren zu validieren. Die neuen Verfahren nach Mäger und Tiso (2018) bzw. die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben Biogenen Dämmstoffe der Technischen Universität München (Winter et al. 2019) wurden implementiert und ein Vergleich anhand dieser Konstruktionen durchgeführt.

Abbildung 18: Vergleich der Isolationszeit aus den Berechnungsmodellen mit den Versuchsergebnissen, Berechnung auf Basis des Lignum-Verfahrens (Lignum) im Vergleich zur prEN 1995-1-2 (Final Draft) aller Versuche.

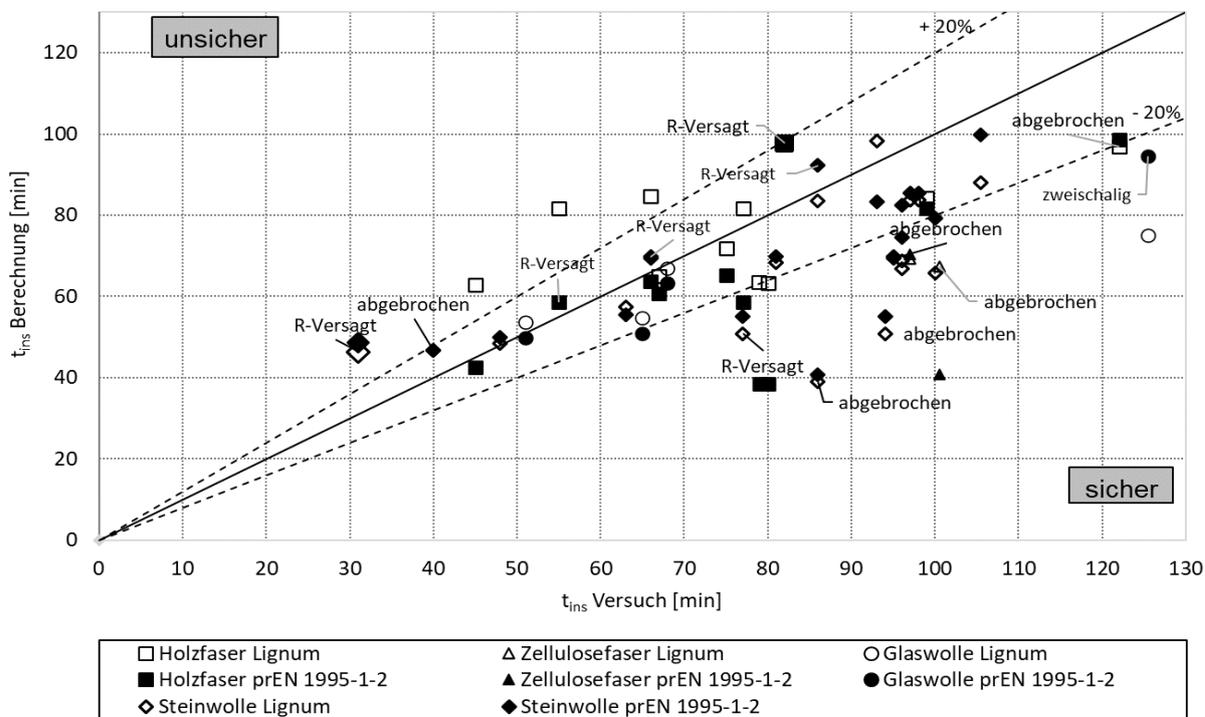
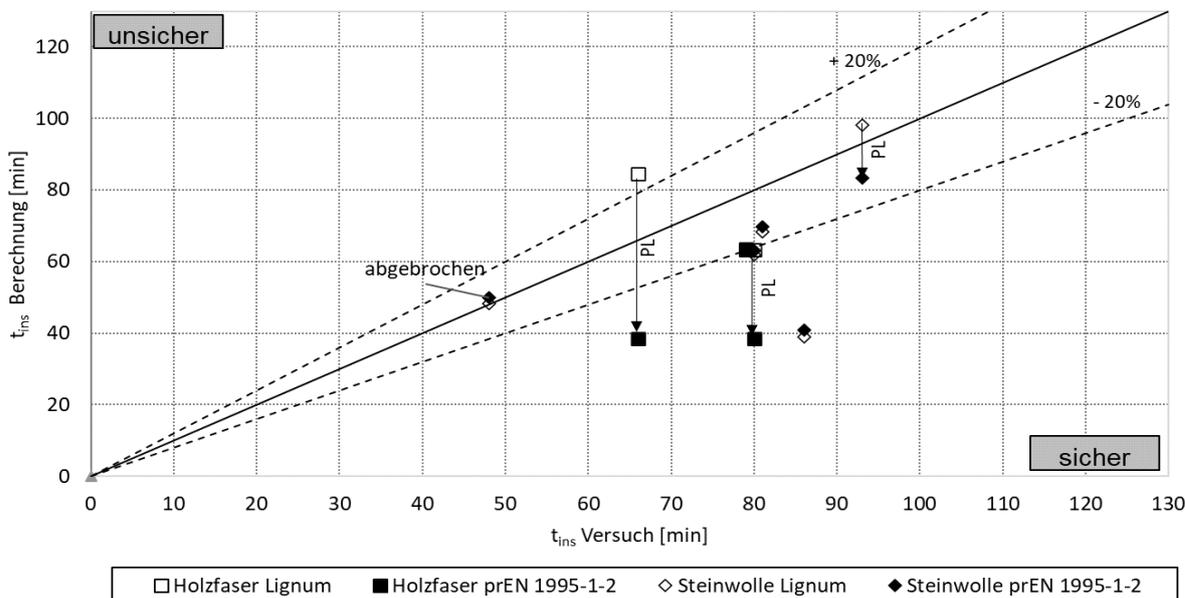


Abbildung 19: Vergleich der Isolationszeit mit Versuchsergebnissen von auf Raumabschluss versagenden Konstruktionen und Einfluss der Begrenzung der Schutzzeit für Dämmstoffe (PL).



Die detaillierte, schichtenweise Auswertung der in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellten Versuche liefert folgendes Ergebnis:

- Die Berechnung der untersuchten Konstruktionen mit dem Verfahren nach prEN 1995-1-2:2020 (E) liegt hinsichtlich des Raumabschlusses über alle Feuerwiderstandsdauern auf der sicheren Seite.
- Durch die Berücksichtigung des Versagens der Dämmstoffe über das Protection Level werden die bisher auf der unsicheren Seite liegenden Konstruktionen auf die sichere Seite verschoben.
- Die Aussage der zu konservativ berücksichtigten zweiten Gipslage zeigt sich im schichtenweisen Vergleich entsprechend Abbildung 14.
- Die neuen Erweiterungen nach prEN 1995-1-2:2020 (E) kann abhängig von der Konstruktion zu einer kleineren aber auch größeren Abweichung zum Versuchsergebnis führen. Durch die Anpassung des Protection Level werden die Konstruktionen konservativer beurteilt.

Um die Versuche zu erfassen, wurde eine Datenbank entwickelt, in der diese Versuche aufgenommen werden können. Neben den seitens der Hersteller zur Verfügung gestellten Versuche, konnten auch die dem Lehrstuhl vorliegenden Versuchsergebnisse (z.B. eigene Versuche aus vorangegangenen Projekten) in die Datenbank aufgenommen und zielgerichtet ausgewertet werden. Die gegenwärtig lokal in einer Access-Datenbank entwickelte Struktur kann zukünftig in eine Online-Datenbank überführt werden. Eine umfangreiche Datenbank mit Brandversuchsergebnissen wäre eine hilfreiche Grundlage für zukünftige Projekt und eine Grundlage für statistische Auswertungen sowie Auswertungsansätze des Machine-Learnings. Für die Untersuchungen und Auswertungen in diesem Projekt, wurden die genannten, seitens der Hersteller zur Verfügung gestellten Versuche sowie dem Lehrstuhl vorliegende Versuchsergebnisse anonymisiert erfasst und ausgewertet. Eine Herausforderung ist die anonymisierte und datenschutztechnisch konforme Erfassung, falls die Daten projektübergreifend verwendet werden sollen.

3.3 Bedarfsanalyse der Baupraxis in Gebäudeklasse 5

Um praktisch relevante Konstruktionen zu identifizieren, wurden ca. 190 Bauteile (Wand- und Deckenkonstruktionen) mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten unterschiedlicher Hersteller (aus den Konstruktionskatalogen), dem aktuellen Entwurfsdokument DIN 4102-4/A1:2018-11, sowie der Plattform dataholz.eu gesichtet und zusammengestellt. Diese Konstruktionen wurden zusätzlich mit einem in diesem Vorhaben weiterentwickelten Berechnungstool zur Ermittlung der raumabschließenden Funktion von Bauteilen geprüft. Aus der erarbeiteten Matrix konnten Bauteilaufbauten abgeleitet werden, die typischerweise für Konstruktionen mit hohen Feuerwiderstandsdauern eingesetzt werden. Folgende Randbedingungen für Mindestabmessungen konnten zusammenfassend gewonnen werden. Einzelne Sonderkonstruktionen werden nicht separat aufgeführt.

Bekleidung:

- Feuerschutzplatten (GKF) oder Gipsfaserplatte (GF) Mindestdicke 25 mm (2 x 12,5 mm oder 1 x 25 mm)
- GKF oder GF mit einer Mindestdicke von 18 mm in Kombination mit einer Holzwerkstoffplatte (Mitteldichte Faserplatte (MDF) oder OSB-Platte (OSB))

Hohlraumdämmstoffe:

- Mineralwolldämmstoffe (Steinwolle (SW) mit einer Rohdichte $\geq 30\text{kg/m}^3$)
- Mineralwolldämmstoffe (Glaswolle (GW) mit einer Rohdichte $\geq 11\text{kg/m}^3$) nur in Kombination mit einer Bekleidungsstärke von mind. 30 mm (2 x 15 mm) GF oder GKF
- Variation der Dämmstoffdicke
- Biogene Dämmstoffe als Holzfaserdämmstoffe (HF) und Zellulosedämmstoffe (Zelluloseeinblasdämmstoffe – ZF)

Wärmedämmverbundsysteme:

- mineralisch mit Steinwolldämmplatten
- Holzfaserdämmplatten

Auf eine Untersuchung von Hohlräumen innerhalb von Wandelementen wird im Rahmen des Forschungsvorhabens verzichtet, auch weil diese innerhalb der MHolzBauRL (Bauministerkonferenz 2021) ausgeschlossen sind als auch im Anwendungsbereich nur eine begrenzte Bedeutung aufweisen.

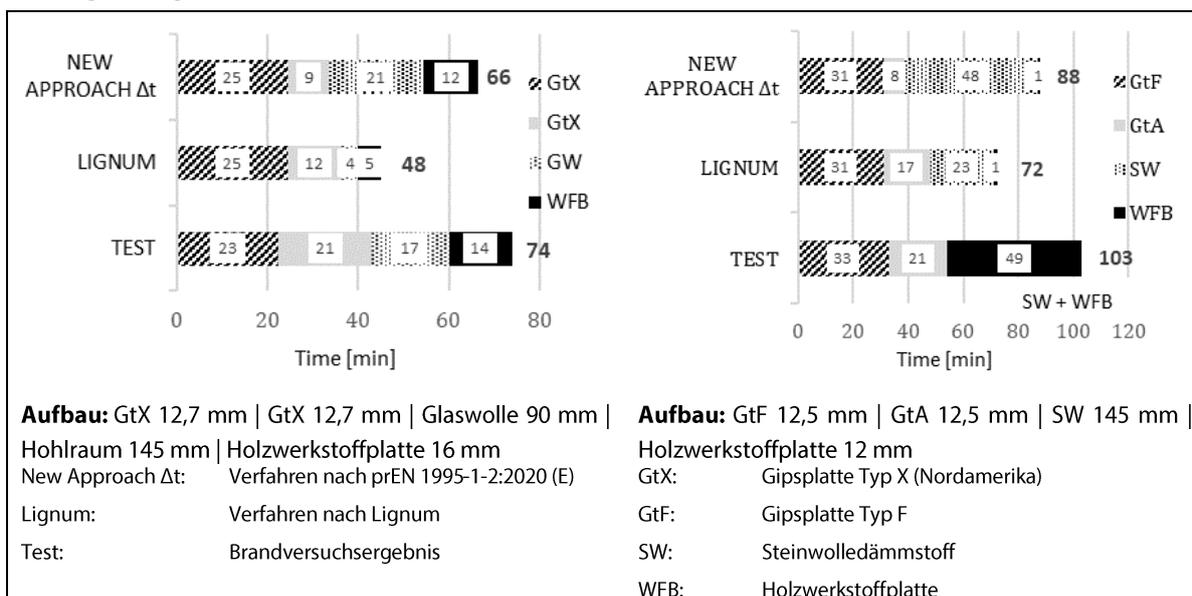
Weiterführend wurden keine Zellulosematten berücksichtigt, da diese nicht mehr am Markt verfügbar sind.

4 Erweiterungskonzept für rechnerische Nachweise bis zur GK 5

4.1 Allgemeines

Durch die starke Streuung der Ergebnisse (vgl. Abbildung 18) wurde eine Betrachtung der Schutzfunktionen der Einzelschichten durchgeführt. Hierfür wurde in den Voruntersuchungen bereits ein Vergleich mit geprüften Konstruktionen in der COST- Action FP 1404 durchgeführt und die dargestellten Abweichungen anhand von Einzelschichten verglichen.

Abbildung 20: Vergleich der Rechenmethoden anhand von Einzelschichten nach (Rauch et al. 2018)



In Abbildung 20 wird das Ergebnis der Vergleichsrechnung nochmals bestätigt. Die zweite Bekleidungsanlage wird im Berechnungsverfahren unterschätzt. Je nach Schutzzeit der ersten Lage wird die Schutzzeit der Dämmstoffe im Verfahren nach Lignum unter, in der Erweiterung des Berechnungsverfahrens nach Mäger und Just eher überschätzt.

4.2 Konzept zur Modifikation und Erweiterung vorbenannter Rechenmodelle

Durch das additive Berechnungsverfahren ist es möglich, die Einzelschichten gesondert zu betrachten und abhängig von der Vorerwärmung sowie dem Hinterlegungsmaterial in das Berechnungsverfahren zu implementieren. Eine Methode, neue Materialien in das Berechnungsverfahren zu implementieren, wurde im Rahmen der Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren nach (Maeger et al. 2019) vorgestellt.

Basierend auf der Vorstellung der Berechnungsverfahren fließen die Ergebnisse aus den Untersuchungen des Raumabschlusses ebenso in die Berechnung der Tragfähigkeit über den Beginn des Abbrandes (t_{ch}) bzw. das Versagen / Abfallen (t_f) der Einzelschichten mit ein. Somit liegt der Fokus auf der Untersuchung der Grundschutzzeiten bzw. des Abfallens von Einzelschichten, da diese beiden Faktoren maßgeblich beide Verfahren beeinflussen. Ergänzend hierzu wird durch (Rauch 2022) ein Verfahren vorgestellt, um die Versagenszeiten aller Einzelschichten explizit zu berücksichtigen. Dies stellt eine zusätzliche Erweiterung der bisher vorhandenen Methodik (Maeger et al. 2019) dar. In der weiteren Betrachtung werden somit die Einzelschichten untersucht, die in alle Berechnungsmodelle für den Raumabschluss implementiert werden können. Auf eine detaillierte Untersuchung des Verfahrens der Tragfähigkeit wird verzichtet, da das Verfahren

in der prEN 1995-1-2:2021-11 noch modifiziert wird. Um diese Anpassungen zu ermöglichen, sind die Eingangswerte aus der Untersuchung des Raumabschlusses notwendig.

4.3 Lückenanalyse und Lösungskonzept

Zur Untersuchung der Einzelschichten wurde eine Lückenanalyse durchgeführt, um einerseits die Optimierungspotentiale des Berechnungsverfahrens sowie notwendige Ergänzungen für die praktische Anwendung zu identifizieren. Daraus ergaben sich folgende Untersuchungsschwerpunkte:

- Bekleidungen aus Holzwerkstoffplatten – Ein einheitliches Berechnungsmodell.
- Bekleidungen aus Gipsplatten – Schutzzeiten und Abfallzeiten sowie die Berücksichtigung mehrlageriger Gipsplatten.
- Ergänzen von Fußbodenaufbauten zur Berechnung von Deckenkonstruktionen.
- Ergänzende Untersuchungen zu Einbauteilen (Steckdosen).
- Untersuchung der Einzelschichten zur Anwendung für lange Feuerwiderstandsdauern.
- Um die einzelnen Schichten zu untersuchen wurde folgendes methodisches Vorgehen gewählt:
- Sichtung und Auswertung der vorliegenden Versuche hinsichtlich der Ergebnisse für einzelne Bauteilschichten.
- Planung und Durchführung von gezielten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung von Schutzzeiten und Versagenszeiten.
- Ergänzende experimentelle Untersuchung.
- Simulationsbasierte Untersuchung.
- Ableitung von Bestimmungsgleichungen.
- Validierung der Bestimmungsgleichungen

4.4 Qualitative Bewertung von Einzelschichten

Um den Einfluss von Einzelschichten qualitativ zu bewerten, wurden durch (Harmathy 1965) bereits 10 Regeln aufgestellt, die durch den Autor (Rauch 2022) sinngemäß übersetzt wurden:

- Regel 1:
Die „thermische“ Schutzwirkung einer Konstruktion, die aus mehreren hintereinanderliegenden Schichten besteht, ist immer größer als die Summe der „thermischen“ Schutzwirkung der einzelnen Schichten, falls diese einzeln und separat beansprucht werden.
- Regel 2:
Die Feuerwiderstandsdauer einer Konstruktion wird durch das Hinzufügen von zusätzlichen Schichten nicht geringer. (ausgenommen sind dünne Schichten aus Metall)
- Regel 3:
Die Feuerwiderstandsfähigkeit von Konstruktionen, die durchgehende Luftspalten oder Hohlräume enthalten, ist größer als die Feuerwiderstandsfähigkeit ähnlicher Konstruktionen mit gleichem Aufbau, jedoch ohne durchgehende Hohlräume.
- Regel 4:
Je weiter ein Luftspalt oder ein Hohlraum von der beanspruchten Seite entfernt ist, desto größer ist der Effekt auf den Feuerwiderstand der Konstruktion.

- Regel 5:
Der Feuerwiderstand einer Konstruktion kann nicht durch eine Vergrößerung eines nach außen vollständig abgeschlossenen Luftspaltes / Hohlraumes erhöht werden. Dies gilt ab einer Mindestdicke von ca. 1,3 cm (0,5 Inches).
- Regel 6:
Schichten aus Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit sollten auf der Seite der Konstruktion eingesetzt werden, auf der ein Ausbruch des Feuers am wahrscheinlichsten ist. Diese Regel gilt nicht für Materialien, die durch physikalische oder chemische Veränderungsprozesse Energie absorbieren oder abgeben.
- Regel 7:
Der Feuerwiderstand von asymmetrischen Konstruktionen hängt von der Richtung des Wärmestromes ab.
- Regel 8:
Feuchtigkeit, wenn sie nicht zu explosionsartigen Abplatzungen führt, erhöht die Feuerwiderstandsfähigkeit.
- Regel 9:
Lastabtragende Elemente wie Balken, Träger und Unterzüge erreichen im Vergleich zu einzeln geprüften Elementen höhere Feuerwiderstandsdauern, wenn sie als Teile von Fußboden-, Dach- oder Deckenbauteilen geprüft werden. Die Elemente werden hier ein- oder mehrseitig geschützt, zusätzlich werden Beanspruchungen umgelagert.
- Regel 10:
Die lastabtragenden Elemente (Balken, Träger, Unterzüge usw.) einer Fußboden-, Dach- oder Deckenkonstruktion können durch andere lastabtragende Elemente ersetzt werden, die bei einer separaten, einzelnen Prüfung eine Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen, die nicht geringer ist als die der Konstruktion selbst.

Diese Regeln bieten eine Grundlage zum Verständnis, um die Ergebnisse der Einzelschichten und deren Auswirkung auf die Schutzzeit der Gesamtkonstruktion qualitativ zu bewerten. Regel 1 entspricht hier nicht mehr aktuellen Erkenntnissen, vor allem für mehrschichtige Holzbauteile. Harmathy begründet seine Regel, dass bei einem doppelt so dicken Material mehr als die doppelte Schutzzeit erreicht wird. Dies gilt nicht für mehrlagige Konstruktionen und Schichten, die ein „Abfallen“ vorweisen, oder abbrennen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sowie nach Schleifer (2009) zeigen, dass durch die Vorerwärmung dahinterliegender Schichten die Summe der Schutzzeiten der Einzelschichten ohne Interaktion größer ist, als bei einer Konstruktion, bei der diese Schichten hintereinander angeordnet sind. Dies gilt nur, falls diese nach dem Erreichen der thermischen Schutzzeit versagen und die dahinterliegende Schicht nicht weiter schützen. Somit wird die Regel neu formuliert:

Die „thermische“ Schutzwirkung einer Konstruktion, die aus mehreren hintereinanderliegenden Schichten besteht, ist immer **kleiner** als die Summe der „thermischen“ Schutzwirkung der einzelnen Schichten, falls diese einzeln und separat beansprucht werden und nach dem Erreichen der thermischen Schutzwirkung die dahinterliegende Schicht nicht mehr vor der direkten Brandbeanspruchung schützen.

5 Experimentelle Untersuchung

5.1 Grundlagen zur experimentellen Untersuchung

Basierend auf Untersuchungen durch Rauch (2022) wurden unterschiedliche Messmethoden sowie verschiedene Größen von Brandprüfkörpern und deren Ausrichtung miteinander verglichen. Das hieraus resultierende Ergebnis bildet die Grundlage für nachfolgende Untersuchungen.

- Temperaturen in Probekörpern werden mit Thermodrähten Typ K gemessen. Die Spitzenausbildung der Thermodrähte hat auf das gemessene Ergebnis nur einen untergeordneten Einfluss, so dass die Ergebnisse aus Versuchen mit verdrehten Spitzen, verschweißten Spitzen, oder Oberflächenthermoelementen vergleichbare Ergebnisse liefern.
- Um den Temperaturdurchgang einzelner Schichten zu messen, kann die Ofengröße und die Ausrichtung vernachlässigt werden. Bei vertikal eingebauten Probekörpern (als Decke) werden minimal geringere Schutzzeiten erreicht (< 8 %). Exemplarisch sind die unterschiedlichen Ofengeometrien in Abbildung 21 bis Abbildung 26 dargestellt.
- Eine Steuerung der Ofentemperatur über Mantelthermoelemente führt zu geringeren Temperatureinwirkungen auf den Probekörper (ca. 5 – 10 %) im Vergleich zu Messungen mit Plattenthermoelementen.
- Einen maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung einer betrachteten Schicht hat die davorliegende Bauteilschicht. Verbleibt die davorliegende Schicht auch nach dem Erreichen ihrer Schutzzeit an der Konstruktion, wird die Schutzzeit der betrachteten Schicht erheblich erhöht. Somit muss das Versagen der Schichten explizit berücksichtigt werden.

Resultierend aus diesen Ergebnissen können vorhandene Untersuchungen untereinander verglichen werden. Neue Untersuchungen wurden alle unter den Randbedingungen nach DIN EN 1363-1:2012-10 durchgeführt. Daraus resultieren folgende Randbedingungen:

- Beanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)
- Ofensteuerung über Platten- Thermometer

Durch kleiner Ofenabmessungen nach DIN 4102-8:2003-10 oder im nicht normativ festgelegten 1-m- Ofen konnte der Prüfaufwand erheblich reduziert werden. Die Thermoelemente wurden im Probekörper als Thermodraht Typ K mit verdrehter Spitze eingebaut, feuerabgewandte Thermoelemente als Oberflächenthermoelemente mit Kupferplatte und Abdeckfilz.

Abbildung 21: Systemskizze -Teil 8 - Ofen

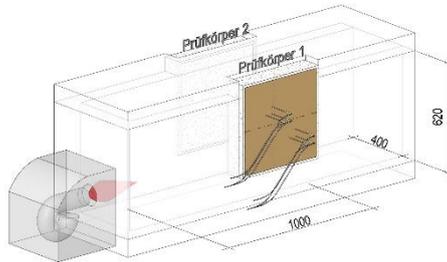


Abbildung 22: Prüfaufbau - Teil 8 - Ofen



Abbildung 23: Systemskizze - 1 m x 1 m Wand / Decke

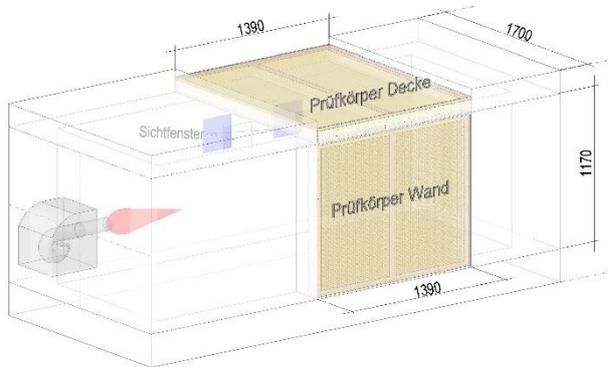


Abbildung 24: Brandprüfung - 1 m x 1 m Wand / Decke



Abbildung 25: Systemskizze Brandversuch 3 m x 3 m

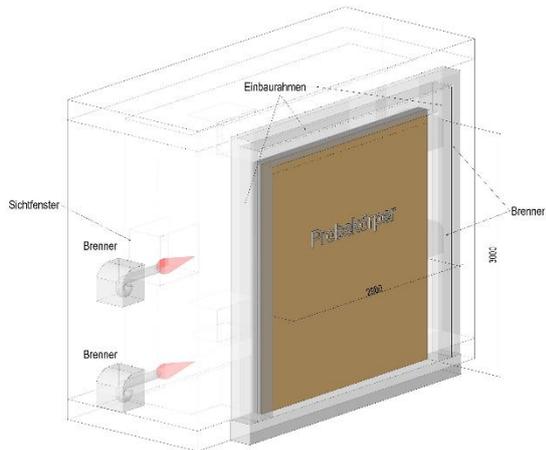


Abbildung 26: Brandversuch 3 m x 3 m



5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Vergleich von Dämmstoffen

5.2.1 Grundlagen

Innerhalb dieser Arbeit wurde der Einfluss unterschiedlicher Ausrichtungen sowie Probekörperabmessungen und Ofengrößen verglichen. Die experimentellen Ergebnisse ermöglichen zusätzlich einen Vergleich des Beitrages der unterschiedlichen Dämmstoffe zum Feuerwiderstand sowie die Auswirkung unterschiedlicher Ausrichtungen (Wand / Decke). Ebenso wurde unterschiedliche Gefachbreiten (625 mm und 835 mm) untersucht (Rauch 2022).

Tabelle 5: Untersuchungsziele der experimentellen Versuche

Versuch	Untersuchungsziel	
3 x 3 m – Wandversuche (unbelastet)	Vergleich unterschiedlicher Dämmstoffe und Gefachbreiten	Vergleich der unterschiedlichen Probekörperabmessungen und Versuchsskalierungen
1 m – Wand- und Deckenversuch	Einfluss der Ausrichtung	
Teil 8 - Versuche	Vergleich des Wärmedurchgangs unterschiedlicher Dämmstoffe	

5.2.2 Versuchsaufbau

Um die Ausrichtung der Versuchskörper mit zu berücksichtigen, wurden die Versuche im 1-m- Ofen sowohl horizontal als auch vertikal ausgerichtet durchgeführt. Ebenso wurde die Gefachbreite im „Großversuch“ an der 3 x 3 m Wand variiert, um die Standardmaße 62,5 cm und 83,3 cm abzudecken. Der zugehörige Prüfbericht ist in Anhang A1 enthalten.

Abbildung 27: Systemschnitt Versuch

	Aufbau: MDF-Platte: 15 mm Dämmstoff: 120 mm Spanplatte: 22 mm GF- Platte: 15 mm (GF-Platte: 15 mm)	mit:	SW: Steinwolle GW: Glaswolle HF: flexible Holzfaserdämmung ZF: Zellulosefaser Einblasdämmstoff GF: Gipsfaserplatte
	Versuchsreihe 1: SW 120mm / 38 kg/m ³ ZF 120 mm / 58 kg/m ³ 2 x 15 mm GF		
	Versuchsreihe 2: GW 120mm/21,5 kg/m ³ HF 120mm/ 45 kg/m ³ 1 x 15 mm GF		

Abbildung 28: PK ZF- groß



Abbildung 29: PK ZF, SW- klein



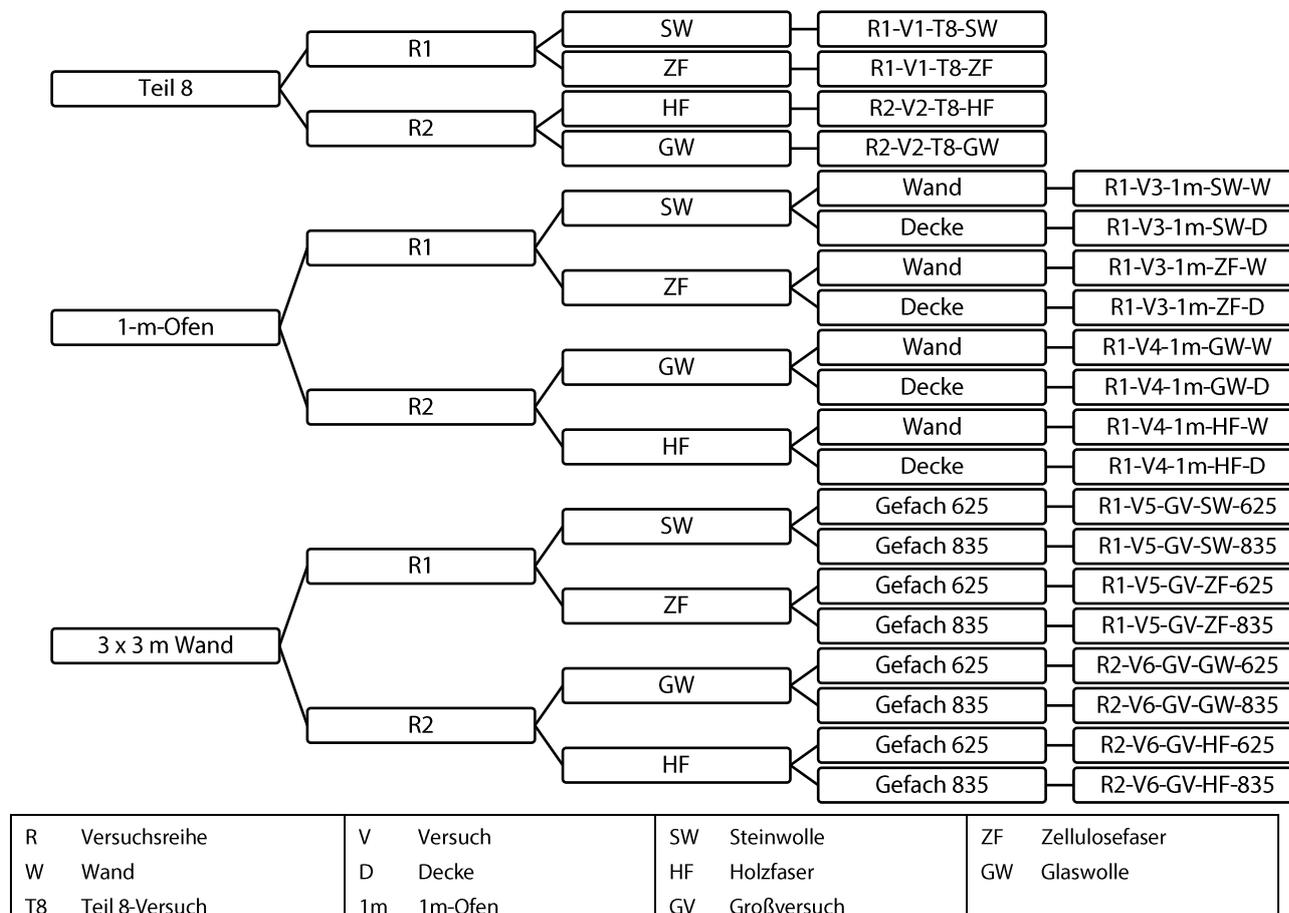
Abbildung 30: PK ZF – Teil 8



Abbildung 28 bis Abbildung 30 zeigen beispielhaft die geprüften Probekörper.

Eine systematische Bezeichnung der Einzelnen Probekörper ist in Abbildung 31 dargestellt.

Abbildung 31: Übersicht der geprüften Konstruktionen



5.2.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in den unterschiedlichen Ofengrößen mit den unterschiedlichen Dämmstoffen betrachtet. Es wurde ausschließlich der Wärmedurchgang und das Versagen (Abfallverhalten) ohne eine zusätzliche mechanische Belastung gemessen bzw. beobachtet (nur raumabschließend). Die Versuche wurden bis zum vollständigen Versagen der Konstruktion durchgeführt. Bei unterschiedlichem Aufbau innerhalb eines Brandversuchs erfolgte die Beflammung bis zum ersten Erreichen eines Versagenskriteriums.

Abbildung 32: 3-m Wand ZF/SW kurz vor dem E-Versagen



Abbildung 33: Kleinbrandversuch (1-m) Wand und Decke nach dem E-Versagen



Abbildung 34: Teil-8 Versuch (ca. 50 cm x 50 cm) ZF nach dem I und kurz vor dem E-Versagen



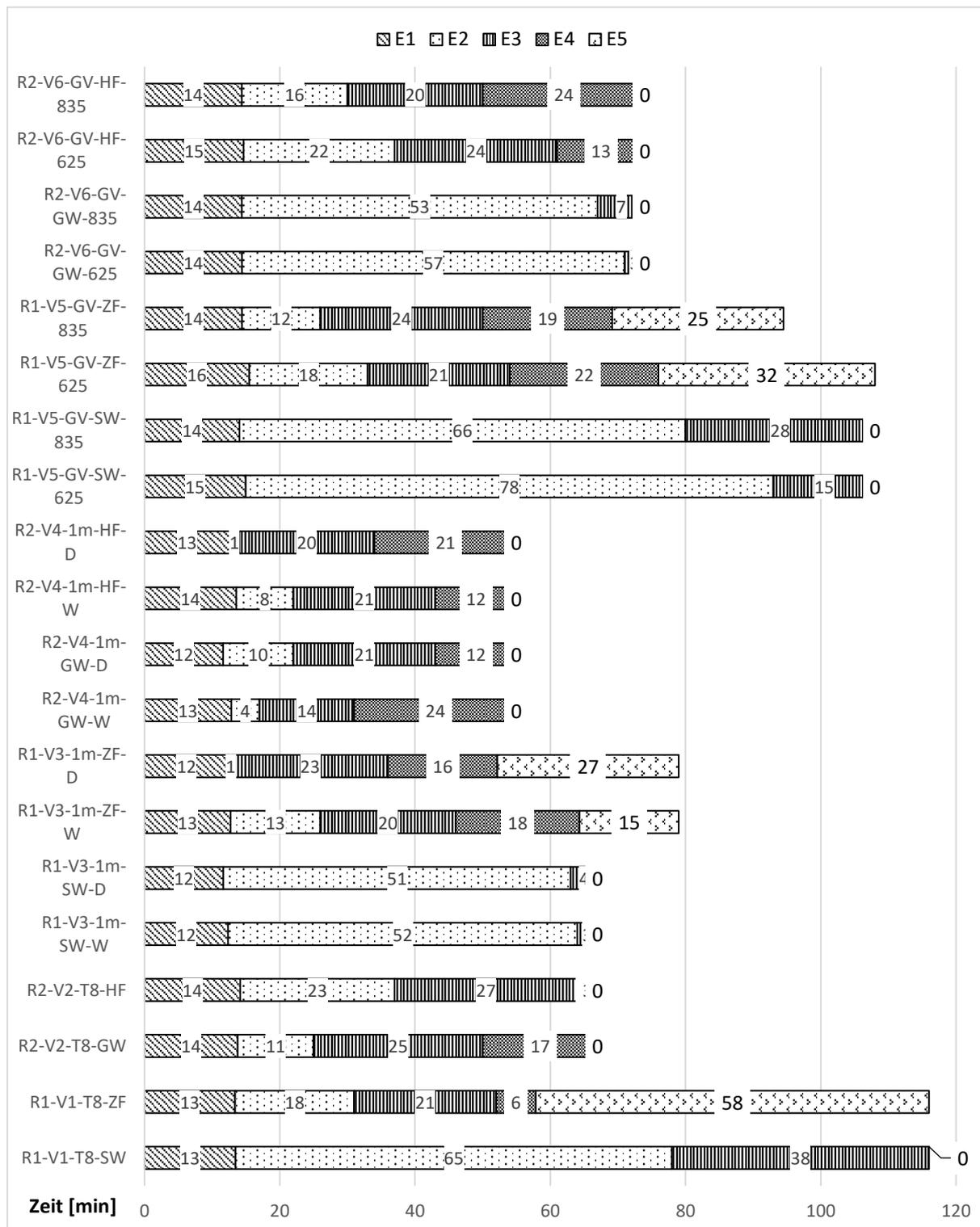
5.2.4 Versuchsergebnis

Die einzelnen Temperaturverläufe der Versuche sind in Anhang A1 dargestellt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur Validierung der Rechenmethoden und Simulation. Zusammenfassend ergaben sich folgende Versagenszeiten aus den Versuchen:

Tabelle 6: Versagenszeiten der jeweils maßgebenden Konstruktion

Versuch Nr.	E1 Zeit bis 300 °C [min]	E2 Zeit bis 300 °C [min]	E3 Zeit bis 300 °C [min]	E4 Zeit bis 300 °C [min]	Versagen (EI) [min]
R1-V1-T8-SW	13,5	78,4	n.e.	n.e.	n.e.
R1-V1-T8-ZF	13,4	31,0	52,1	57,9	116,0 (E); 114,5 (I)
R2-V2-T8-GW	13,8	24,9	49,9	-	70,0 (E); 68,0 (I)
R2-V2-T8-HF	14,2	37,5	64,5	-	n.e.
R1-V3-1m-SW-W	12,3	63,9	n.e.	n.e.	n.e.
R1-V3-1m-SW-D	11,7	62,7	76,7	n.e.	n.e.
R1-V3-1m-ZF-W	12,7	25,8	46,4	64,3	n.e.
R1-V3-1m-ZF-D	12,4	12,9	36,2	52,2	79,0 (I)
R2-V4-1m-GW-W	12,8	16,8	31,2	-	n.e.
R2-V4-1m-GW-D	11,6	22,4	42,5	-	n.e.
R2-V4-1m-HF-W	13,6	21,5	42,5	-	n.e.
R2-V4-1m-HF-D	12,6	13,9	34,2	-	55,0 (E); 50,8 (I)
R1-V5-GV-SW-625	14,9	93,0	n.e.	n.e.	n.e.
R1-V5-GV-SW-835	14,1	80,5	n.e.	n.e.	n.e.
R1-V5-GV-ZF-625	15,5	32,9	54,2	76,0	n.e.
R1-V5-GV-ZF-835	14,4	25,7	50,3	69,2	108,0 (E); 94,5 (I)
R2-V6-GV-GW-625	14,4	70,9	n.e.	-	n.e.
R2-V6-GV-GW-835	14,4	66,9	n.e.	-	n.e.
R2-V6-GV-HF-625	14,7	37,1	60,6	-	n.e.
R2-V6-GV-HF-835	14,4	30,0	50,3	-	74,0 (E); 67,8 (I)
n.e. nicht erreicht - Schicht 4 in diesem Versuchsaufbau nicht vorhanden E Ebene der Konstruktion beginnend von der feuerzugewandten Seite aus					

Abbildung 35: Versagenszeiten der jeweils maßgebenden Konstruktionsschichten der betrachteten Aufbauten



Neben dem Vergleich der Dämmstoffe an sich, bietet die Versuchsserie die Möglichkeit, einen identischen Versuchsaufbau in unterschiedlichen Brandöfen sowie mit unterschiedlichen Abmessungen zu vergleichen.

5.3 Experimentelle Untersuchungen zu den Abbrandraten von Holzwerkstoffplatten

5.3.1 Grundlagen

Zur Bestimmung von Abbrandraten für Holz- und Holzwerkstoffe liegen gegenwärtig noch keine einheitlichen, normativ geregelten Messmethoden vor. Die Abbrandraten wurde in der Literatur üblicherweise aus dem unverkohnten Restquerschnitt und der Beanspruchungszeit ermittelt. Die Ergebnisse wurden durch (Wörle 2019) zusammengefasst und durch experimentelle Untersuchungen erweitert. Ergänzend dazu wurden in einer Masterarbeit weitere experimentelle Untersuchungen zum Abbrand von Holzwerkstoffplatten durchgeführt (Goth 2021). Im Gegensatz zu den bisherigen wurden die zusätzlichen Untersuchungen in Anlehnung an die Methoden zur Bestimmung der Grundschutzzeit nach (Maeger et al. 2019) bzw. der Abbrandrate für Holzwerkstoffplatten nach Anhang C entsprechend (prEN 1995-1-2:2020 (E)) bestimmt. Im Gegensatz zur Bestimmung des Restquerschnittes wurde hierbei die Zeit bis zum Erreichen der 300 °C Isotherme gemessen mit Thermoelementen ermittelt und daraus die Abbrandrate berechnet.

$$\beta = \frac{h_p}{t} \quad [\text{mm/min}] \quad \text{Gl. 4}$$

β	[mm/min]	Abbrandrate
h_p	[mm]	Abbrand/ Verkohlungstiefe
t	[min]	Dauer der Brandbeanspruchung

Die berechnete Abbrandrate wurde mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

5.3.2 Versuchsaufbau

Es wurden für den Kleinprüfstand nach DIN 4102-8:2003-10 flächige Holzwerkstoffplatten vorbereitet. Entsprechend den Angaben nach Anhang C der prEN 1995-1-2:2021-10 wurden die Holzwerkstoffplatten mit einer Spanplatte (Dicke 19 mm) hinterlegt. Somit entspricht der Zeitpunkt bis zum Erreichen der Temperatur von 270°C der Grundschutzzeit nach Schleifer (2009). Um den Dickeneinfluss zu untersuchen, wurden die Platten zweilagig und einlagig, dann mit doppelter Dicke eingebaut. Um einen Vergleich der Temperatur der einlagigen mit der zweilagigen Platte zu erhalten, wurde die einlagige Platte in der Mitte mit einem Stufenfalz gestoßen und dort die Vergleichsthermoelemente eingebaut (vgl. hierzu Abbildung 36 bis Abbildung 38)

Abbildung 36: Systematische Darstellung der Teil- 8 Prüfung der Holzwerkstoffplatten (Goth 2021)

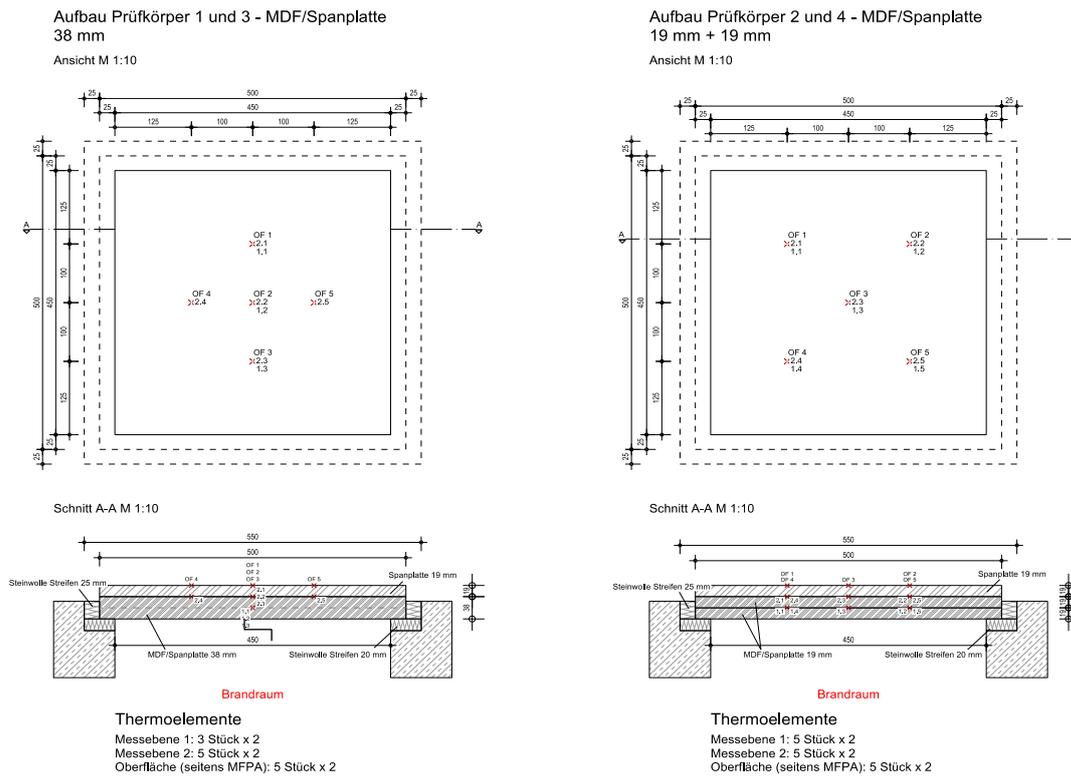
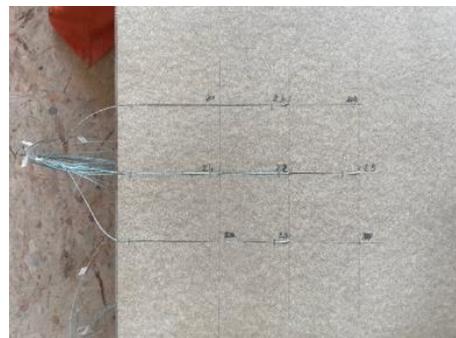


Abbildung 37: Stufenfalz der einlagigen Holzwerkstoffplatte (Goth 2021)



Abbildung 38: Thermolemente zwischen den Holzwerkstoffplatten (Goth 2021)



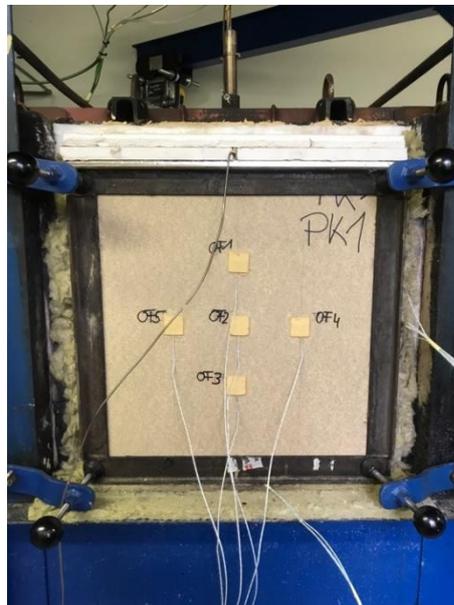
5.3.3 Versuchsdurchführung

Die experimentellen Untersuchungen wurden im Kleinprüfstand nach DIN 4102-8:2003-10 durchgeführt. Die Ofensteuerung erfolgte abweichend hiervon entsprechend DIN EN 1363-1:2012-10.

Abbildung 39: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MFPA Leipzig



Abbildung 40: Prüfkörper 1 nach dem Einbau in den Brandprüfofen (Goth 2021)



Da der Prüfofen zwei gegenüberliegende Öffnungen besitzt, wurden jeweils zwei Probekörper gleichzeitig geprüft. Zur Bestimmung der Grundschutzzeit wurden die zu untersuchenden Platten nach prEN 1995-1-2:2021-10 feuerabgewandt mit einer Spanplatte hinterlegt. Die Temperaturen wurden bei der zweilagigen Plattenkonfiguration zwischen den Platten, bei der einlagigen Konfiguration in der Mitte der Plattendicke bestimmt.

Tabelle 7: Prüfkörper und Materialkennwerte der geprüften Holzwerkstoffplatten

PK	Holzwerkstoffplatte	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m ³]
PK 1	MDF, roh, E1	38	775
PK 2	MDF, roh, E1	2 x 19	704
PK 3	Spanplatte P2, roh	38	620
PK 4	Spanplatte P2, roh	2 x 19	655
PK 5	Furnierschichtholz STEICO LVL X	27	576
PK 6	Furnierschichtholz STEICO LVL X	21	603
PK 7	Sperrholz Fichte	30	476
PK 8	Sperrholz Fichte	2 x 15	430

Die Prüfberichte mit den detaillierten Aufbauten und Temperaturverläufen zu den einzelnen Probekörpern sind im Anhang A. 16 dargestellt.

5.3.4 Versuchsergebnis

Aus den Versuchen wurde die Zeit bis zum Erreichen von 300 °C ($t_{300, \text{Versuch}}$) entsprechend Tabelle 8 bestimmt und die Abbrandrate, gemittelt über die Plattendicke (vgl. Tabelle 9), berechnet. Bei zweilagigen Aufbauten wurde zwischen Platte 1 (feuerzugewandt) und Platte 2 unterschieden. Aus den Ergebnissen kann die Abbrandrate der Holzwerkstoffplatten abgeleitet werden und es zeigt sich der Einfluss der Vorerwärmung auf die Abbrandrate von Platte 2. Eine Zusammenstellung entsprechender Abbrandraten für Holzwerkstoffplatten erfolgt in Abs. 7.1.4.

Tabelle 8: Versuchsergebnis – Schutzzeiten

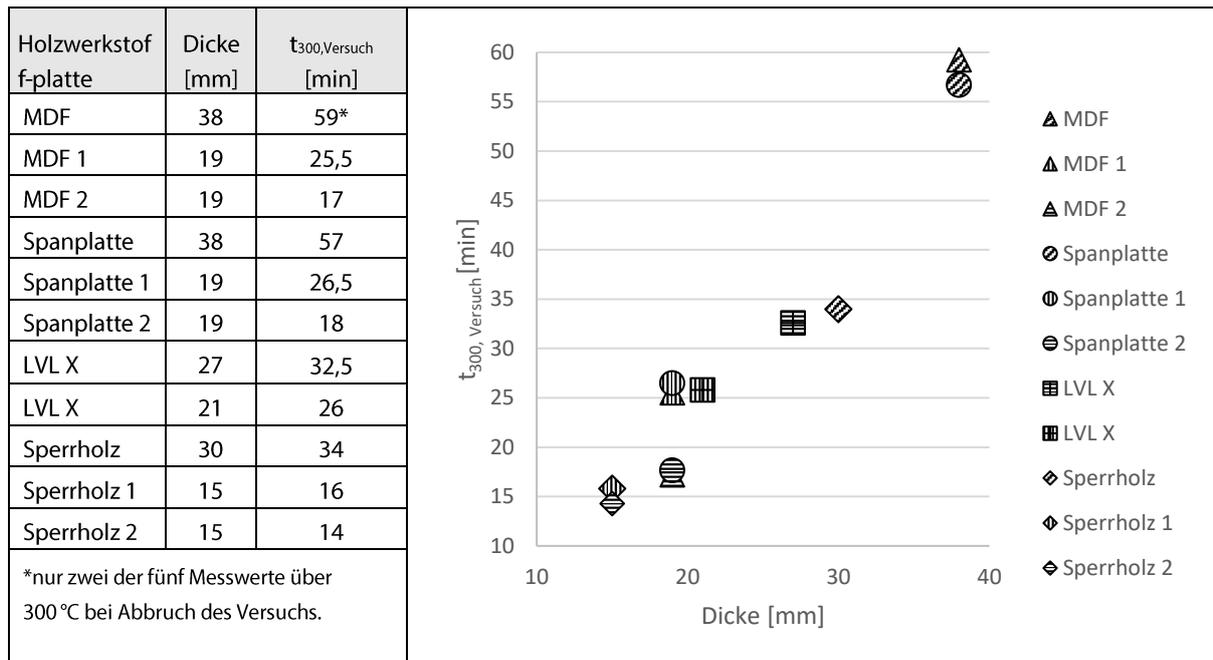
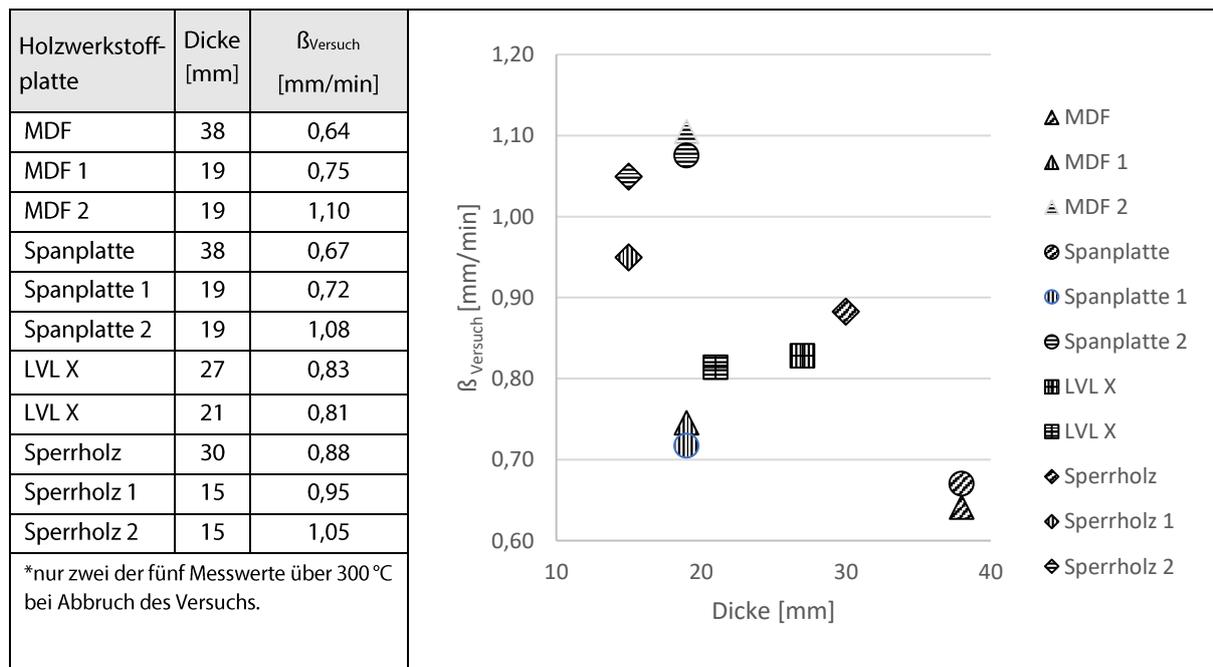


Tabelle 9: Versuchsergebnis: Abbrandraten rückgerechnet aus dem 300 °C Kriterium



5.4 Experimentelle Untersuchungen zur Durchwärmung und zum Versagen von Gipsplatten

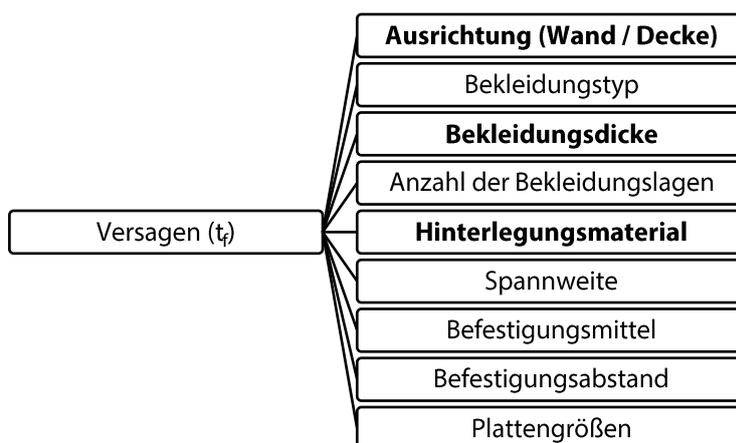
5.4.1 Grundlagen

Ein entscheidender Einflussparameter für den Feuerwiderstand mit Gipsplatten bekleideter Holztafel- und Holzmassivbauwänden ist neben der Durchwärmung die Versagenszeit bzgl. des Abfallens. Während bei der Durchwärmung bis zum Erreichen der thermischen Schutzwirkung der Einfluss dahinterliegender Schichten, wie beispielsweise Dämmstoffe oder massive Brettsperrholzelemente über den feuerabgewandten Positionskoeffizient $k_{pos,unex}$ mitberücksichtigt werden, liegen für die Versagenszeiten nur auf Holztafelbauwänden ermittelte Werte vor. Hinsichtlich der Durchwärmung wirkt sich eine Hinterlegung der Gipsplatten mit Dämmstoffen negativ im Vergleich zu Massivholzelementen oder Holzwerkstoffplatten aus. Durch die geringere Wärmeleitfähigkeit und geringere spezifische Wärmekapazität von Dämmstoffen im Vergleich zu Holz tritt hinter der Gipsplatte ein „Wärmestau“ auf, der zu einer schnelleren Erwärmung und somit einem früheren Erreichen der Schutzzeit führt. Vorliegende Ergebnisse von Versuchen mit Massivholzelementen (vgl. Datenbank Abs. 3.2) zeigen neben der langsameren Erwärmung ebenfalls ein späteres Abfallen der Gipsbekleidungen. Im Vergleich zu diesen Versuchen liegen jedoch keine experimentellen Ergebnisse vor, in denen vergleichbare Konstruktionen mit identischer Bekleidungsstärke sowie Bekleidungsanbau, gleichen Verbindungsmitteln und identischem Verbindungsmittelabstand untersucht wurden. Die Schutzwirkung von Bekleidungsanlagen kann entsprechend DIN EN 13381-7:2019-06 am belasteten Großversuch ermittelt werden.

In dieser Arbeit soll somit ein direkter Vergleich zwischen einer 18 mm dicken GKF- Bekleidung auf einer Unterkonstruktion in Holztafelbauweise sowie auf einem Brettsperrholzelement durchgeführt werden (vgl. Referenzversuch Abbildung 42). Um den durch Rauch (2022) untersuchten Skalierungseffekt für Gipsplatten zu untersuchen, wurden das Bekleidungsanbau mit identischen Befestigungsmittelabständen auch im 1-m-Ofen mit unterschiedlichen Bekleidungsstärken (12,5 mm und 18 mm) sowie hinterlegt mit Brettsperrholz (BSP) und Dämmung in einer Holztafelbauweise (HTB), als Wand und als Decke untersucht (vgl. Abbildung 46).

Um die Referenzversuche festzulegen, wurden die wesentlichen Einflussparameter auf die Versagenszeiten identifiziert und basierend darauf die Versuchsserie festgelegt.

Abbildung 41: Einflussfaktoren auf das mechanische Versagen/Abfallen von Bekleidungsanlagen mit Gipsplatten



Von den in Abbildung 41 dargestellten Einflussfaktoren wurden die **fett** markierten Parameter untersucht.

Abbildung 42: Einflussfaktoren auf das Versagen von Bekleidungssystemen und zugeordnete Versuchsconfiguration bzw. Ofengröße mit Bezug auf den Referenzversuch



Die spezifischen Einflussparameter wurden im Rahmen der Versuchsserie folgendermaßen festgelegt:

- **Bekleidungstyp:**
Für alle Versuche wurden Feuerschutzplatten (GKF) verwendet.
- **Anzahl der Bekleidungslagen**
- Für diese Versuchsserie wurde ein Aufbau mit einer Bekleidungslage gewählt.
- **Spannweite**
- Entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E) wurden maximale Befestigungsabstände von 625 mm für diesen Vergleichsversuch festgelegt. Die Spannweite wurde für alle Bekleidungsstärken beibehalten, um den Einfluss der anderen Parameter (wie beispielsweise die Ausrichtung) zu untersuchen. DIN 18180 schreibt für 12,5 mm GKF- Platten, quer befestigt, an der Decke einen Maximalabstand von 500 mm vor. Diese Randbedingung wurde zugunsten der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt.
- **Befestigungsmittel**
- Zur Befestigung wurde Klammern verwendet (vgl. Prüfbericht).
- **Befestigungsabstand**
- Der Abstand der Klammern untereinander wurde auf 80 mm entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E) festgelegt.
- **Plattengröße**
- Die Plattengröße hängt von den Versuchen ab. Wenn möglich, wurde eine Platte mit den Standardabmessungen Länge x Breite = 2000 mm x 1250 mm eingesetzt.

5.4.2 Versuchsaufbau

Die Dicke und Wahl der Brettsperrholzelemente (BSP) spielt für die Untersuchung der feuerzugewandten Gipsbekleidung eine untergeordnete Rolle. Es wurden Elemente verwendet, die im Rahmen des Projektes bereitgestellt wurden. Für die Referenzdecke wurde ein 180 mm dickes BSP- Element verwendet, für die Wand- / Decke im 1-m- Ofen jeweils ein 120 mm dickes BSP- Element. Die Referenzdecke war auf der feuerzugewandten Seite mit 18 mm GKF- Platten bekleidet. Die untersuchten Platten hatte eine Abmessung von 2000 mm x 1250 mm. Bei den 1-m- Versuchen wurden für die Wand Bekleidungsabmessungen von ca. 1100 mm x 625 mm bzw. 550 mm x 625 mm gewählt. An der Decke 1140 mm x 625 mm bzw. 570 mm x 625 mm. Hier war jeweils eine Hälfte in voller Wandhöhe bzw. Deckenlänge mit einer Platte bekleidet. Die zweite Hälfte der Prüfkörper wurde mit zwei Platten bekleidet. Somit wurde eine T- Stoßfuge erzeugt. Es wurden Thermoelemente hinter jeder Lage und in den Holzquerschnitten eingebaut, um Schutz- und Versagenszeiten der Einzelschichten zu ermitteln. Die Thermoelemente innerhalb der Holzbauelemente dienten zur Bestimmung der Temperaurentwicklung im Holzquerschnitt. Die genauen Aufbauten, zugehörigen Produkte sowie die genaue Lage der Thermoelemente sind Anhang A11 zu entnehmen. Somit ergeben sich folgende Versuchskonfigurationen:

Tabelle 10: Versuchskonfigurationen

Prüfkörper Nr.	Bekleidung feuerzugewandt	Dämmung	Bekleidung feuerabgewandt
V1-D-groß-HTB-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	Mineralwolle d = 200 mm (Steinwolle) $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$ Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Spanplatte d = 18 mm $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ GKF Platte d= 18 mm
V1-D-groß-BSP-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	180 mm BSP BSP – 7 Lagen Aufbau: 24,3-24,3-24,3-34,3-24,3- 24,3-24,3	-
V2-W -1m-HTB-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	Mineralwolle d = 120 mm (Steinwolle) $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$ Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Spanplatte d = 18 mm $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ GKF Platte d= 18 mm
V2-D-1m-HTB-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm Größe: 2,0 m x 1,25 m befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	Mineralwolle d = 120 mm (Steinwolle) $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$ Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Spanplatte d = 18 mm $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ GKF Platte d= 18 mm
V3-W-1m-BSP-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	120 mm BSP BSP – 5 Lagen Aufbau: 30+20+20+20+30	-
V3-D-1m-BSP-18 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	120 mm BSP BSP – 5 Lagen Aufbau: 30+20+20+20+30	-

Fortsetzung Tabelle 10: Versuchskonfigurationen

V4-W-1m-HTB-12,5 mm GKF	GKF Platte d = 12,5 mm Größe: 2,0 m x 1,25 m befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	Mineralwolle d = 120 mm (Steinwolle) $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$ Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Spanplatte d = 18 mm $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ GKF Platte d= 18 mm
V4-D-1m-HTB-12,5 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	Mineralwolle d = 120 mm (Steinwolle) $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$ Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	Spanplatte d = 18 mm $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ GKF Platte d= 18 mm
V5-W-1m-BSP-12,5 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	120 mm BSP BSP – 5 Lagen Aufbau: 30+20+20+20+30	-
V5-D-1m-BSP-12,5 mm GKF	GKF Platte d = 18 mm befestigt mit Klammern d = 1,5 mm, Länge 50 mm, Abstand ca. 80 mm, verspachtelt	120 mm BSP BSP – 5 Lagen Aufbau: 30+20+20+20+30	-
mit: D: Decke W: Wand Groß: Decke mit der lichten Prüffläche: ca. 4 m x 1,55 m 1m: Prüfkörper im 1-m- Ofen, Abmessungen 1,10 m x 1,30 m BSP: Prüfkörper mit Brettsperrholzelemente HTB: Prüfkörper als Holztafelbauelement GKF: Feuerschutzplatte			

Ergänzend zur Versuchskonfiguration der Bauteilprüfung ist die Referenzdecke mit den zwei Versuchsfeldern (HTB bzw. BSP), jeweils bekleidet mit 18 mm GKF in Abbildung 43 bis Abbildung 45 dargestellt.

Abbildung 43: Schnittdarstellung der Referenzdecke: Holztafelbau / Brettsperrholz, Bekleidet mit 18 mm GKF

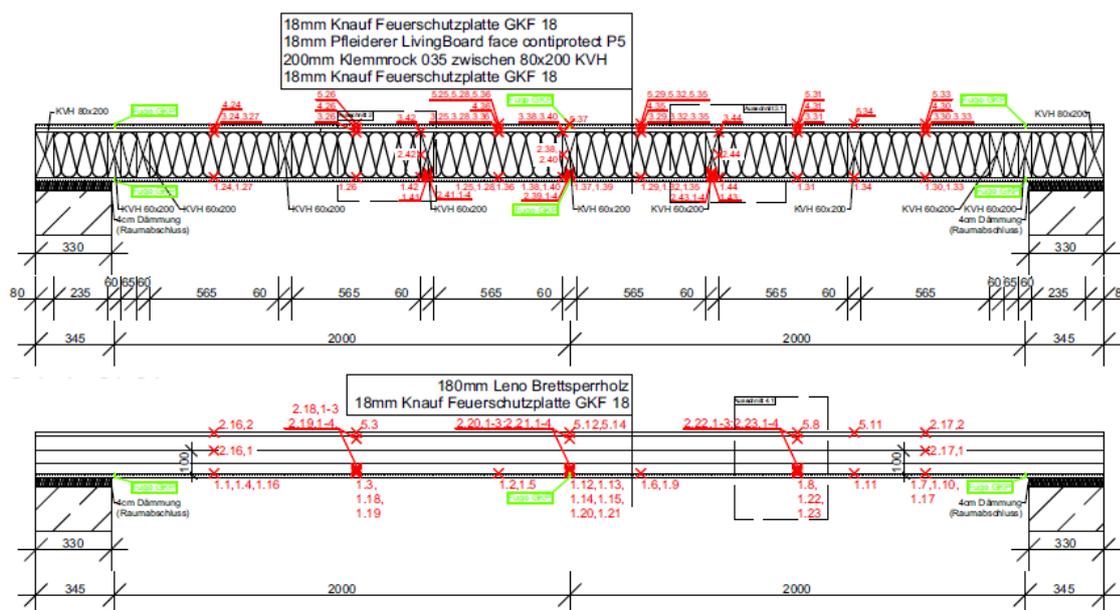


Abbildung 44: Ansicht feuerabgewandt des Probekörpers der Referenzdecke: Holztafelbau / Brettsperrholz, bekleidet mit 18 mm GKF



Abbildung 45: Ansicht feuerzugewandt / aus dem inneren des Brandofens: Holztafelbau / Brettsperrholz, bekleidet mit 18 mm GKF



Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen beispielhaft die Aufbauten für die ergänzenden Prüfungen der Holztafelbauwände / -decken sowie der Brettsperrholzwände / -decken im 1-m-Ofen. Eine detaillierte Darstellung der Versuchsaufbauten kann Anlage A 11 bis A 15 entnommen werden.

Abbildung 46: Systematische Darstellung der Holztafelbauwand / -decke (HTB), bekleidet mit 18 mm GKF - Ansicht

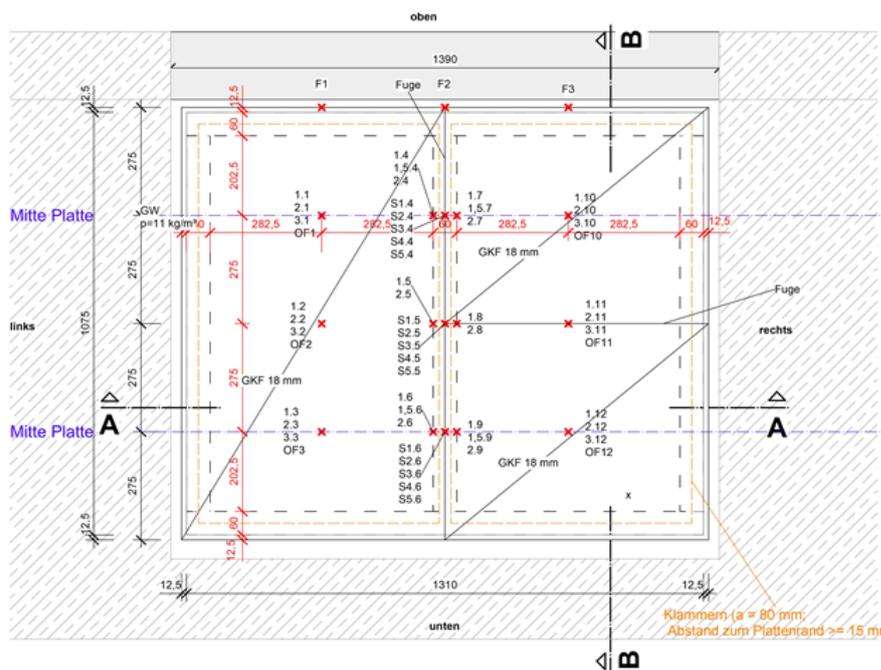


Abbildung 47: Systematische Darstellung der Holztafelbauwand / -decke (HTB), bekleidet mit 18 mm GKF - Schnitt

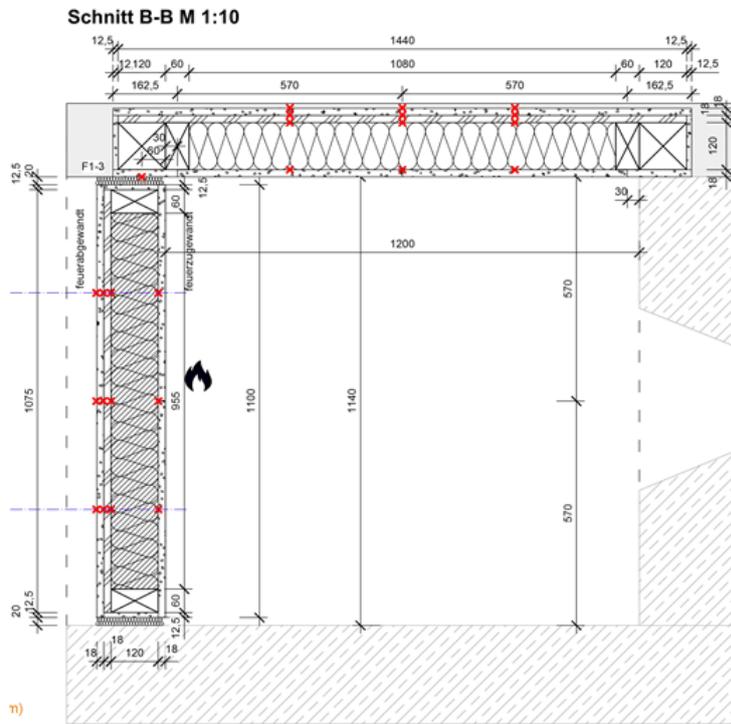


Abbildung 48: Systematische Darstellung der Holzmassivwand / -decke (BSP), bekleidet mit 18 mm GKF - Ansicht

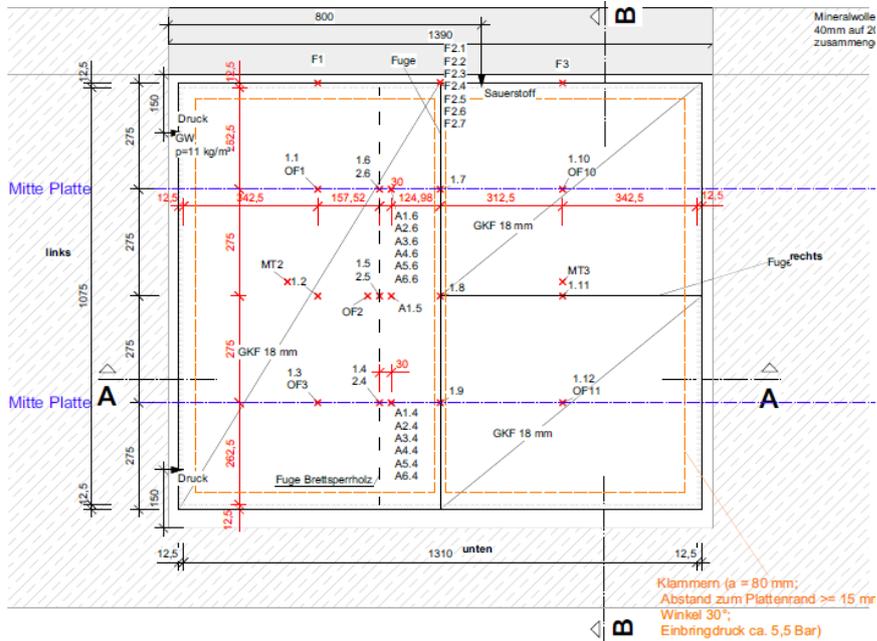


Abbildung 49: Systematische Darstellung der Holzmassivwand / -decke (BSP), bekleidet mit 18 mm GKF - Schnitt

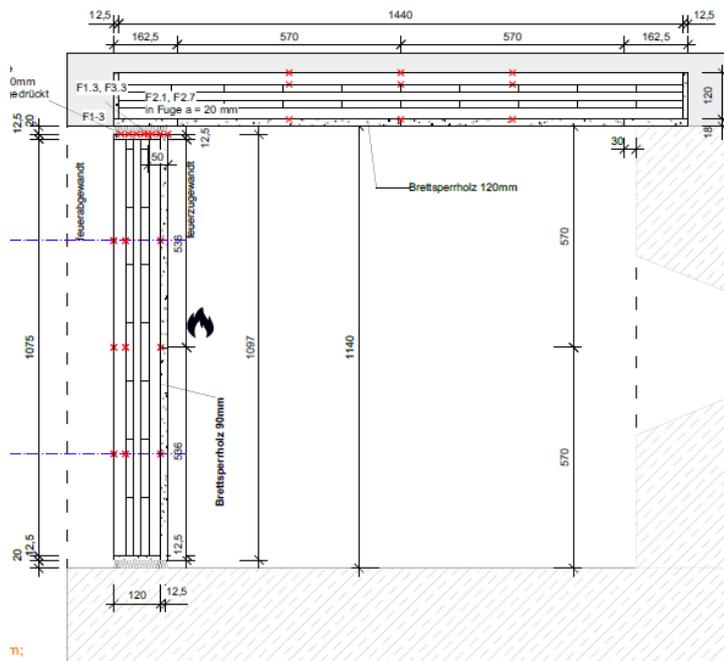


Abbildung 50: Prüfung der HTB-Elemente im 1-m-Ofen



Abbildung 51: Prüfung der BSP-Elemente im 1-m-Ofen



5.4.3 Versuchsdurchführung

Das primäre Untersuchungsziel war die Schutzwirkung sowie das Abfallverhalten der Gipsplatten zu untersuchen. Alle Versuche wurden bis zum vollständigen Versagen der Gipsplatten durchgeführt. Um den Einfluss der feuerebengewandten Schichten sowie die Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand zu beurteilen, wurden die Prüfungen entweder bis zur 90ten Minute (+ ca. 10 % Überzeit) oder bis zum El-Versagen geprüft. Durch die Beobachtungsfenster wurde das Verhalten der Gipsplatten zusätzlich zu den Auswertungen über die Thermolemente beobachtet und dokumentiert.

Abbildung 52: Versagen der Gipsplatte der Referenzdecke, hinterlegt mit Dämmung in der 46. Prüfminute (Distler 2021)

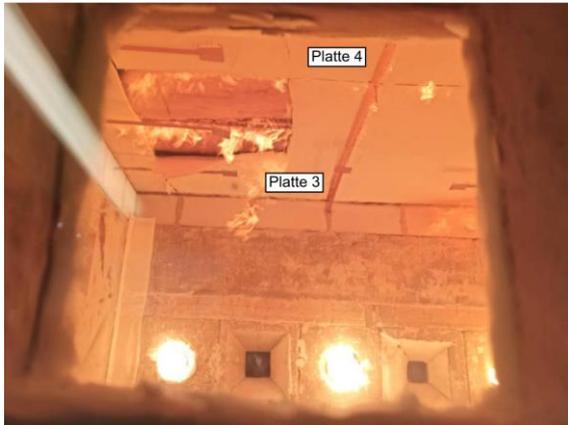


Abbildung 53: Versagen der Gipsplatte der Referenzdecke, auf Brettsper Holz in der 58. Prüfminute (Distler 2021)

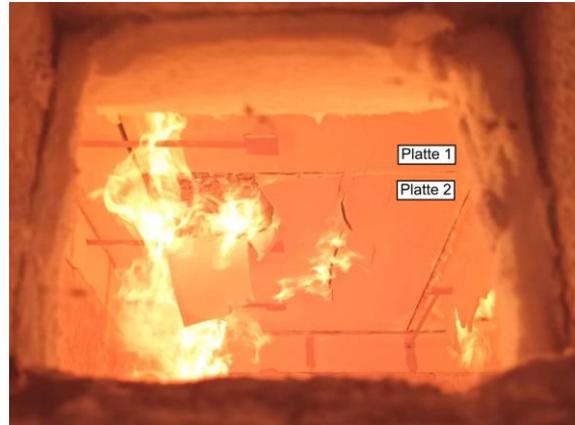


Abbildung 54: Referenzdecke-HTB nach dem Brandversuch. Randfach mit intakter Spanplatte hinter der Dämmung



Abbildung 55: Referenzdecke BSP nach dem Brandversuch mit Holzkohleschicht und teilweise abgelöster erster Brettlage.



Abbildung 56: Versagen der Gipsplatte in der 46. Prüfminute in V2-D-1m-HTB-18 mm GKF



Abbildung 57: Versagen der Gipsplatte in der 77.-79. Prüfminute in V2-W-1m-HTB-18 mm GKF



Abbildung 58: Versagen der Decke in der 93. Prüfminute in V2-D-1m-HTB-18 mm GKF (Durchbrand in der Stoßfuge)



Abbildung 59: Wandkonstruktion nach der Prüfung in V2-W-1m-HTB-18 mm GKF und im Gefach vorhandener Dämmung



5.4.4 Versuchsergebnisse

Die detaillierten Temperaturverläufe hinter jeder Schicht sind in Anhang A11 bis A15 dargestellt. Die in Tabelle 11 dargestellten Ergebnisse resultieren aus den Versuchsbeobachten bzw. der Auswertung der Thermolemente hinter der Gipsplattenschicht.

Tabelle 11: Versuchsergebnisse der Untersuchungen zum Wärmedurchgang und zur Abfallzeit von Gipsplatten

Prüfkörper Nr.	Erreichen von 300 °C hinter der feuerzugewandten Gipsplatte	Abfallzeit der Gipsplatte	Versagen des Probekörpers
V1-D-groß-HTB-18 mm GKF	26 min	42 min	92 min (I-Versagen) 101 min (abgebrochen vor E-Versagen)
V1-D-groß-BSP-18 mm GKF	35 min	57 min	101 min (abgebrochen, kein Versagenskriterium erreicht)
V2-W-1m-HTB-18 mm GKF	27,5 min	72 min	93 min (Durchbrand an der Fuge)
V2-D-1m-HTB-18 mm GKF	26,5 min	46 min	90 min (I) 93 min (Durchbrand an der Fuge)
V3-W-1m-BSP-18 mm GKF	33 min	85 min	99 min (abgebrochen)
V3-D-1m-BSP-18 mm GKF	36,2 min	84 min	99 min (abgebrochen)
V4-W-1m-HTB-12,5 mm GKF	16 min	56 min	70 min (Durchbrand an der Fuge)
V4-D-1m-HTB-12,5 mm GKF	15,5 min*	16 min*	68 min(I) (Durchbrand an der Fuge)
V5-W-1m-BSP-12,5 mm GKF	20 min	61 min	99 min (abgebrochen)
V5-D-1m-BSP-12,5 mm GKF	23 min	56,5 min	99 min (abgebrochen)
mit: D: Decke W: Wand BSP: Prüfkörper mit Brettsperrholzelemente HTB: Prüfkörper als Holztafelbauelement GKF: Feuerschutzplatte		Groß: Decke mit der lichten Prüffläche: ca. 4 m x 1,55 m 1 m: Prüfkörper im 1-m-Ofen, Abmessungen 1,10 m x 1,30 m * vergleichbar frühes Versagen für GKF in benannter Dicke, ggf. Riss oder Beschädigung in der Platte	

Eine Auswertung der experimentellen Ergebnisse erfolgt in Abs. 7.1.5.

5.5 Experimentelle Untersuchungen zu Estrichaufbauten und Dämmstoffen mit hohen Rohdichten

5.5.1 Grundlagen

Ein bisher im Berechnungsverfahren bestehende Nachweislücke besteht für Deckenkonstruktionen mit einer Brandbeanspruchung von der Oberseite. Hier gelten die identischen Beanspruchungen wie von der Unterseite, somit eine ETK- Beanspruchung der Bauteilschichten. Im europäischen Prüfverfahren ist eine Prüfung nach DIN EN 1365-2:2015-02 und Klassifikation nach DIN EN 13501-2:2010-02 der Deckenkonstruktion von der Oberseite ausgeschlossen. Auf nationaler Ebene ist eine Klassifikation nach DIN 4102-2:1977-02 in Verbindung mit Übertragungsregelungen der Arbeitsgemeinschaft der Brandschutzlaboratorien der Materialprüfanstalten möglich. Somit existieren nationale Klassifikationen für Estriche und Fußbodenaufbauten unterschiedlicher Hersteller von Trockenestrichen. Ein Nachweis von Holztafelbaudecken mit Zementestrichen war bisher nur über die Bauregelliste (Deutsches Institut für Bautechnik 2015) oder über die klassifizierten Aufbauten der DIN 4102-4 möglich. Die Verwaltungsvorschriften (VVTBs) der Bundesländer enthalten diese Regelungen jedoch nicht mehr, wodurch nur noch die konstruktiven Regeln der DIN 4102-4 für die dort benannten Deckenaufbauten bis maximal 60 Minuten Feuerwiderstand zur Verfügung stehen. Um Fußbodenaufbauten und Estriche in die Berechnungsverfahren zu implementieren, müssen die Grundschutzzeiten für diese Bauteilschichten ermittelt werden. Bisher lagen weder für Zementestriche noch für Calciumsulfatestriche Kennwerte vor. Mineralische Dämmstoffe in der Literatur wurden nur bis zu einer Rohdichte von ca. 120 kg/m^3 untersucht. Somit wurden im Rahmen dieses Projektes experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Schutzzeiten für dieses Schichten zu ermitteln. Da die Beanspruchung auf Basis der ETK erfolgen muss und der Wärmedurchgang im Teil-8- Ofen untersucht werden kann, wurde entgegen einem horizontalen Einbau als Fußboden, die entsprechende Schicht vertikal in den Teil-8 Ofen eingebaut. Da Estriche sowie Trittschalldämmstoffe auf der Decke liegen, ist ein Abfallen dieser Schichten in der praktischen Anwendung auch bei Brandeinwirkung ausgeschlossen, womit der gewählte Versuchsaufbau die praktische Anwendung abdeckt.

5.5.2 Versuchsaufbau

Um die Grundschutzzeiten für das Berechnungsverfahren zu bestimmen, wurden unterschiedliche Dicken der Estriche bzw. mineralischen Trittschalldämmstoffe, hinterlegt mit einer Spanplatte geprüft. Zur Ermittlung der Positionsbeiwerte wurden auch Varianten untersucht, bei welchen der Estrich durch eine Steinwolleplatte geschützt wurde, vergleichbar zu einer Brandbeanspruchung von der Unterseite. Die zugehörigen Prüfergebnisse sind detailliert in Anhang A9 bis A 11 dargestellt. Die genauen Probekörperaufbauten können Anhang A9 zusammen mit den Prüfergebnissen entnommen werden.

Abbildung 60: Systematischer Schnitt und Darstellung des Teil- 8 Probekörpers für Estrichaufbauten nach (Mändl 2019)

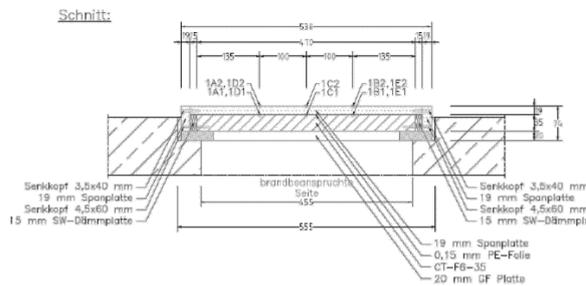
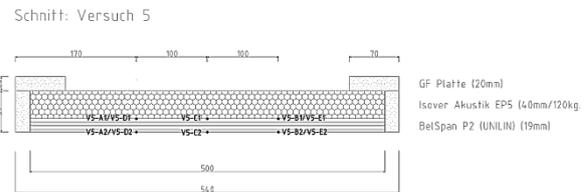


Abbildung 61: Systematischer Schnitt und Darstellung des Teil- 8 Probekörpers für Trittschalldämmstoffe nach (Brogstetter 2020)



5.5.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnis

Zur Prüfung wurden jeweils zwei Probekörper gleichzeitig im Ofen eingebaut und geprüft. Der Abbruch erfolgt entweder nach dem Erreichen von mehr als 300 °C hinter den relevanten Schichten oder dem Versagen des Raumabschlusses des ersten Probekörpers im Versuch.

Alle Versuche wurden an der MFPA in Leipzig durchgeführt. Die detaillierten Versuchsergebnisse sind in Anhang A9 für Estriche bzw. A 10 für Trittschalldämmstoffe dargestellt.

Tabelle 12: Experimentelle Untersuchungen der Estrichaufbauten und Versagenszeiten

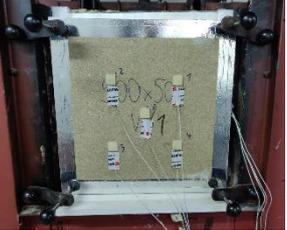
 <p>a) Brandprüfstand nach DIN 4102-8:2003-10</p>	 <p>b) Prüfkörper, vertikal eingebaut</p>	Konstruktion (von der feuerzugewandten Seite)	
		V1 CT-F6-35 PE 19 mm SP (60 min -A) V2 CT-F6-25 PE 19 mm SP (60 min - A) V3 CT-F6-55 PE 19 mm SP (102 min - A) V4 CAF-F6-35 PE 19 mm SP (102 min -EI) V5 CT-F6-35 PE 15 mm SW 19 mm SP (116 min - A) V6 CT-F6-55 PE 15 mm SW 19 mm SP (165 min - A) V7 15 mm SW PE CT-F6-35 PE 19 mm SP (116 min - A) V8 40 mm SW PE CT-F6-35 PE 19 mm SP (165 min - A)	
 <p>c) Versagen des Isolationskriteriums (Temperaturerhöhung 140 K) nach 160 min Brandbeanspruchung</p>	Abk.		Beschreibung
	CT-F6-xx: Zementestrich- Biegezugfestigkeitsklasse – Dicke [mm] CAF-F6-xx: Calciumsulfatestrich – Biegezugfestigkeitsklasse – Dicke [mm] PE: PE-Folie SW: Steinwolle, Rohdichte 120 kg/m ³ SP: Spanplatte xx min Beanspruchungszeit [min] A: Abbruch El: El-Versagen		

Tabelle 13: Experimentelle Untersuchungen der Estrichaufbauten und Versagenszeiten

 <p>a) Brandprüfstand nach DIN 4102-8:2003-10</p>	 <p>b) Prüfkörper Durchbrand (V4)</p>	Konstruktion (von der feuerzugewandten Seite)	
		V1 15 mm SW (118,3 kg/m ³) PE 40 mm BTP PE 19 mm SP (108 min -A) V2 15 mm SW (118,3 kg/m ³) 19 mm SP (66 min - EI) V3 25 mm SW (118,6 kg/m ³) 19 mm SP (69 min - A) V4 25 mm SW (173,6 kg/m ³) 19 mm SP (103 min - EI) V5 40 mm SW (117,7 kg/m ³) 19 mm SP (103 min - A) V6 180 mm HTE (38,2 kg/m ³) 19 mm SP (108 min – seitlicher Durchbrand) V7 180 mm SW (28,6 kg/m ³) 19 mm SP (120 min - A)	
 <p>c) Prüfkörper nach dem Versuch (V4) Ansicht der brandbeanspruchten Seite</p>	Abk.		Beschreibung
	PE: PE-Folie SW (XX): Steinwolle, (XX) Rohdichte in kg/m ³ HTE Glaswolle Isover Ultimate (high temperature extruded glass wool) SP: Spanplatte BTP Beton- Terrassenplatte 1180 kg/m ³ xx min Beanspruchungszeit [min] A: Abbruch El: El-Versagen		

Die Auswertung der Ergebnisse und die zugehörigen Temperaturverläufe sind in Abs. 7.1.6 (für Dämmstoffe) bzw. 7.1.77.1.7 (für Estriche) dargestellt.

5.6 Experimentelle Untersuchungen zu Elektroeinbauteilen

5.6.1 Grundlagen

Elektroeinbauteile können in Holztafelbauelemente mit brandschutztechnischer Funktion eingebaut werden. Neben Produkten, wie beispielsweise Brandschutz- Hohlwanddosen war es entsprechend (DIN 4102-4:2016-05) für die dort aufgeführten Konstruktionen zulässig, Einbauteile zu verwenden und somit die brandschutztechnisch notwendige Dämmung auf 30 mm zusammendrücken. Diese Anforderung wurde im Entwurfsdokument (Arbeitsstand) der E DIN 4102-4/A1:2018-11 spezifiziert. Hier durfte die Dämmung auf folgende Mindestmaße zusammengedrückt werden:

- F30: bis zu 25 mm
- F60: bis zu 30 mm

Für einen Feuerwiderstand von 90 Minuten lagen hingegen keine Erkenntnisse vor und normative Angaben in unterschiedlichen Ländern weichen zudem voneinander ab (DIN 4102-4:2016-05 bzw. Lignum 2010). Somit wurden ergänzende Experimentelle Untersuchungen zu diesen Einbauteilen durchgeführt.

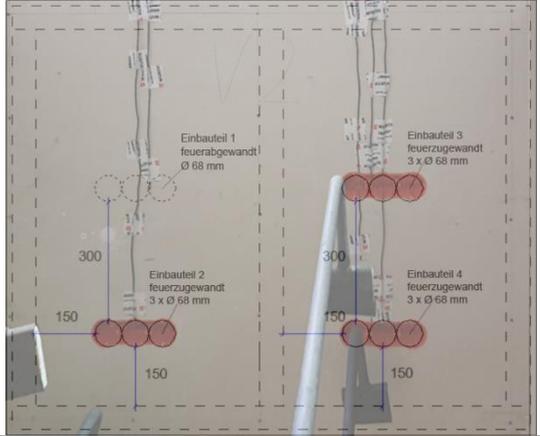
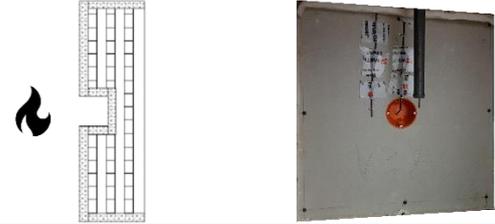
5.6.2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden mit den Abmessungen von 1,30 x 1,10 m und ergänzend im Teil-8- Ofen zur Beurteilung des Wärmedurchgangs durchgeführt.

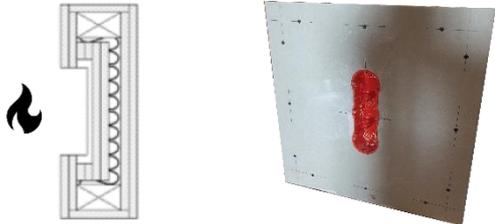
Tabelle 14: Darstellung der durchgeführten Versuche zu Einbauteilen (Rauch 2022)

Nr.	Versuchsgröße / Ausrichtung	Aufbau (von der feuerzugewandten Seite aus)	Einbauteile Übersichtszeichnung
V1	1,30 m x 1,10 m WAND 1 m - Ofen	GKF 18 mm OSB 18 mm Steinwolle 2 x 40 mm, 30 kg/m ³ OSB 18 mm GKF 18 mm	Abbildung 62: Einbauteile V1
	Steckdosen feuerzugewandt in unterschiedlichen Größen und Geometrien Dämmstoff zusammengedrückt auf 50 mm Restdicke		

Fortsetzung Tabelle 14: Darstellung der durchgeführten Versuche zu Einbauteilen (Rauch 2022)

Nr.	Versuchsgröße	Aufbau (von der feuerzugewandten Seite aus)	Einbauteile
V2	1,30 m x 1,10 m WAND 1 m - Ofen	GKF 18 mm OSB 18 mm Steinwolle 2 x 40 mm, 30 kg/m ³ OSB 18 mm GKF 18 mm	Abbildung 63: Einbauteile V2 
	Steckdosen feuerzugewandt und feuerabgewandt mit unterschiedlichen Abständen untereinander Dämmung zusammengedrückt auf 50 mm Restdicke		
V3a	500 mm x 500 mm WAND Teil 8 - Ofen	GKF 18 mm BSP 126 mm	Abbildung 64: Einbauteile V3a 
	Runde Aussparung, Ø 68 mm, 62 mm tief und mit 18 mm GKF bekleidet		
V3b	500 mm x 500 mm WAND Teil 8 - Ofen	BSP 126 mm 18 mm GKF	Abbildung 65: Einbauteile V3b 
	Runde Aussparung, Ø 68 mm, 62 mm tief		
V4a	500 mm x 500 mm WAND Teil 8 - Ofen	2 x 18 mm GKF Steinwolle 100 mm, 30 kg/m ³ 2 x 18 mm GKF	Abbildung 66: Einbauteile V4a 
	Runde Aussparung, Ø 68 mm, 62 mm tief mit 40 mm dickem Gipsbett minimal 34 mm SW hinter Gipsbett		

Fortsetzung Tabelle 14: Darstellung der durchgeführten Versuche zu Einbauteilen (Rauch 2022)

Nr.	Versuchsgröße	Aufbau (von der feuerzugewandten Seite aus)	Einbauteile
V4b	500 mm x 500 mm WAND Teil 8 - Ofen	2 x 18 mm GKF Steinwolle 100 mm, 30 kg/m ³ 2 x 18 mm GKF	Abbildung 67: Einbauteile V4b 
	Dreifachdose vertikal eingebaut, Ø 68 mm, 62 mm tief und mit 2 x 18 mm GKF bekleidet minimal 38 mm SW hinter Gipskasten		

5.6.3 Versuchsdurchführung

Alle Versuche wurden bis zum Versagen der Maßnahme oder Versagen des Gesamtbauteils geprüft. In Abbildung 68 bis Abbildung 71 sind die Probekörper V2, V3, V4a und V4b dargestellt. Aufgrund von Konvektionsströmen innerhalb des Brettsperrholzementes von V3, bedingt durch einen Fertigungsfehler sowie die Abschattungseffekte durch den Teil-8 Ofen, erfolgte ein extrem ungleichmäßiger Abbrand und es wird hier auf eine Auswertung verzichtet. Die Ergebnisse werden durch diese Effekte verfälscht, zeigen aber, dass große Fugen innerhalb des Probekörpers einen maßgebenden negativen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

Abbildung 68: Versagen der Wand mit dem Einbauteil auf der feuerabgewandten Seite (V2)



Abbildung 69: Gipskasten nach dem Versuch mit Bekleidung (V4a)

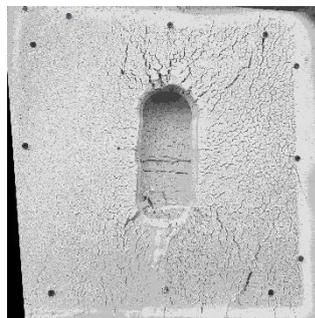


Abbildung 70: Ungleichmäßiger Abbrand (rechte untere Ecke) in V3



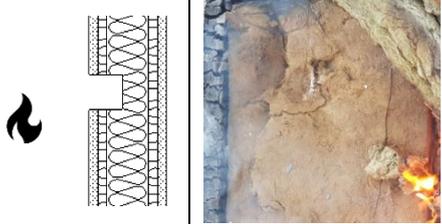
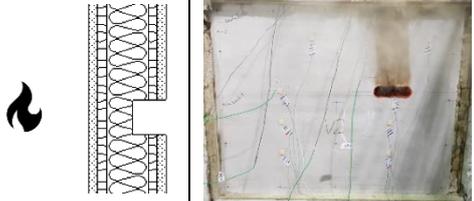
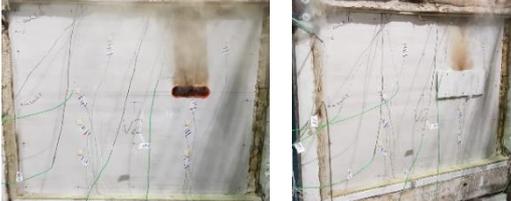
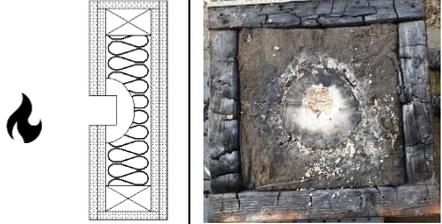
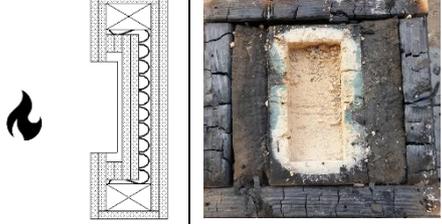
Abbildung 71: Gipskasten nach dem Versuch mit demontierter Bekleidung (V4b)



Versuchsergebnisse

In nachfolgender Tabelle sind die Prüfergebnisse bzw. Prüfdauern zusammengestellt. Die detaillierten Temperaturverläufe können dem Anhang A7 und A8 sowie A20 und A21 entnommen werden.

Tabelle 15: Versagenszeiten der durchgeführten Untersuchungen

Aufbau / Foto nach der Prüfung		Versagenszeit
V1		99 min (Abbruch der Prüfung, kein Versagen)
V2	 	95 min (Abbruch der Prüfung), 70 min, Versagen des feuerabgewandten Einbauteils, wurde danach abgedeckt)
V4 a	 	122 min (Abbruch der Prüfung, kein Versagen)
V4 b	 	122 min (Abbruch der Prüfung, kein Versagen)

5.7 Experimentelle Ergebnisse herstellerspezifischer Bauteilprüfungen

Durch den hohen Kosten- und Zeitaufwand von Brandprüfungen, wurden im Rahmen dieses Projektes 35 herstellerspezifische Ergebnisse in Form von Prüfberichten als Grundlage zur Validierung der Berechnungsmethoden zur Verfügung gestellt. Da die Detailinformationen zum geprüften Gegenstand vertraulich sind und nicht veröffentlicht werden dürfen, werden die Ergebnisse anonymisiert in den Betrachtungen in Kapitel 7 mit aufgenommen.

6 Ein numerisches Simulationsmodell zur thermischen Analyse

6.1 Grundlagen

Basierend auf den Untersuchungen durch Schleifer (2009) und Rauch (2022) zur thermischen Simulation von mehrschichtigen Holzelementen wurden folgende Randbedingungen als Übergangsbedingungen zwischen dem Probekörper und der Brandbeanspruchung bzw. der brandabgewandten Seite zugrunde gelegt.

Die nachfolgenden angegebenen Randbedingungen gelten nur für eine Beanspruchung unter der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK).

Tabelle 16: Werte für die Emissivität von Bauteiloberflächen

Quelle	Werte für die Emissivität von Bauteiloberflächen unter ETK-Beanspruchung ϵ [-]			
	Gipsbekleidungen	Holz- und Holzwerkstoffe	Dämmstoffe	Estriche / Beton
DIN EN 1995-1-2:2010-12	1) FZ: 0,8 / FA: 0,8 2) FZ: 0,8 / FA: - *	1) FZ: 0,8 / FA: 0,8 2) FZ: 0,8 / FA: - *	1) FZ: 0,8 / FA: 0,8 2) FZ: 0,8 / FA: - *	1) FZ: 0,8 FA: 0,8 2) FZ: 0,8 FA: - *
DIN EN 1995-1-2:2010-12	FZ: 0,8 / FA: 0,8	FZ: 0,8 / FA: 0,8	FZ: 0,8 / FA: 0,8	
DIN EN 1995-1-2:2010-12	-	-	-	FZ: 0,7 / FA: 0,7
Diese Arbeit	FZ: 0,8 / FA: 0,8	FZ: 0,8 / FA: 0,8	FZ: 0,8 / FA: 0,8	FZ: 0,7 / FA: 0,7

FZ = feuerzugewandt, FA = feuerabgewandt
 * bei der Verwendung eines konv. Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha_{unexp} = 9 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ wird angenommen, dass der Wärmeübergang über die Strahlung mit über den erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten abgedeckt wird

Tabelle 17: Werte für den Wärmeübergang von Bauteiloberflächen

Quelle	Werte für den Wärmeübergang von Bauteiloberflächen unter ETK-Beanspruchung α [W/m ² K]			
	Gipsbekleidungen	Holz- und Holzwerkstoffe	Dämmstoffe	Putze
DIN EN 1991-1-2:2010-12	1) FZ: 25 / FA: 4 2) FZ: 25 / FA: 9*			
DIN EN 1995-1-2:2010-12	entsprechend DIN EN 1991-1-2			
Diese Arbeit	FZ: 25 / FA: 4			

FZ = feuerzugewandt, FA = feuerabgewandt
 * bei der Verwendung von $\alpha_{unexp} = 9 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ wird angenommen, dass der Wärmeübergang durch die Strahlung über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten auf der Raumseite mitabgedeckt wird

Die Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils wird in der Simulation auf Basis der Fourier'schen Wärmeleitgleichung auf Basis effektiver Materialparameter berechnet.

6.2 Thermische Materialkennwerte für die numerische Simulation

Die Materialparameter für die thermische Simulation wurden im Laufe der Weiterentwicklung der prEN 1995-1-2:2020 (E) und somit auch während dieses Forschungsvorhabens fortlaufend angepasst. Die Grundlage

bilden die Materialkennwerte nach Schleifer. Eine spezifische Untersuchung dieser Materialkennwerte wurde in (Rauch 2022) durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass für Holz- und Holzwerkstoffplatten einheitliche Materialkennwerte herangezogen werden können.

Tabelle 18: Modifizierte Eingangswerte für Holz und Holzwerkstoffe ursprünglich basierend auf den Materialparametern nach DIN EN 1995-1-2:2010-12. Die **fett dargestellten Werte zeigen die Abweichung von den normativen Werten**.

		DIN EN 1995-1-2:2010-12 für Massivholz		
Temperatur	OSB / MDF	Massivholz / Massivholzplatten / Spanplatten		
T [°C]	λ [W/mK]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [-]
20	0,12	0,12	1,53	1,00
99	*	*	1,77	1,00
99	*	*	13,60	1,00
120	*	*	13,50	0,89
120	*	*	2,12	0,89
200	0,15	0,15	2,00	0,89
250	*	*	1,62	0,83
300	*	*	0,71	0,68
350	0,07	0,07	0,85	0,46
400	*	*	1,00	0,34
500	0,19	0,09	*	*
600	*	*	1,40	0,25
800	0,74	0,35	1,65	0,23
1200	3,15	1,5	1,65	0,01

Tabelle 19: Materialkennwerte für Gipsplatten und Gipsfaserplatten nach Schleifer (2009) und optimierter Wärmeleitfähigkeit auf Massivholz / Holzwerkstoffplatten nach Rauch (2022)

T [°C]	Gipsplatte Typ F / GKF				Gipsfaserplatte		
	λ [W/mK]	$\lambda_{MH, HWP}$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [-]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [-]
20	0,40	0,40	0,96	1,0	0,40	0,96	1,00
70	0,40	0,80	0,96	1,0	0,40	0,96	1,00
100	0,27	0,54	0,96	1,0	0,27	0,96	1,00
130	0,13	0,20	14,9	0,926	0,13	9,17	0,926
140	0,13	0,13	25,2	0,902	0,13	17,55	0,902
150	0,13	0,13	21,7	0,877	0,13	16,66	0,877
170	0,13	0,08	0,96	0,828	0,13	0,96	0,828
600	0,13	0,13	0,96	0,827	0,13	0,96	0,827
720	0,33	0,49	4,36	0,826	0,39	4,359	0,826
750	0,38	0,12	0,96	0,776	0,46	0,96	0,776
1000	0,80	0,40	0,96	0,776	1,00	0,96	0,776
1200	2,37	6,60	0,96	0,776	2,37	0,96	0,776

* Der Wert $\lambda_{MH, HWP}$ bildet eine optimierte, effektive Wärmeleitfähigkeit von Gipsplatten auf Massivholz (MH) bzw. Holzwerkstoffplatten (HWP) ab. Da im Optimierungsprozess die bestehenden Werte (λ) für eine Hinterlegung mit Dämmstoffen eine gute Übereinstimmung zeigten, wurden hier nur optimierte Werte für Gipsplatten auf Holz- bzw. Holzwerkstoffplatten, basierend auf Rauch 2022 angegeben.

Tabelle 20: Materialkennwerte für Dämmstoffe aus Steinwolle nach Schleifer (2009)

T [°C]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [-]
20	0,036	0,880	1,00
100	0,047	1,040	1,00
200	*	1,160	0,980
400	$0,09 \cdot (11 \cdot e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,280	0,977
600	$0,15 \cdot (11 \cdot e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,355	0,973
800	$0,23 \cdot (11 \cdot e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,430	0,970
925	$0,30 \cdot (11 \cdot e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,477	0,960
1200	$0,45 \cdot (11 \cdot e^{-0,05 \cdot \rho_{20}} + 1,9)$	1,580	0,887

Tabelle 21: Materialkennwerte für Dämmstoffe aus Glaswolle nach Schleifer (2009) sowie mit modifizierter Rohdichte für hohe Temperaturen (Rauch 2022)

T [°C]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [-]
20	0,035	1,200	1,00
100	0,068	1,340	0,983
200	0,110	1,380	0,961
300	0,151	1,382	0,940
400	0,192	1,384	0,940
510	0,238	1,386	0,940
660	0,300	1,389	0,940
1200	100	1,400	0,001

Tabelle 22: Materialkennwerte für Zementestriche, abgeleitet durch Mändl (2019) und Rauch (2022) auf Basis der Versuche entsprechend Anhang A9

Temperatur [°C]	20	100	115	130	150	160	200	400	600	700	800	1200
Dichte ρ [kg/m ³]	2100	-	2100	-	-	-	2058	1995	-	-	-	1848
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,95	1,77	-	1,7	-	-	-	-	-	0,81	0,72	0,6
Spezifische Wärmekapazität c [J/kg K]	900	925	-	-	1080	5300	1635	-	-	-	-	950

Tabelle 23: Materialkennwerte für Calciumsulfatestriche, abgeleitet durch (Mändl 2019) auf Basis der Versuche entsprechend Anhang A9

Temperatur [°C]	20	90	100	110	130	140	150	170	600	720	750	1200
Dichte ρ [kg/m ³]	2100	-	2100	-	1945	1944	1842	1739	1737	1651	1630	1630
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	2	-	2	0,4	-	0,4	0,5	-	-	-	-	0,5
Spezifische Wärmekapazität c [J/kg K]	1000	1000	5000	-	4000	900	-	-	-	-	-	900

6.3 Ein thermisches Simulationsmodell für raumabschließende Holztafelbauelemente

Die thermischen Simulationen wurden mit dem Softwarepaket ANSYS Workbench 2020 durchgeführt. Hier wird der Wärmedurchgang und somit die Isolationswirkung betrachtet und bildet die Grundlage zur Untersuchung des Abbrandes oder der Schutzzeiten von Bauteilschichten. Für den linearen Wärmedurchgang

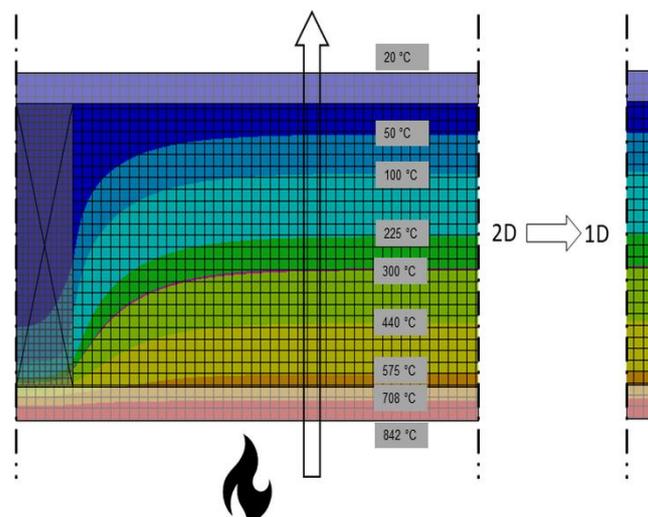
im 1-D-Modell wird für den Strahlungsaustausch mit der Umgebung das zugehörige SURF 151 Element, im flächigen 2-D Modell, das SURF 152 Element als Randelement verwendet. Diese Elemente berücksichtigen den Strahlungsaustausch mit der Umgebung, abhängig von der Emissivität des Materials. Als Freiheitsgrad der Elemente wird die Temperatur resultierend aus dem Strahlungsanteil berechnet. Zur Berechnung des Wärmedurchgangs wird das Flächenelement PLANE 77, ebenfalls mit dem Freiheitsgrad Temperatur an jedem Knoten, verwendet. Als Randbedingung fließt hier der konvektive Anteil der Wärmeübertragung an der Oberfläche mit ein. Der Strahlungsanteil wird durch das SURF 151 Elemente übergeben. Die Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils wird über die Fourier'sche Wärmeleitgleichung berechnet. Das Versagen von Bauteilschichten wird dadurch berücksichtigt, dass entsprechende Elemente abhängig von einem Temperatur- bzw. Zeitkriterium entfernt werden. Da programmtechnisch durch entfernte Schichten kein Strahlungsaustausch mit der Umgebung mehr stattfinden kann, wird die Einwirkung aus Strahlung und Konvektion durch eine direkt aufgebrachte Temperatur entsprechend Gleichung 3-23 nach Joas (2016) approximiert und direkt auf die nachfolgenden Elemente aufgebracht.

$$T = 166,11 \cdot \ln(t) - 424,63 \quad \text{Gl. 5}$$

T [°C] als Randbedingung aufgebrachte Temperatur
t [s] Zeit

Ein Beispiel für eine 2-D- Betrachtung sowie die Reduktion auf einen linearen Temperaturdurchgang ist in Abbildung 72 dargestellt.

Abbildung 72: Exemplarischer Temperaturverlauf in Anlehnung an Rauch (2022) durch ein Bauteil zum Zeitpunkt $t = 30$ min mit beidseitiger GKF- Bekleidung feuerabgewandt und feuerzugewandt sowie einer Gefachdämmung aus Steinwolle (Der Temperaturverlauf wurde exemplarisch ohne ein Abfallen von Schichten dargestellt).



Basierend aus den Ergebnissen von Rauch (Rauch 2022) werden für das Bauteil folgende Parameter für die Simulation definiert:

- Maximaler Zeitschritt: 5 s
- Netzweite: 1 mm

6.4 Simulationsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung

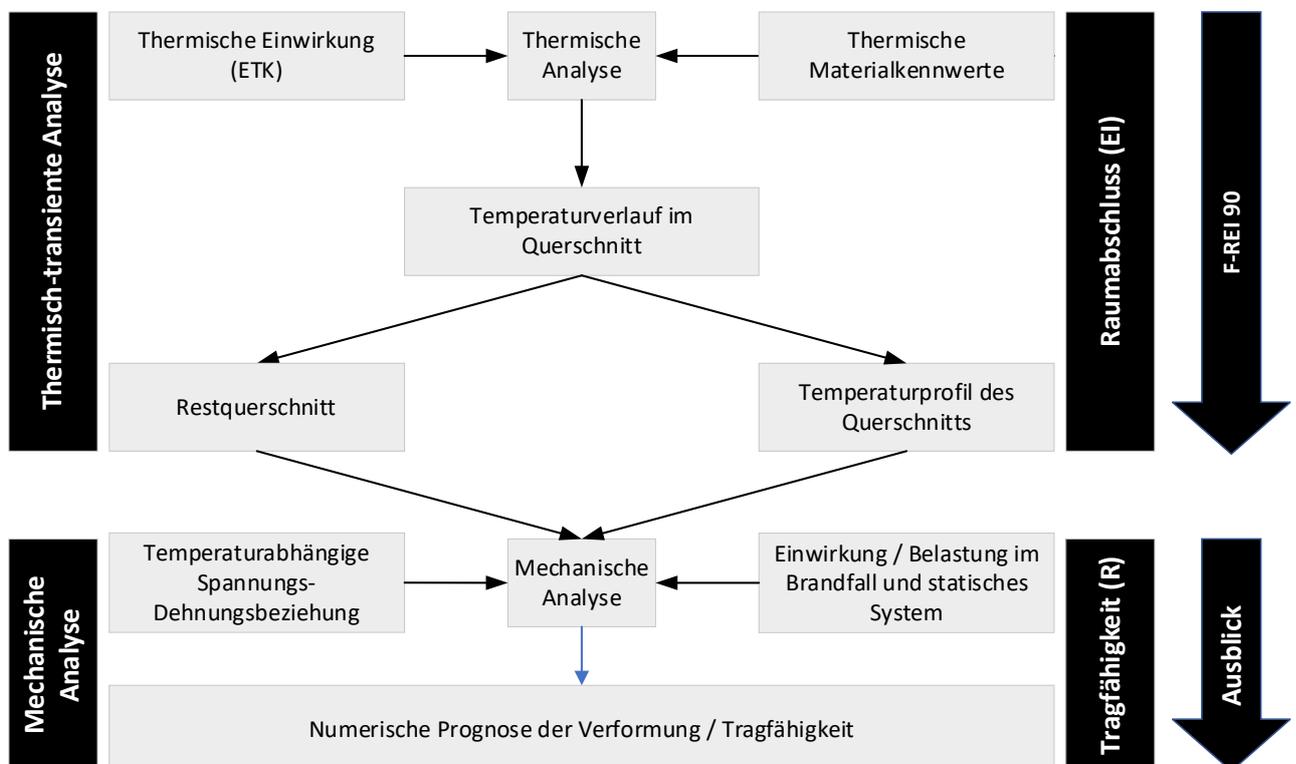
Das vorgestellte Simulationsmodell lässt sich als Grundlage zur Bestimmung der Tragfähigkeit heranziehen. Hierfür kann das thermische Modell mit einer mechanischen Analyse gekoppelt werden. Ein entsprechendes Modell für eine Holztafelbauwand wurde erstellt und anhand eines Versuches validiert (Albrecht 2020). Im statisch-mechanischen Modell wurden Festigkeits- und Steifigkeitswerte für die tragenden Holzbauteile hinterlegt und für jeden Zeitpunkt der thermischen Analyse die Tragfähigkeit des Querschnitts berechnet.

Hier hat sich gezeigt, dass eine numerische Abbildung zwar theoretisch möglich ist, aber noch Erkenntnisse zur Modellbildung, die einen wesentlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben fehlen. Hierfür ist eine Modelluntersuchung der experimentellen Bauteilprüfungen, die als Validierungsgrundlage herangezogen werden, notwendig. Folgende Randbedingungen wurden bisher nicht untersucht, wirken sich aber maßgeblich auf das Berechnungsmodell aus:

- Knicklänge der Holzständer, abhängig von den Auflagerbedingungen belasteter Brandprüfungen
- Einfluss von Bekleidungslagen auf das Knickverhalten von Holztafelbauwänden
- Abschattungseffekte im Brandprüfstand, die zu einem ungleichen Abbrand des Holzständers und somit zu über die Höhe ungleich verteilten Querschnittswerten führen

Neben den dargestellten Einflussfaktoren sind die thermischen Materialkennwerte von wesentlicher Bedeutung. Hierzu wurden Untersuchungen im Forschungsvorhaben TIMPuls (TIMpuls 2022) durchgeführt, um die thermischen Materialkennwerte weiter zu untersuchen. Diese Ergebnisse sind erforderlich, um numerische Analysen zur Tragfähigkeit durchzuführen und die zugehörigen temperaturabhängigen Spannungs- Dehnungslinien zu bestimmen. Diese neuen Ergebnisse können in die unten dargestellte Modellsystematik (vgl. Abbildung 73) integriert werden.

Abbildung 73: Systematische Abbildung des Simulationsmodells zur Berechnung der Tragfähigkeit



7 Ergebnisse und Ableitung analytischer Ansätze

7.1 Ergebnisse für Einzelschichten

7.1.1 Grundlagen

Die Nachrechnung der Konstruktionen entsprechend Abbildung 18 mit dem analytischen Ansatz zeigt, dass eine hohe Streuung der Ergebnisse abhängig von der Konstruktion auftritt. Das grundlegende Berechnungsverfahren nach Schleifer wurde durch die Lignum Dokumentation in der Schweiz (Frangi et al. 2017) oder dem nationalen Anhang zur EN 1995-1-2 in Österreich, der ÖNORM B 1995-1-2 bis zu 60 Minuten Feuerwiderstand etabliert. Um hohe Feuerwiderstandsdauern abzubilden sowie das Verfahren zu optimieren, ist eine Betrachtung der Einzelschichten und deren Vergleich zum versuchstechnisch erreichten Beitrag zum Feuerwiderstand notwendig. Zusätzlich bietet eine zunehmende Berücksichtigung expliziter Einflussfaktoren, wie beispielsweise das Versagen der feuerzugewandten Bekleidung entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E) eine Möglichkeit das Verfahren zu optimieren. Die vorangegangenen experimentellen Untersuchungen bieten die Grundlage, um analytische Ansätze für die einzelnen Bauteilschichten zu optimieren. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Optimierungen dargestellt.

7.1.2 Unterschiedliche Dämmstoffe und Gefachbreiten

Die Auswertung der experimentellen Ergebnisse zeigt, dass die Versagensmechanismen der Dämmstoffe einen wesentlichen Einfluss auf deren Beitrag zum Feuerwiderstand einer Konstruktion haben. Aus diesem Grund können die Versagensmechanismen entsprechend Tabelle 24 eingeteilt werden.

Tabelle 24: Versagensmechanismen von Dämmstoffen (Rauch 2022)

Versagensmechanismen	A-1: Durchwärmen A-2: Schmelzen A-3: kontinuierliches Abbrennen	B: Herausfallen	C: seitliches Einbrennen
Parameter	t_{prot}	t_f	V_{rec}
Systematische Abbildung			
Materialbeispiele, zugeordnet zur typischen Versagensart	Durchwärmen (Steinwolle) Schmelzen (Glaswolle) kontinuierliches Abbrennen (biogene Dämmstoffe mit Fixierung)	Nicht fixierte Einblasdämmstoffe (Zelluloseeinblasdämmung / Holzfasereinblasdämmung) Nicht fixierte Dämmstoffe ohne Klemmwirkung bzw. mit Schrumpfungsverhalten im Brandfall	Dämmstoffe mit Schrumpfungsverhalten (Holzfasermatten, Glaswolle)

Aus diesem Grund sollte zu jedem Dämmstoff neben der Grundschutzzeit t_{prot} auch die Versagenszeit t_f bestimmt werden. Bei Einblasdämmstoffen wie Zellulose oder Holzfaser ist das Herausfallen in allen hier untersuchten Konstruktionen sowie auch in den zur Verfügung gestellten Herstellerversuchen das maßgebende Versagenskriterium. Durch das nach Tiso definierte Protection Level (Tiso 2018), welches auch in prEN 1995-1-2:2020 (E) übernommen wurde, wird die Versagenszeit der Dämmstoffe abhängig von der Versagenszeit der davorliegenden Bekleidung begrenzt. In Rauch (2022) wurde gezeigt, dass die Annahmen

für das Protection Level, ursprünglich für die Schutzwirkung der Dämmung auf den Holzständer entwickelt, auch gut das Versagen der Dämmstoffe beschreiben kann.

7.1.3 Versuchsergebnisse Versagensmechanismen von Dämmstoffen

In der nachfolgenden Tabelle werden die Ergebnisse der Versuche zu den Versagensmechanismen von Dämmstoffen aufgeführt.

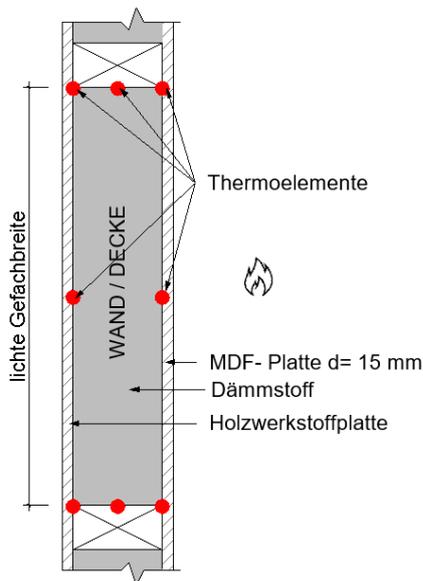
Tabelle 25: Experimentell ermittelte Versagenszeiten für das Berechnungsmodell zur Beurteilung des Versagens von Dämmstoffen

Material	Versagenstyp	Versagenszeit Versuch	Versagenszeit (Berechnung mit Begrenzung der Schutzzeit nach prEN 1995-1-2:2020 (E))
Steinwolle d = 120 mm $\rho = 38 \text{ kg/m}^3$ WAND	Durchwärmen der Steinwolle (Erreichen von 270 °C auf der Rückseite)	Wand 3 m x 3 m: 90 min Wand 1-m: 60,9 min	$t_{\text{prot, Daemm}} = 60,4 \text{ min}$ $t_{\text{f, Daemm}} = 56,6 \text{ min}$
Steinwolle d = 120 mm $\rho = 38 \text{ kg/m}^3$ DECKE	Herausfallen der Steinwolle	Decke 1-m: 63 min	$t_{\text{prot, Daemm}} = 60,4 \text{ min}$ $t_{\text{f, Daemm}} = 56,6 \text{ min}$
Zellulosefaser d = 120 mm $\rho = 58 \text{ kg/m}^3$ WAND	schollenartiges Versagen (Herausfallen) der Zellosedämmung	$\frac{h_i}{v_{\text{vers}}} = 10 \text{ min}$ mit $v_{\text{vers}} = 12 \text{ mm/min}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 8,6 \text{ Min}$ mit $v_{\text{rec}} = 14 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
Zellulosefaser d = 120 mm $\rho = 58 \text{ kg/m}^3$ DECKE	schlagartiges Versagen (Herausfallen) der Zellosedämmung zusammen mit der feuerzugewandten Holzwerkstoffplatte	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 0 \text{ min}$ mit $t_{\text{f, ZF}} = t_{\text{f, Bekleidung}}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 8,6 \text{ min}$ mit $v_{\text{rec}} = 14 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
Glaswolle d = 120 mm $\rho = 21,5 \text{ kg/m}^3$ WAND	Schmelzen der Glaswolle	$\frac{h_i}{v_{\text{vers}}} = 8 \text{ min}$ $v_{\text{rec}} = 24 \text{ mm/min}$ $v_{\text{vers}} = 24 \text{ mm/min}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 4 \text{ min}$ mit $v_{\text{rec}} = 30 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
Glaswolle d = 120 mm $\rho = 21,5 \text{ kg/m}^3$ DECKE	Schmelzen der Glaswolle anschließendes Herausfallen	$\frac{h_i}{v_{\text{vers}}} = 8 \text{ Min}$ mit $v_{\text{vers}} = 15 \text{ mm/min}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 4 \text{ Min}$ mit $v_{\text{rec}} = 30 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
Holzfaserdämmmatte d = 120 mm $\rho = 45,5 \text{ kg/m}^3$ WAND	Schrumpfen und Herausfallen	$\frac{h_i}{v_{\text{vers}}} = 9 \text{ Min}$ $v_{\text{vers}} = 13,3 \text{ mm/min}$ $v_{\text{rec}} = 13,6 \text{ mm/min}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 8,6 \text{ Min}$ mit $v_{\text{rec}} = 14 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
Holzfaserdämmmatte d = 120 mm $\rho = 45,5 \text{ kg/m}^3$ DECKE	Herausfallen direkt nach dem Versagen der Bekleidung	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 0 \text{ Min}$ $\rightarrow t_{\text{f, ZF}} = t_{\text{f, Bekleidung}}$	$\frac{h_i}{v_{\text{rec}}} = 8,6 \text{ Min}$ mit $v_{\text{rec}} = 14 \text{ mm/min}$ Nur mit Fixierungsmaßnahme!
mit:	h_i [mm] t_{prot} [min] t_{f} [min] v_{rec} [m/min] v_{vers} [m/min]	Dicke der Dämmung Schutzzeit Versagenszeit / Abfallzeit Rückzugsgeschwindigkeit Versagensgeschwindigkeit (Vergleichswerte zur Rückzugsgeschwindigkeit zur Beschreibung des Versagens des Dämmstoffes abhängig von der Dicke)	

Da das Protection Level mit Fixierungsmaßnahmen bestimmt wird, lässt sich dieses Ergebnis nicht ohne Weiteres auf nicht fixierte Dämmstoffe übertragen. Somit wurde in (Rauch 2022) auf Basis der experimentellen

Ergebnisse dieser Arbeit ein Vorschlag erarbeitet, um Dämmstoffe ohne Fixierungsmaßnahmen hinsichtlich des Herausfallens zu bewerten.

Abbildung 74: Beispielhafter Versuch zur Untersuchung der Versagenszeit von Dämmstoffen (Rauch 2022)



Vor dem Dämmstoff wird eine Holzwerkstoffplatte mit möglichst homogenem Durchbrandverhalten angeordnet, deren Versagen anhand der dahinter angebrachten Thermoelemente erfasst werden kann. Die seitlich sowie hinter dem Dämmstoff angebrachten Thermoelemente zeigen das Versagensverhalten der Dämmstoffe um diese nach Tabelle 24 einzuordnen.

7.1.4 Berücksichtigung von Holzwerkstoffplatten in rechnerischen Verfahren

Massivholzplatten und Holzwerkstoffe werden als Bekleidungslagen für Holzrahmenkonstruktionen mit aussteifender Funktion und Anforderungen an den Feuerwiderstand eingesetzt. Bestehende analytische Modelle zur Berechnung ermöglichen die Berücksichtigung des Beitrages dieser Schichten für den Feuerwiderstand der Gesamtkonstruktion. Zwei bestehende rechnerische Modelle zur Berechnung der Schutzzeiten sind hierfür möglich. Während in der DIN EN 1995-1-2: 2010-12 der Abbrand über Abbrandraten (vgl. Tabelle 26) vergleichbar zu massiven Vollholzquerschnitten, angepasst über eine Dicken-, bzw. Dichtekorrektur, berechnet werden kann, kann die Schutzzeit einer Holzwerkstoffbekleidung auf Basis des Modells nach Schleifer (2009) über eine Gleichung für die Grundschutzzeit (vgl. Tabelle 27) dickenabhängig bestimmt werden.

Tabelle 26: Bemessungswerte der Abbrandraten (DIN EN 1995-1-2:2010-12)

	β_0 [mm/min]	Bezugsrohddichte [kg/m ³]	Bezugsdicke [mm]
Holzbekleidungen	0,9	450	20
Sperrholz	1,0	450	20
Holzwerkstoffplatten außer Sperrholz	0,9	450	20

Für Holzbekleidungen mit einer Dicke $h_p \leq 20$ mm muss die Abbrandrate um den Faktor k_h erhöht werden. Abweichende Rohdichten werden über den Faktor k_ρ berücksichtigt.

$$\beta_n = \beta_0 \cdot k_h \cdot k_p \quad \text{Gl. 6}$$

$$k_h = \begin{cases} 1,0 & \text{für } h_p \geq 20\text{mm} \\ \sqrt{\frac{20}{h_p}} & \end{cases} \quad \text{Gl. 7}$$

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad \text{Gl. 8}$$

k_h [-] Faktor zur Berücksichtigung dünner Platten

k_p [-] Faktor zur Berücksichtigung der Rohdichte

h_p [mm] Plattendicke

Abweichend hiervon werden Exponentialfunktionen für Berechnung der Grundschutzzeit (270 °C Kriterium) in Schleifer (Schleifer 2009) angegeben.

Tabelle 27: Grundschutzzeiten/ Grundisolationszeiten für Holzwerkstoffplatten nach Schleifer (2009)

	$t_{\text{prot},0}$ [min]	$t_{\text{ins},0}$ [min]	Bezugsrohddichte (ρ_{20}) [kg/m ³]	Bezugsdicke (h_p) [mm]
Massivholzplatten	$30 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,1}$	$19 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,4}$	450	20
Spanplatten	$33 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,1}$	$22 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,4}$	580	20
OSB- Platten	$23 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,1}$	$16 \cdot \left(\frac{h_p}{20}\right)^{1,4}$	580	20

h_p [mm] Plattendicke

Ein Vergleich zeigt, dass die bestehenden Abbrandraten trotz des höheren Temperaturkriteriums von 300 °C statt 270 °C im Modell nach Schleifer für die Grundschutzzeiten zu wesentlich konservativeren Werten führen. Da bis jetzt kein einheitliches genormtes Verfahren zu Bestimmung der Abbrandraten existiert, sodass die Abbrandraten auf unterschiedliche Art bestimmt wurden, sind experimentelle Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar. Teilweise wurde die Differenz zwischen der ursprünglichen Querschnittsdicke und dem noch vorhandenen, nicht verkohlten Querschnitt gemessen (gemäß dieser Arbeit als „Abbrand“ definiert), oder der Abbrand über eine Messung der Temperaturen auf der feuerabgewandten Seite (in dieser Arbeit als Durchbrand bezeichnet) bestimmt. Verglichen mit den vorliegenden Versuchsergebnissen, entsprechen die bisherigen Abbrandraten den konservativeren Werten für den Durchbrand einer Holzwerkstoffplatte ohne Hinterlegung oder hinterlegt mit einem Dämmstoff.

Durch den geringen Unterschied der Temperaturkriterien von 300 °C (Abbrandmodell) bzw. 270 °C (Schleifer), der zu einem vernachlässigbar kleinen Unterschied in der Schutzzeit führt, liefern beide Berechnungsmethoden vergleichbare Ergebnisse für die Lage der 300°C bzw. 270 °C Isotherme liefern (Rauch 2022).

Abbildung 75: Probekörperrückseite, Thermolemente hinter 15 mm MDF-Platte mit Hinterlegung in der Stoßfuge.



Abbildung 76: Brandversuch – 15 mm MDF-Platte am Wandbauteil nach 19 min Brandbeanspruchung



Tabelle 28: Zeitdifferenz zwischen $t = 270\text{ °C}$ und $t = 300\text{ °C}$

Bekleidungsmaterial	$t_{270\text{ °C}}$	$t_{300\text{ °C}}$	Δt	Quelle (Versuch)
	t_{prot} [min]	t_{ch} [min]		
MDF- Platte – 15 mm	13,2	13,6	0,4	*
Spanplatte – 13 mm	16,6	17,0	0,4	(Teibinger und Matzinger 2010)
OSB – 15 mm	12,8	13,1	0,3	(Teibinger und Matzinger 2010)

* Eigene Versuche entsprechend Tabelle 6

Durch die Auswertung von Versuchsdaten aus der im Projekt erarbeiteten Datenbank (vgl. Abs. 3.2), ergänzt durch die innerhalb des Projekts durchgeführten Brandversuche (vgl. Kapitel 5), wurde ein neuer Bemessungsvorschlag zur Berechnung der Schutzzeiten von Holzwerkstoffplatten erarbeitet. Auf Basis, der in der Praxis vermehrt angewandten und etablierten Vorgehensweise wurde hierfür die Methode über Abbrandraten gewählt. Eine bisher im Abbrandmodell nicht getroffene Unterscheidung in Abbrand (vollständig hinterlegt) und Durchbrand (nicht hinterlegt, oder mit Dämmstoffen hinterlegt) ist hierfür notwendig (Rauch 2022).

In nachfolgender Tabelle 29 werden die Kriterien hinsichtlich der Unterscheidung zwischen Durchbrand und Abbrand beschrieben.

Tabelle 29: Unterscheidung zwischen Durchbrand und Abbrand (Rauch 2022)

Abbrand / Durchbrand	Temperaturkriterium (Rückseite)	Hinterlegung	Beschreibung
ABBRAND (ABB)	300 °C / 270 °C	unabhängig	Der Abbrand einer Holzwerkstoffplatte wird über das Fortschreiten der 300 °C Isotherme beschrieben. Auf der sicheren Seite kann auch die 270 °C Isotherme (entsprechend dem Modell nach Schleifer) herangezogen werden. Es handelt sich um einen Abbrand, solange sich die 300 °C Isotherme noch innerhalb der Plattenlage befindet und der Restquerschnitt mehr als 10 mm beträgt, die Platte somit nicht vollständig durchgebrannt ist.
DURCHBRAND (DRB) Situation A (im Bauteil)	300 °C / 270 °C	Holz Holzwerkstoffe Gipsplatten	Durch die flächige Hinterlegung der Platte ist der Durchbrand mit dem Abbrand vergleichbar. Die Abbrandrate kann herangezogen werden. Zur Berechnung der Schutzzeit wird der Positionsbeiwert von 1,0 verwendet. DRB - A = ABB
DURCHBRAND (DRB) Situation B (im Bauteil)	300 °C / 270 °C	Dämmstoffe Hohlräume	Durch die Hinterlegung der Platte mit Dämmstoffen oder einem Hohlraum entsteht ein Wärmestau, der zu einem schnelleren Durchbrand führt. Zur Berechnung des Durchbrandes wird der Positionsbeiwert $\leq 1,0$ entsprechend dem Verfahren nach Schleifer verwendet. $DRB - B = ABBRAND * k_{pos,unexp}$ mit $k_{pos,unexp} \leq 1$
DURCHBRAND (DRB) Situation C (feuerabgewandt)	160 °C (140 K)	keine	Auf der feuerabgewandten Seite findet die Wärmeübertragung über die Oberfläche statt. Hier ist das Kriterium für den Raumabschluss (140 K bzw. 160°C) für die Fläche maßgebend. Das geringere Grenzkriterium kann über eine zusätzlich geforderte Querschnittsdicke von 10 mm (auf der sicheren Seite) erfüllt werden.

Unter den genannten Randbedingungen entsprechend Tabelle 29 und unter Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse kann eine neue, modifizierte Abbrandrate für Holzwerkstoffe angegeben werden. Eine Korrektur der Dichte bzw. Dicke, die bei der Ermittlung der Schutzzeit der Holz-/ Holzwerkstoffbekleidung genutzt werden kann, mit den entsprechenden Faktoren nach DIN EN 1992-1-2:2010-12 (vgl. Gl. 6 bzw. Gl. 7) wird auf der sicheren Seite liegende beibehalten.

Tabelle 30: Neue, homogenisierte Abbrandraten für Holzwerkstoffe

	β_0 [mm/min]	Rohdichte [kg/m ³]	Dicke [mm]
Massivholz	0,65	450	20*
Spanplatte	0,72	450*	20*
OSB – Platten / MDF- Platten	0,9	450*	20*
LVL	0,9	450*	20*

* abweichende Rohdichten bzw. Dicken können über die Korrekturfaktoren nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (vgl. Gl. 6 und Gl. 7) bestimmt werden.

Um zukünftig einheitliche und vergleichbare Ergebnisse für Abbrandraten von Holzwerkstoffen zu erhalten, wurde in Anhang C der prEN 1995-1-2:2020 (E) die vorgestellte Methode von hinterlegten Holzwerkstoffplatten zur Bestimmung der Abbrandrate implementiert. Zukünftig wird die Abbrandrate über das Erreichen des 300 °C-Kriteriums hinter der untersuchten Schicht, hinterlegt mit einer 19 mm dicken Holzwerkstoffplatte ermittelt.

7.1.5 Bekleidungen aus Gipsplatten

Gipsplatten auf der feuerzugewandten Seite leisten in der Regel den wesentlichen Beitrag zur Schutzzeit von Wandkonstruktionen. Im gegenwärtigen Berechnungsverfahren für den Raumabschluss und für die Tragfähigkeit wird die Schutzwirkung von Gipsplatten über die Grundschutzzeit (t_{prot}) bzw. über die Versagenszeit (t) definiert. In DIN EN 1995-1-2:2010-12 wird der Beginn des Abbrandes hinter Gipsplatten über das 300 °C Kriterium in Anlehnung an König und Walleij (2000) bestimmt. Die Grundschutzzeit nach Schleifer basiert auf dem 270 °C Kriterium. Basierend auf einer numerischen und experimentellen Untersuchung durch Rauch (2022) wurden die verschiedenen Schutzzeiten der Gipsplatten miteinander verglichen.

Tabelle 31: Vergleich der Schutzzeiten unterschiedlicher normativer Grundlagen

Quelle	Plattentyp	Gleichung für die Grundschutzzeit / Beginn des Abbrandes	Kriterium	Gl.
DIN V ENV 1995-1-2:1994-05	Gipsplatte Typ F	$t_{pr} = \begin{cases} 1,9 \cdot \xi \cdot t_p & \text{für } t_p \leq 15 \text{ mm} \\ \xi \cdot (2,5 \cdot t_p - 9) & \text{für } t_p > 15 \text{ mm} \end{cases}$	$t_{pr}: 300 \text{ °C}$	Gl. 9
DIN EN 1995-1-2:2010-12	Gipsplatte Typ A, F oder H	$t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14$ zweilagig: h_p innen + 80% · h_p außen	$t_{ch}: 300 \text{ °C}$	Gl. 10
DIN EN 13381-7:2019-06	gipsbasierte Materialien	$t_{ch} = 1,8 \cdot h_p - 7$	$t_{ch}: 300 \text{ °C}$	Gl. 11
prEN 1995-1-2:2020 (E)	Gipsplatten (Typ A, F, H) / Gipsfaserplatten	$t_{ch} = \min \left\{ \sum t_{prot} \right.$ $t_{prot} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15} \right)^{1,2}$	$t_{prot}: 250 \text{ K}$	Gl. 12

h_p [mm] Plattendicke

t_{pr} [min] Schutzzeit

ξ [-] 0,8 für Decken mit Brandbeanspruchung von unten und mit Bekleidungsstößen die nicht an der Unterkonstruktion befestigt sind, sowie mehrlagige Stöße
1,0 für alle anderen Fälle

t_{ch} [min] Zeit des Verkohlungsbeginns

Resultierend aus dem Vergleich mit experimentellen und numerischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Gleichung Gl. 9 die geringsten Abweichungen zu den experimentellen und numerischen Ergebnissen zeigt.

Abbildung 77: Vergleich der Berechnungsergebnisse für t_{ch} und t_{prot} mit den Versuchswerten der Datenbank (vgl. Abs. 3.2) für Gipsplatten (Rauch 2022)

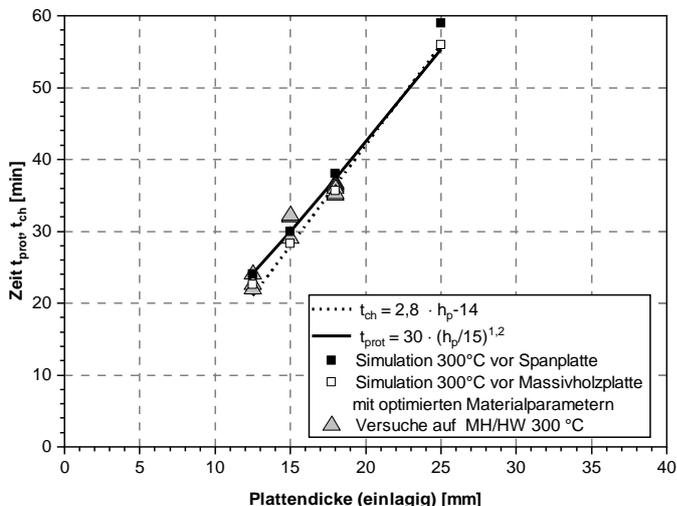


Tabelle 32: Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Prüfkörper Nr.	Erreichen von 300 °C hinter der feuerzugewandten Gipsplatte (Versuche)	Versagen der Gipsplatte t_f (Versuche)	Schutzzeit mit $t_{prot,0} = t_{ch} = 2,8 \cdot h_p - 14$	Schutzzeit mit $t_{prot,0} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$	t_f nach prEN 1995-1-2:2021-11*
V1-D-groß-HTB-18 mm GKF	26 min	42 min	28,1 min	28,8 min	32,4 min
V1-D-groß-BSP-18 mm GKF	35 min	60 min	36,4 min	37,3 min	35,6 min
V2-W-1m-HTB-18 mm GKF	27,5 min	72 min	28,1 min	28,8 min	57,8 min
V2-D-1m-HTB-18 mm GKF	26,5 min	41 min	28,1 min	28,8 min	32,4 min
V3-W-1m-BSP-18 mm GKF	33 min	85 min	36,4 min	37,3 min	63,6 min
V3-D-1m-BSP-18 mm GKF	37,5 min	84 min	36,4 min	37,3 min	35,6 min
V4-W-1m-HTB-12,5 mm GKF	16 min	46 min	15,3 min	17,6 min	32,5 min
V4-D-1m-HTB-12,5 mm GKF	15,5 min	16 min	15,3 min	17,6 min	25,3 min
V5-W-1m-BSP-12,5 mm GKF	20 min	61 min	21 min	24,1 min	35,8 min
V5-D-1m-BSP-12,5 mm GKF	20 min	56,5 min	21 min	24,1 min	27,8 min

mit: D: Decke
W: Wand
Groß: Decke mit der lichten Prüffläche: ca. 4 m x 1,55 m
1m: Prüfkörper im 1-m- Ofen, Abmessungen 1,10 m x 1,30 m
BSP: Prüfkörper mit Brettsperrholzelemente
HTB: Prüfkörper als Holztafelbauelement
GKF: Feuerschutzplatte

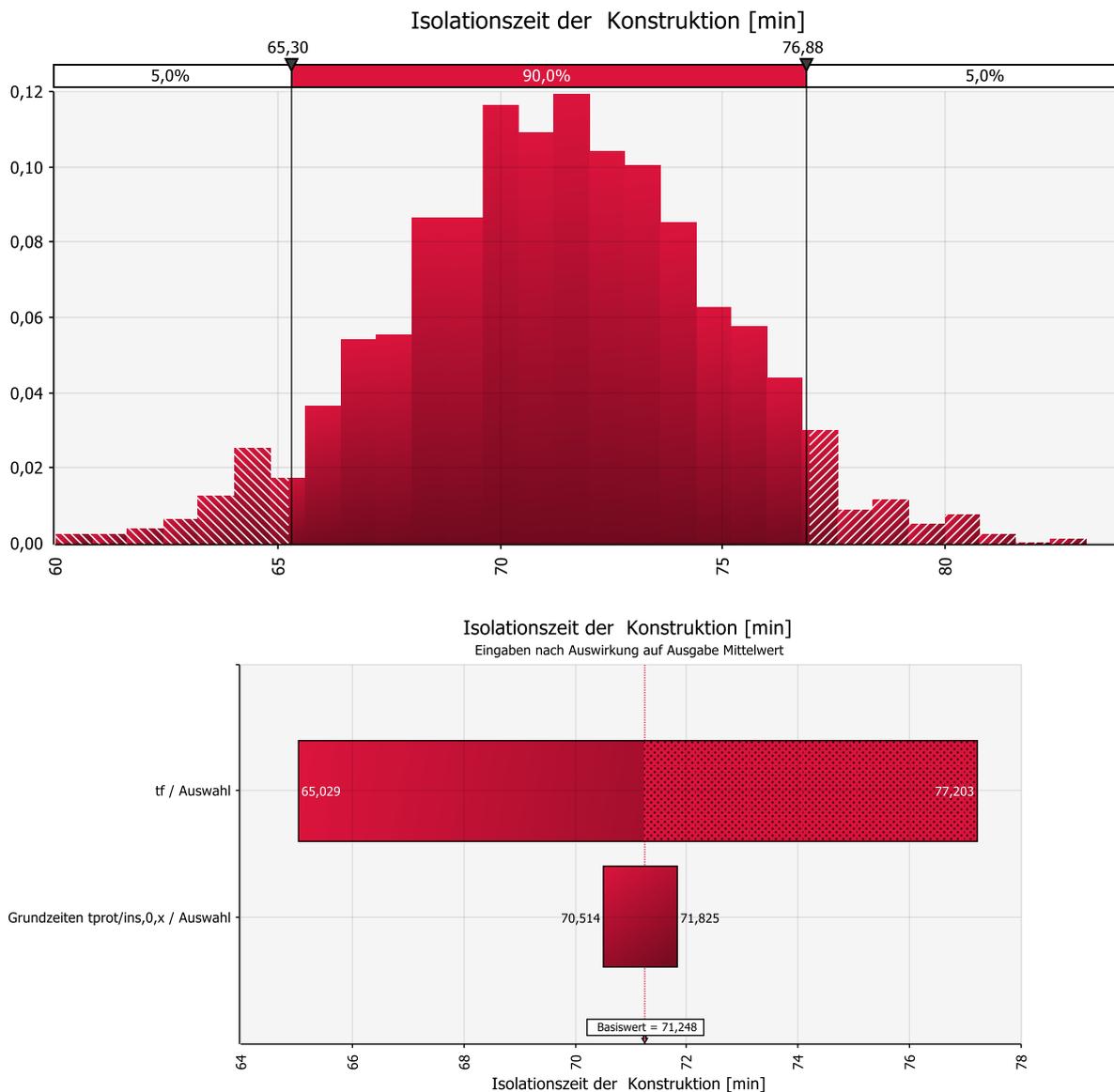
* $t_f = 4,6 \cdot h_p - 25$ (Wand HTB)
* $t_f = 4,6 \cdot h_p - 25$ (Wand BSP) mit 10 % Erhöhung
* $t_f = 1,3 \cdot h_p + 9$ (Decke HTB)
* $t_f = 1,3 \cdot h_p + 9$ (Decke BSP) mit 10 % Erhöhung

Bis auf die rot dargestellt Konstruktion (12,5 mm GKF an der Decke mit einem Unterstützungsabstand von 625 mm) liefern die berechneten **Versagenszeiten (t_f)** im Vergleich zu den hier durchgeführten experimentellen

Untersuchungen im 1-m- Ofen sowie im Großversuch sehr konservative bzw. unwirtschaftliche Ergebnisse. Die Grundschutzzeiten stimmen mit einer maximalen Abweichung $\leq \pm 3,4$ min (für die lineare Gleichung 9) gut mit den Versuchsergebnissen überein und bestätigen somit die numerischen Ergebnisse von Rauch (2022).

Eine Sensitivitätsanalyse basierend auf den Isolationszeit ($t_{ins,Berechnet} = 71$ min) ermittelt entsprechend dem 2. Draft der prEN 1995-1-2 (t_f für 18 mm GKF = 54 min) einer Wand (18 mm GKF – 80 mm Steinwolle – 18 mm GKF) zeigt unter der Annahme einer Standardnormalverteilung der Grundschutzzeit sowie der Versagenszeit der Bekleidung einen wesentlichen größeren Einfluss der Versagenszeit der Bekleidung auf die Schutzzeit im Vergleich zur Grundschutzzeit. Somit liegt hier ein erhebliches Optimierungspotential des Berechnungsverfahrens vor.

Abbildung 78: Auswirkung von Grundschutz- und Versagenszeiten der feuerzugewandten Gipsbekleidung auf den Gesamtisolationszeit (t_{ins}) der Konstruktion



Ergänzende Untersuchungen sind hier notwendig, um die Versagenszeiten detaillierter zu prognostizieren. Ebenfalls ist hier eine Variantenstudie der unterschiedlichen Einflussparameter sinnvoll, sobald das zukünftige rechnerische Verfahren der prEN 1995-1-2 systematisch final feststehen und Ergebnisse nach dem Prüfverfahren der DIN EN 13381-7:2019-06 vorliegen. Durch das vorhandene Modell, in dem die Versagenszeit

der Gipsplatten als externer Parameter angesetzt wird, können hier zukünftige Ergebnisse mitberücksichtigt werden.

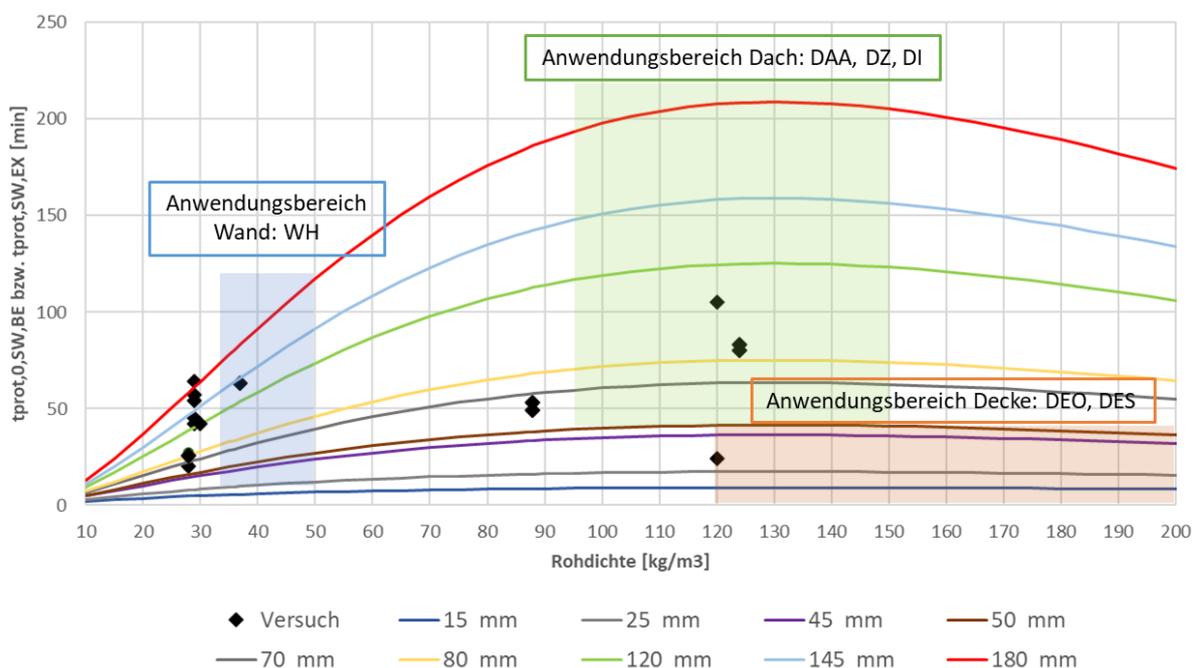
7.1.6 Mineralische Dämmstoffe mit hoher Rohdichte und großen Dicken

Ziel dieses Kapitels ist es, das Berechnungsmodell nach Schleifer für mineralische Dämmstoffe anhand bestehender Versuchsdaten zu prüfen, empirische Lücken im Verifizierungsprozess zu identifizieren und durch ergänzende Brandversuchsergebnisse zu schließen. Zusätzlich sollte das Modell hinsichtlich einer Anwendung für hohe Rohdichten bzw. Dicken zur Anwendung für Fußbodenkonstruktionen angepasst werden.

Hierfür wurden bestehende Versuche aus der Literatur ausgewertet und mit dem Anwendungsbereich für Dämmstoffe entsprechend DIN 4108-10 verglichen. Die Versuchsdaten, sowie die ausgewerteten Bestimmungsgleichungen nach Schleifer (2009) für unterschiedliche Dicken (15 mm bis 190 mm) sind in Abbildung 79 enthalten.

Aus Abbildung 79 lässt sich ableiten, dass die Bestimmungsgleichung nach Schleifer (2009) für eine Anwendung im Bereich hoher Rohdichten ($\geq 130 \text{ kg/m}^3$) nicht validiert wurde und eine Extrapolation in den Anwendungsbereichen DAA, DZ, DI (Dächer - grün) bzw. DES, DES (Fußböden / Decke - orange) fraglich ist. Typischerweise steigt mit zunehmender Rohdichte auch die Schutzzeit an. Bis zum validierten Bereich stimmt diese Hypothese mit der Gleichung überein. Im Rohdichtebereich von ca. 130 kg/m^3 ergibt sich ein Maximum und für höhere Rohdichtebereiche sinkt die Schutzzeit dann jedoch wieder, was sich jedoch nicht begründen lässt. Je dicker die Dämmstoffdicke, desto stärker ausgeprägter ist dieser Effekt. Da im nachfolgenden Kapitel Dämmstoffe mit hohen Rohdichten als Trittschalldämmung (Anwendungsbereich DEO, DES) mit abgebildet werden sollen, werden die versuchstechnischen Lücken durch ergänzende Bauteilversuche geschlossen.

Abbildung 79: Vorliegende Versuchsergebnisse sowie Vergleich mit den Schutzzeiten nach Schleifer abhängig von der Rohdichte der Dämmung und der Dicke im Anwendungsbereiche für Mineralwolle nach DIN 4108-10 (Brogstetter 2020)



Die in Tabelle 13 dargestellten Versuche wurden mit hohen Rohdichten (118 kg/m^3 bis 174 kg/m^3) und ein Versuch mit großer Dicke (180 mm) durchgeführt, um diese Lücken zu schließen. Durch Rauch (2022) wurden die experimentell ermittelten Temperaturverläufe hinter den Dämmstoffen mit dem bestehenden Simulationsmodell unter Berücksichtigung der Materialkennwerte nach Schleifer (2009) bzw. prEN 1995-1-2:2020 (E) für Steinwolle verglichen. Durch optimierte Materialparameter als Eingangswerte in die Simulation konnte eine verbesserte Gleichung für geringe Dicken und hohe Rohdichten erarbeitet werden.

Abbildung 80: Vergleich der Versuche mit den Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung der Materialparameter nach Schleifer (Rauch 2022)

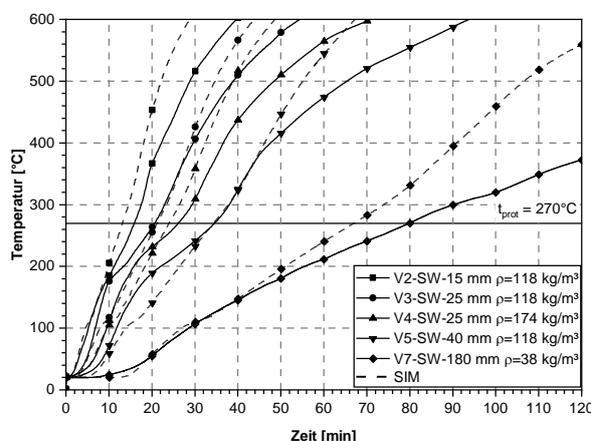
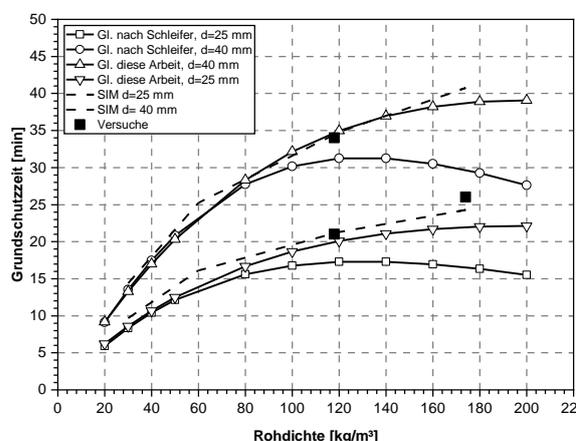


Abbildung 81: Vergleich der Bestimmungsgleichungen für hohe Rohdichten von Mineralwolldämmstoffen (Rauch 2022)



Die optimierte Gleichung führt zu konservativeren Werten für hohe Dicken und geringe Rohdichten, so dass diese nur für Dämmstoffdicken bis zu 40 mm angewendet werden sollte.

Tabelle 33: Grundschutzzeit und Grundisulationszeit für mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle nach Rauch (2022)

Material	Grundschutzzeit $t_{prot,0,i}$	Grundisulationszeit $t_{ins,0}$	
Mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle $d < 40$ mm	$t_{prot,0} = 0,45 \cdot h_i^{(0,65 \cdot \log(\rho_i) - (\frac{\rho_i}{700}))}$	$t_{ins,0} = (0,01 \cdot \rho_i^{0,224} - 0,02) \cdot h_i^2$	Gl. 13

- mit: $t_{prot,0}$ [min] Grundschutzzeit der Schicht
- $t_{ins,0}$ [min] Grundisulationszeit der Schicht
- h_i [mm] Plattendicke der jeweiligen Schicht für Platten und Bekleidungen
- ρ_i [kg/m³] Rohdichte der betrachteten Schicht

7.1.7 Der Beitrag von Estrichaufbauten für eine Brandbeanspruchung von der Oberseite

Die Schutzzeiten und der Wärmedurchgang durch den Estrich unter ETK- Beanspruchung wurde anhand von acht Kleinbrandversuchen (vgl. Abs. 5.5) ermittelt. Daraus kann ein neues Materialmodell zur weiteren Untersuchung für die Finite- Elemente- Analyse abgeleitet werden. Somit konnten verschiedene Konfigurationen berechnet und die Eingangsparameter für die SFM abgeleitet werden.

Zur Bestimmung der Schutzzeiten wurden die Temperaturverläufe (Mittelwerte aller 5 Thermoelemente) hinter den Schichten der Versuche ausgewertet (vgl. Anhang A9).

Abbildung 82: Temperaturverlauf hinter den Estrichen und Darstellung der Schutzzeit (Test 270 °C entspricht der Zeit bis zum Erreichen von 270°C)

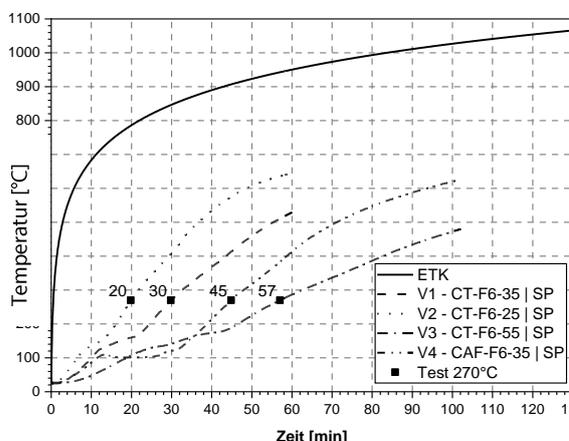
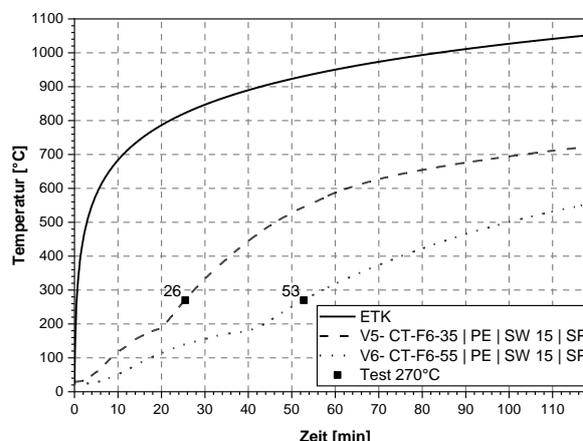


Abbildung 83: Temperaturverlauf hinter den Estrichen – hinterlegt mit Steinwolldämmung und Darstellung der Schutzzeit (Test 270 °C entspricht der Zeit bis zum Erreichen von 270°C)



In den Grundschutzzeiten von hinterlegten Estrichen ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem Zementestrich und dem Calciumsulfatestrich erkennbar. Vergleichbar zu Gipsplatten bildet sich beim Calciumsulfatestrich durch das freie, bzw. kristallin im Gips gebundene Wasser bei 100°C bis ca. 180°C ein Plateau aus, das zu einer Verlängerung der thermischen Schutzzeit im Vergleich zum Zementestrich führt. Eine Hinterlegung mit Mineralwolle (V5 und V6) hat im Vergleich zur Hinterlegung mit Spanplatte (V1 bis V4) eine Verringerung der Schutzzeit des Estrichs zur Folge. Estriche hinter Dämmschichten (V7 und V8) führen hingegen zu einer wesentlich höheren Schutzzeit der Dämmschicht im Vergleich zu Dämmschichten, hinterlegt mit Holzwerkstoffplatten. Dies ist nur für eine Beurteilung von der Unterseite relevant.

Abbildung 84: Temperaturverlauf hinter der Steinwolldämmung – hinterlegt mit Estrich und Darstellung der Schutzzeit (Test 270°C - Zeit bis zum Erreichen von 270°C)

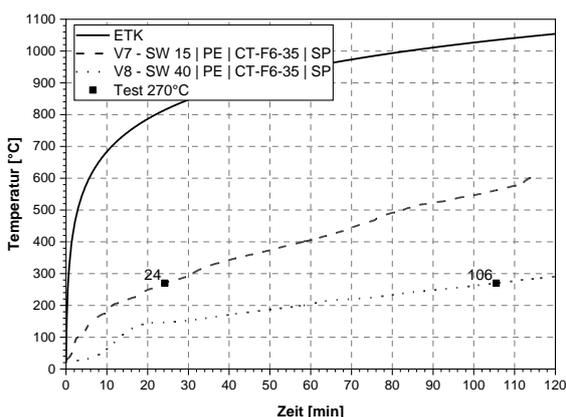
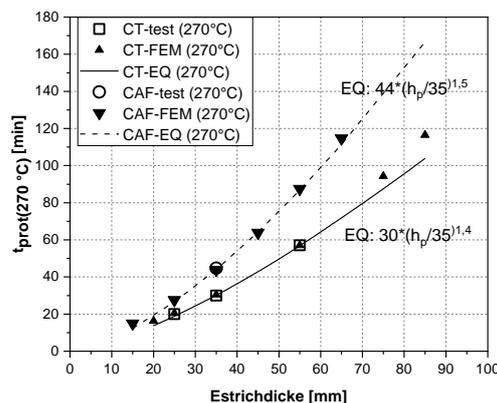


Abbildung 85: Vergleich zwischen Bestimmungsgleichung (EQ), Simulation (FEM) und Versuchsergebnissen (Test) von Zement (CT)- und Calciumsulfatestrichen.



Auf Basis dieser Untersuchungen wurden neue Materialparameter als Eingangswerte für numerische Simulationen ermittelt und daraus analytische Bestimmungsgleichungen angegeben. Die grundlegenden Materialkennwerte als Eingangswerte für die numerische Simulation wurden durch Mändl (2019) und weiter durch Rauch (2022), basierend auf den Werten der DIN EN 1992-1-2:2010-12 ermittelt. Hier wurden auch Kennwerte für die Positionsbeiwerte sowie den k_2 -Faktor abgeleitet, um unterschiedliche Hinterlegungsmaterialien, bzw. die Schutzwirkung des Estrichs über die Schutzzeit hinaus zu berücksichtigen. Entsprechende Bestimmungsgleichungen werden in Tabelle 34 bis Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 34: $k_{\text{pos,exp}}$ von Estrichelementen auf Trittschalldämmung

Material	$k_{\text{pos,exp}}$	
Zementestrich: Calciumsulfatestrich:	$k_{\text{pos,exp}} \begin{cases} 1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,i}} \\ 0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{prot},0,i}}{\sum t_{\text{prot},i-1}}} \end{cases} \text{ mit } \begin{cases} \sum t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2} \\ \sum t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,i}}{2} \end{cases}$	Gl. 14

mit: $t_{\text{prot},0,1}$ [min] Grundschutzzeit der Steinwolle
 $\sum t_{\text{prot},i-1}$ [min] Summe der Schutzzeiten der davorliegenden Schichten

Tabelle 35: k_2 für Materialien hinter Estrichen

Material	k_2 - Faktor	
Mineralische Dämmstoffe	$k_2 = \frac{15}{h_{\text{Estrich}}} + 0,003 \cdot h_{\text{SW}} - 0,045$	Gl. 15
Holzmassiv-/ Holzwerkstoffplatte	$k_2 = 0,8 - 0,006 \cdot h_{\text{Estrich}}$	Gl. 16

mit: h_{Estrich} [mm] Estrichdicke
 h_{SW} [mm] Dicke der Mineralwolle

Die Werte für k_2 dieser Untersuchung gelten für Estrichdicken bis zu 90 mm, einer Dicke der Trittschalldämmung von maximal 50 mm und Dicke der Holzwerkstoffplatte von maximal 40 mm. Somit ergibt sich ein maximales Δt der Trittschalldämmung von:

Tabelle 36: Δt der Trittschalldämmung

Material	Δt	
Materialunabhängig	$\Delta t = \frac{t_{\text{prot},0}}{k_2} - (t_{\text{prot},0} \cdot k_{\text{pos,exp}} \cdot k_{\text{pos,unexp}}) \cdot k_j$	Gl. 17

mit: $t_{\text{prot},0}$ [min] Grundschutzzeit
 k_2 [-] Schutzbeiwert
 $k_{\text{pos,exp}}$ [-] Positionsbeiwert feuerzugewandt
 $k_{\text{pos,unexp}}$ [-] Positionsbeiwert feuerabgewandt
 k_j [-] Fugenbeiwert

Durch die ermittelten Gleichungen können Fußbodenaufbauten in die SFM integriert werden. Für Bauteildicken von Holz- oder Holzwerkstoffplatten über 40 mm, wird bei Massivholzelementen die Anwendung des Abbrandmodells in Verbindung mit dem k_2 - Wert empfohlen.

Zusätzlich ist es möglich, den Fußbodenaufbau als brandschutztechnisch wirksame Schicht bis zum Erreichen von 300 °C für eine Brandbeanspruchung von der Oberseite zu berücksichtigen. Hierfür wurden mögliche Aufbauten in nachfolgender Tabelle 37 entsprechend (Rauch et al. 2020b) dargestellt.

Tabelle 37: Schutzzeiten [min] von Estrichen auf Trittschalldämmung oder Holzwerkstoffplatten – Schutzzeit des Gesamtaufbaus

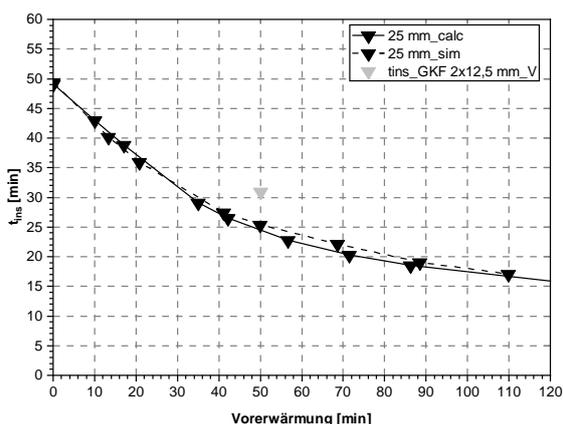
Aufbau	Estrichdicke [mm]									
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	80
E						30			60	90
E + 15 I	-		30				60			90
E + 20 I	-		30			60			90	
E + 30 I	30			60				90		
E + 13W		30				60				90
E + 15W		30				60			90	
E + 19W	30			60					90	

mit: S t_{prot} von Estrichen auf Holzwerkstoffplatten
 xx I/W Dicke des Hinterlegungsmaterials
 I: Trittschalldämmung Rohdichte $\geq 100 \text{ kg/m}^3$
 W: Holzwerkstoffplatte
 E: Estrich

7.2 Ergebnisse für lange Brandbeanspruchungen

Wie bereits in den Voruntersuchungen gezeigt (vgl. Kapitel 3), wird die SFM mit zunehmender Anzahl an Bauteilschichten konservativer. Einflussfaktoren auf die Schutzzeit einer Schicht innerhalb der Konstruktion sind nach Schleifer (2009) neben der Grundschutzzeit lediglich die Vorerwärmung. Diese fließt in den Positionsbeiwert mit ein, wodurch die Schutzzeit reduziert wird. Um die Anwendbarkeit für lange Brandbeanspruchungen zu untersuchen, ist somit eine Betrachtung der Positionsbeiwerte notwendig. Hierfür wurde ein Vergleich der Simulation mit dem Berechnungsverfahren und experimentellen Ergebnissen über 60 Minuten hinaus durchgeführt (Rauch 2022).

Abbildung 86: Vergleich t_{ins} in Abhängigkeit der Vorerwärmung zwischen Simulation und analytischen Ansatz von GKF- Platten hinter Dämmstoffen



mit: t_{ins_V} Versuch
 calc Berechnungsmodell
 sim Simulation

Abbildung 87: Vergleich t_{ins} von GKF- Platten hinter Holzwerkstoffplatten

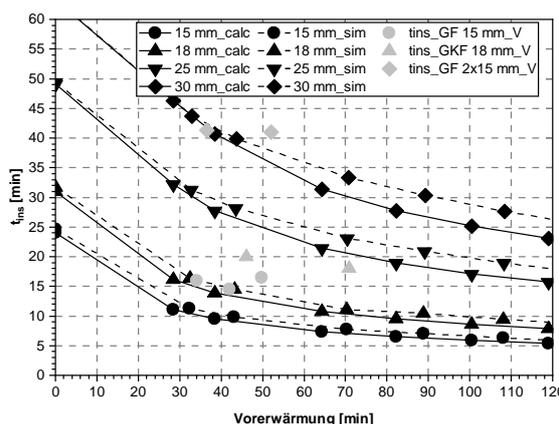


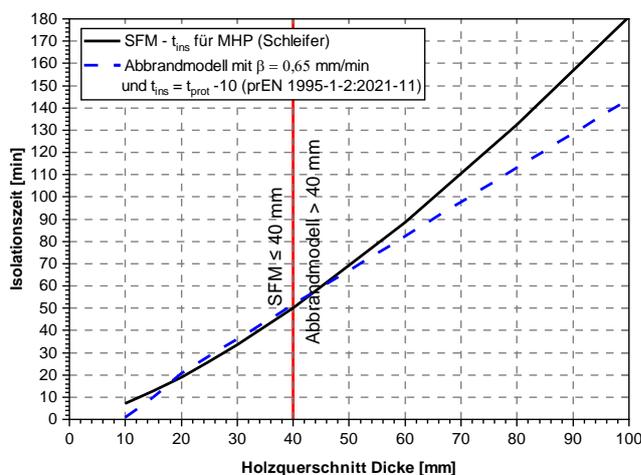
Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen den Vergleich von Gipsplatten (GKF) hinter Holzwerkstoffplatten bzw. Dämmstoffen mit unterschiedlichen Vorerwärmungszeiten. Hier wird das Ergebnis wie bereits durch (Rauch et al. 2018) anhand einer Vergleichsrechnung mit bestehenden Versuchen, bestätigt, dass das analytische Berechnungsmodell auch für lange Brandbeanspruchungen von bis zu 120 min eingesetzt werden kann und hierfür auf der konservativen Seite liegt.

7.3 Ein überarbeiteter analytischer Berechnungsansatz für Brettsperrholzwände

7.3.1 Grundlagen zur Isolationszeit von Massivholzbauteilen

Abbrandraten zur Bestimmung der Grundschutzzeit von Holzwerkstoffplatten wurden bereits für Holzwerkstoffplatten (vgl. Tabelle 30) dargestellt. Eine Abgrenzung zwischen den Holzwerkstoffplatten und massiven Holzquerschnitten ist in prEN 1995-1-2:2020 (E) nicht angegeben. Diese wurde durch Huber (2020) und Rauch (2022) untersucht. Ab einer Dicke von 40 mm steigt die rechnerische Isolationszeit der SFM stark an und weicht zunehmend vom Abbrandmodell ab (vgl. Abbildung 88). Dieses wurde bereits vielfach untersucht und die Ergebnisse in (Werther 2016) zusammengefasst.

Abbildung 88: Vergleich der Isolationszeiten (t_{ins}) nach der SFM und dem Abbrandmodell (Rauch 2022)



Abbrandmodell entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E):

$$t_{prot,n} = \frac{h_n}{\beta}$$

$$t_{ins,n} = t_{prot,n} - 10$$

h : Plattendicke

β : Abbrandrate

$t_{prot,n}$: Schutzzeit der letzten Schicht

$t_{ins,n}$: Isolationszeit

Abbildung 88 zeigt deutlich die Abweichung der beiden Modelle, der SFM und dem Abbrandmodell ab einer Bauteildicke von 40 mm. Somit sollte in der Bestimmung der Isolationszeit ab einer Lagendicke von mehr als 40 mm für Holz- und Holzwerkstoffplatten das Abbrandmodell angewendet werden. Während bei sehr dicken Einzellagen die SFM- Methode für die Isolationszeit zu hohe Schutzzeiten liefert, sind die Ergebnisse für Brettsperrholzelemente, berechnet als hintereinander angeordnete Einzellagen sehr konservativ (Rauch 2022). Somit sollte für Brettsperrholzelemente das Stufenmodell nach (Schmid et al. 2018) zur Bestimmung der Abbrandtiefe herangezogen werden.

7.3.2 Das Abbrandmodell entsprechend prEN 1995-1-2:2021-11

In prEN 1995-1-2:2020 (E) wird im Stufenmodell zwischen Wänden und Decken sowie abhängig vom Verhalten der Klebefuge unterschieden. Wird gewährleistet, dass die Klebefuge nicht vor dem Erreichen des Abbrandes (300 °C Isotherme) versagt, kann mit dem linearen Abbrandmodell gerechnet werden und ein Abfallen der verkohlenden Schichten muss nicht mitberücksichtigt werden. Ist von einem vorzeitigen Versagen der anhaftenden Holzkohle auszugehen, muss für Decken das Stufenmodell und für Wände das Abbrandmodell mit erhöhter Abbrandrate angewendet werden. Die nachfolgende Betrachtung geht im ersten Schritt von ungeschützten Querschnitten aus, die direkt vom Brand beansprucht werden. Beide Berechnungssystematiken der prEN 1995-1-2:2021-11 sind in Abbildung 89 und Abbildung 90 dargestellt.

Abbildung 89: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt ohne die Berücksichtigung des Versagens von Einzellamellen (z.B. Vollholzquerschnitt) → linearer Ansatz

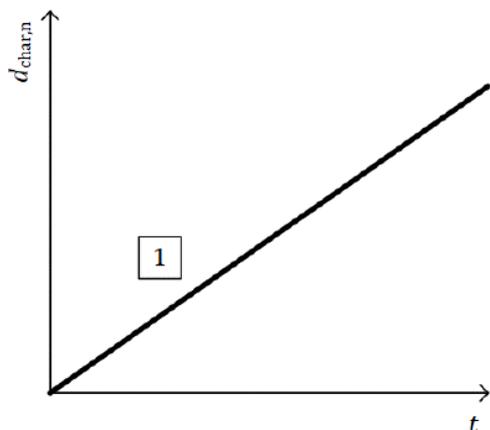
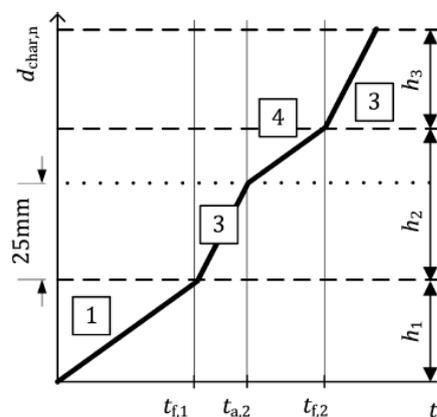


Abbildung 90: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt unter Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. BSP- Decke) → Stufenmodell



Für flächige Brettsperrholzelemente, für die ein Versagen der Klebefuge berücksichtigt werden muss, wird das Stufenmodell angesetzt (vgl. Abbildung 90). Somit ergeben sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Abbrandphasen folgende Abbrandraten:

Tabelle 38: Abbrandraten β_n entsprechend der verschiedenen Abbrandphasen

Phase	β_n	
Phase 1 und 4	$\beta_n = k_g \cdot \beta_0$	→ Abbrand der ungeschützten Bauteile sowie mit vollständig ausgebildeter Holzkohleschicht
Phase 2	$\beta_n = k_2 \cdot k_g \cdot \beta_0$	→ reduzierte Abbrandrate der geschützten Bauteile nur relevant für geschützte Bauteile
Phase 3	$\beta_n = 2 \cdot k_g \cdot \beta_0$	→ erhöhte Abbrandrate bis zum Erreichen der vollständigen Holzkohleschicht (25 mm)

- mit:
- β_n [mm/min] Abbrandrate innerhalb einer Phase, in mm/min
 - β_0 [mm/min] Grundwert der eindimensionalen Abbrandrate, in mm/min, i.d.R. 0,65 mm/min
 - k_2 [-] Schutzfaktor für die Phase 2 (nur für geschützte Querschnitte)
 - k_g [-] Faktor zur Berücksichtigung von Fugen

Hierbei wird vorerst nicht zwischen dem unterschiedlichen Verhalten von vertikal orientierten Wandbauteilen und horizontal orientierten Deckenbauteilen unterschieden. Ergänzend wird für vertikal orientierte flächige Elemente, wie Wände, bei denen ein Versagen der Klebefuge mitberücksichtigt werden muss, ein vereinfachter linearer Ansatz für ungeschützte Brettsperrholzbauteile mit erhöhter Abbrandrate gegeben. Als lineare Abbrandrate zur Bestimmung des Restquerschnitts nach prEN 1995-1-2:2021-11 kann folgende Gleichung genutzt werden:

Tabelle 39: Abbrandtiefe β_n für Phase 1 nach Abbildung 89

Phase	β_n	
Phase 1	$\beta_n = 1,2 \cdot k_g \cdot \beta_0$	Gl. 21

- mit:
- β_n [mm/min] Abbrandrate innerhalb einer Phase, in mm/min
 - β_0 [mm/min] Grundwert der eindimensionalen Abbrandrate, in mm/min
 - k_g [-] Faktor zur Berücksichtigung von Fugen

Die 20 % Erhöhung der Abbrandrate (ausgedrückt durch den Faktor $k_3 = 1,2$) decken den Einfluss eines Abfallens von anhaftender Holzkohle ab. Anstelle eines Stufenmodells darf vereinfacht ein linearer Ansatz mit erhöhter Abbrandrate gewählt werden.

Der lineare Ansatz zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen für Abbrandtiefen in der zweiten oder dritten Lage der Brettsperrholzelemente (vgl. Abbildung 91). Die erste, direkt dem Brand zugewandte Lamelle liefert zu Berechnung der Tragfähigkeit den größten Beitrag. Für diese Lamelle wird zugunsten des einfachen linearen Ansatzes eine erhöhte Abbrandrate von 0,8 mm/min anstelle von 0,65 mm/min verwendet und führten somit zu einer erhöhten Abbrandtiefe. Diese wirkt sich negativ auf die Berechnung der Tragfähigkeit, vor allem bei dicken Randlamellen und primär bei dreischichtigen Wandelementen aus.

7.3.3 Ein neues Modell für Brettsperrholzwände basierend auf dem Stufenmodell

Abbildung 91 zeigt den Unterschied zwischen dem Stufenmodell für Decken, mit einem k_3 -Wert von 2,0 sowie dem linearen Abbrandmodell mit einer Abbrandrate von 0,8 mm/min für Wandelemente. Das Stufenmodell liegt im Vergleich der Berechnungsmodelle sowie mit den hier dargestellten Wandversuchen im konservativen Bereich für Feuerwiderstandsdauern von mehr als 40 min. Für geringere Feuerwiderstandsdauern kann für die erste Lamelle im Stufenmodell eine Abbrandrate von 0,65 mm/min angesetzt werden. Im Vergleich zum linearen Abbrandmodell werden im Stufenmodell für die erste Lamelle geringere Abbrandraten und Abbrandtiefen berechnet. Sobald der k_3 -Wert für eine erhöhte Abbrandrate nach dem Versagen bzw. einer verkohlenden Lamelle (z.B. der ersten Lamelle) angesetzt wird, liefert das ursprünglich für Decken entwickelte Berechnungsmodell, mit einem k_3 -Wert von 2,0, sehr konservative Ergebnisse. Im Vergleich mit den in dieser Untersuchung ausgewerteten Versuchen zeigt sich, dass der lineare Ansatz von 0,8 mm/min bzgl. längerer Beanspruchungsdauern, die über die erste Lamelle darüber hinaus gehen eine gute Übereinstimmung mit den Brandversuchsergebnissen liefert.

Abbildung 91: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperrholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

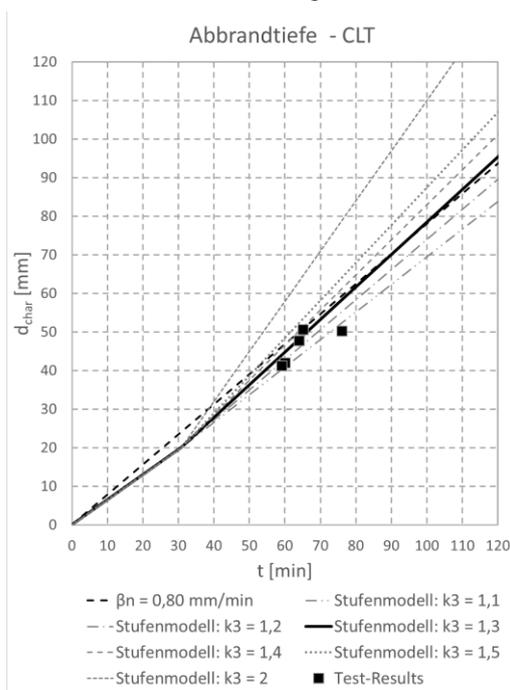
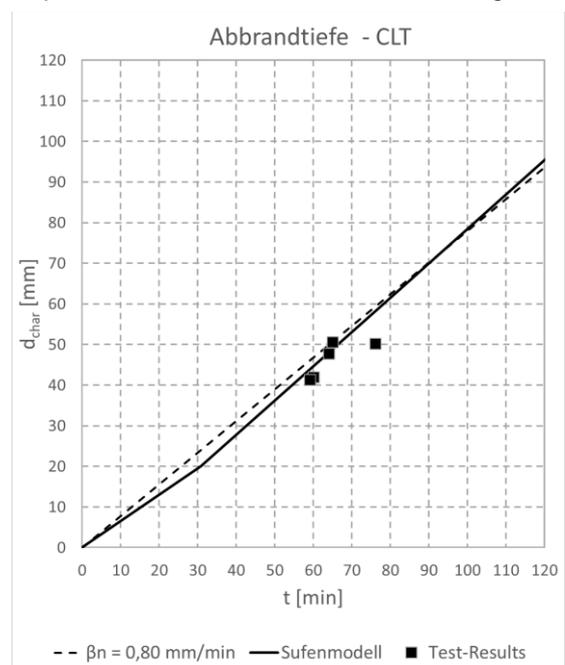


Abbildung 92: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,3$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperrholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

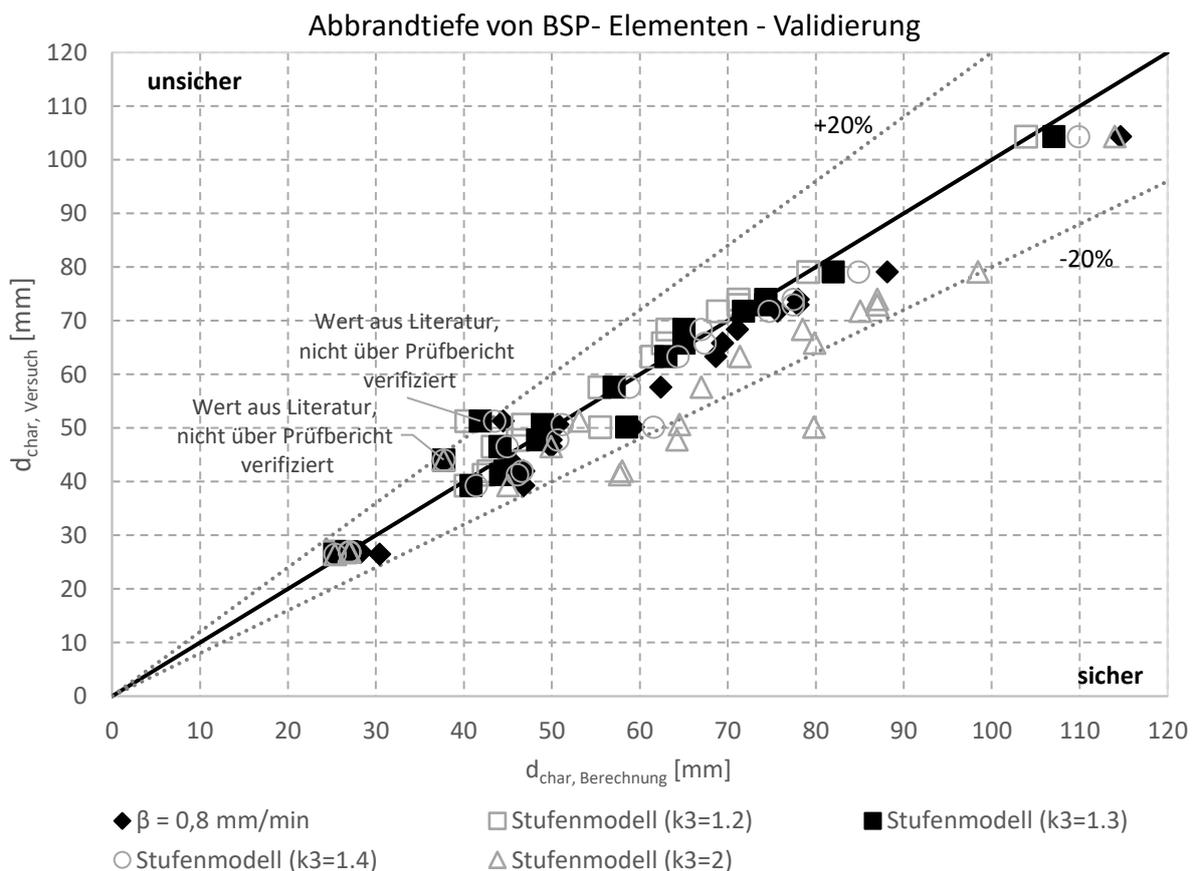


Das Stufenmodell lieferte einen realistischen Modellansatz, der ein vorzeitiges Abfallen der Holzkohleschicht der Einzellamellen mitberücksichtigt. Dieser Ansatz lässt sich prinzipiell auch auf Wandelemente übertragen. Ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen (vgl. Abbildung 91) zeigt jedoch, dass eine k_3 -Wert von 2,0 zu einem sehr konservativen und unwirtschaftlichen Bemessungsergebnis führt. Die Ursache hierfür liegt daran, dass die schützende Holzkohleschicht aufgrund der Schwerkraft sich an Decken schneller ablöst als an Wänden. Um diesen Unterschied zu berücksichtigen, wurden verschiedene k_3 -Werte untersucht und mit den Versuchsergebnissen verglichen.

Abbildung 92 sowie Abbildung 93 zeigen den Vergleich zwischen dem linearen Ansatz sowie dem Stufenmodell für einen **k_3 -Wert von 1,3**. Hierfür konnte eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erreicht werden. Zusätzlich führt dieser Ansatz zu einer Homogenisierung der Modellansätze. Die Logik des Stufenmodells kann somit für Wände und Decke angewendet werden.

Es bleibt jedoch anzumerken, dass für anfangs durch Bekleidungen geschützte CLT Wand-Elemente es weiterhin nach Versagen des Bekleidungssystems (Phase 3) zu einem erhöhten Abbrand mit der doppelten Abbrandrate kommt. Für bekleidete CLT Wandelemente kann daher der zuvor vorgestellte modifizierte Ansatz im Stufenmodell erst nach Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm hinter der versagten Bekleidung berücksichtigt werden.

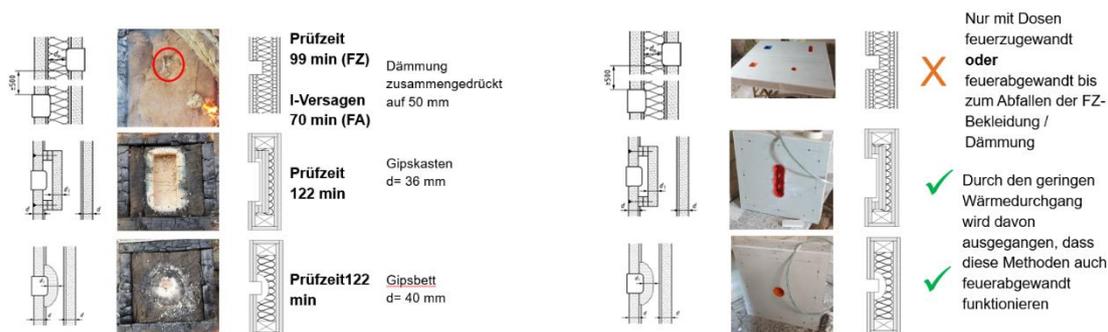
Abbildung 93: Vergleich zwischen dem Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) unterschiedlicher Versuchsdaten von Brettsperreholzelementen



7.4 Die Auswirkung von Einbauteilen auf den Raumabschluss

Einbauten (Steckdosen, Verteilerdosen) in Holztafelbauelementen und deren konstruktive Ausführungsgrundsätze wurde im in diesem Projekt mit untersucht. Eine Recherche im europäischen Raum zeigte, dass sich zugehörige normative Regelungen für identische Einbauten unterscheiden und zusätzlich von herstellerspezifischen Angaben abweichen. Um eine Anwendung für Feuerwiderstandsdauern bis zu 90 Minuten zu untersuchen, wurden diese Grundsätze verglichen und ergänzende experimentell Versuche durchgeführt (vgl. Abbildung 94 und Abschnitt 5.6).

Abbildung 94: Untersuchungen zu Einbauteilen in Holztafelbauelementen



FZ: Einbauteil feuerzugewandt

FA: Einbauteil feuerabgewandt

Aus den Untersuchungen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Zur brandschutztechnischen Kompensation der aus Einbauten resultierenden Öffnungen sind Lösungen mit Gipsbett, Gipskasten und Hinterlegung mit brandschutztechnisch notwendiger Dämmung zu empfehlen.
- Eine Begrenzung der Öffnungsgröße auf maximal 200 cm² je Wandseite und Gefach wird empfohlen, da mit zunehmender Öffnungsgröße der negative Einfluss des Einbauteils auf den Feuerwiderstand zunimmt. Diese Begrenzung wurde auch in der Lignum Dokumentation 6.1 (Studhalter et al. 2010) gewählt.

Die maximal zulässige Restdicke von nichtbrennbaren, mineralischen Dämmstoffen ≥ 1.000 °C wurde abhängig von der Konstruktion und Feuerwiderstandsklasse erhöht. Die bisher angegebene Restdicke von 30 mm konnte nur bis zu einem Feuerwiderstand von maximal 30 Minuten bestätigt werden. Mit einer Restdicke von 50 mm wurde der Feuerwiderstand von 60 Minuten nachgewiesen. Die ermittelten Werte liegen über den bisherigen Angaben in DIN 4102-4:2016-05, decken sich aber mit den Randbedingungen entsprechend der Lignum Dokumentation in der Schweiz (Frangi et al. 2017). Ein Raumabschluss von mehr als 90 Minuten konnte nur für die Einbauteile auf der feuerzugewandten Seite experimentell nachgewiesen werden. Ergänzend zu dieser Arbeit wurde die SFM für Einbauteile durch (Rauch 2022) durch ergänzende numerische Simulationen untersucht. Die SFM lässt sich auch im Bereich der Einbauteile für Feuerwiderstandsdauern über 60 Minuten hinaus anwenden, liefert aber sehr konservative, teils unwirtschaftliche Ergebnisse. Zur Berücksichtigung im Rechenmodell wurden folgende Optimierungsansätze erarbeitet:

- Die Beanspruchung innerhalb des Bauteils (auch bei kleinen Einfachdosen) entspricht der Beanspruchung des flächigen Bauteils.
- Feuerzugewandte Kunststoffeinbauteile (Hohlwanddosen) schmelzen sehr schnell ($t < 5$ min) und können im Berechnungsmodell vernachlässigt werden.

- Bei einer Brandbeanspruchung von der Seite des Einbauteils können zusammengedrückte, mineralische Dämmstoffe mit einem Schmelzpunkt $\geq 1000\text{ °C}$ und einer Rohdichte $\geq 26\text{ kg/m}^3$ als Maßnahme zur Kompensation der Schwächung herangezogen werden. Durch das schnelle Schmelzen des Einbauteils ist eine Berücksichtigung mit der Ausgangsrohichte und Ausgangsdicke im Rechenmodell möglich. Durch die mehrdimensionale Temperaturlausbreitung im Bauteil kann die Grundsutzzeit des Dämmstoffes im Bereich des Einbauteils im Rechenmodell um:
 - 20 % für Einbauteile bis zu 150 mm x 150 mm
 - 50 % für Einbauteile bis zu 60 mm x 180 mmerhöht werden.

Die seitlichen Abstände zu Holzbauteilen von mineralisch gedämmten Konstruktionen können nicht über die SFM berechnet werden. Hier wird auf die empirisch bzw. mittels Simulation bestimmten Mindestabstände verwiesen, die auf der konservativen Seite liegend angegeben werden:

- $\geq 50\text{ mm}$ für 30 min Feuerwiderstand
- $\geq 100\text{ mm}$ für 60 min Feuerwiderstand
- $\geq 150\text{ mm}$ für 90 min Feuerwiderstand

8 Ergebniszusammenstellung

8.1 Ein erweitertes Modell für den Raumabschluss

8.1.1 Grundlagen zum erweiterten Modell

Resultierend aus den Untersuchungen für lange Brandbeanspruchungen über 60 Minuten hinaus wurde gezeigt, dass das neue Modell der prEN 1995-1-2:2020 (E) für den Raumabschluss bis zu einer Anwendung von 120 Minuten Feuerwiderstand geeignet. Die Ergebnisse liegen für den Großteil der Untersuchten Konstruktionen auf der sicheren Seite. Das Additive Verfahren für den Raumabschluss biete neben der Flexibilität in der Anwendung den Vorteil, dass Modelloptimierungen kontinuierlich ergänzt werden können. Der überarbeitete Ansatz für ein neues Δt (vgl. Abs. 2.4.4) ermöglicht eine explizite Berücksichtigung des Versagens (Abfallens) einzelner Schichten. Im Zuge dieser Arbeit wurden basierend auf dem bestehenden Modellansatz nachfolgend genannte Optimierungsansätze für einzelne Schichten erarbeitet.

8.1.2 Optimierungsansätze für Einzelschichten

Für den Modellansatz wurden die Grundschutzzeiten für Massivholzplatten, Gipsplatten sowie für Estriche und Dämmstoffe mit hohen Rohdichten und geringen Dicken untersucht. Nachfolgende Tabellen zeigen die Zusammenfassung der Bestimmungsgleichungen, basierend auf den experimentellen Untersuchungen sowie den zugehörigen Grundlagenuntersuchungen.

Tabelle 40: Bestimmungsgleichungen für Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0,i}$ und Grundisoliationszeit $t_{\text{ins},0}$

Material	Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0,i}$	Grundisoliationszeit $t_{\text{ins},0}$	
Gipsplatten (GF, GKF, Typ F, Typ DF)	$2,8 \cdot h_p - 14$	nach prEN 1995-1-2:2020 (E) oder alternativ nach Rauch (2022) mit $t_{\text{prot},0,i} - (0,345 \cdot h_p - 1,5)$ oder $2,45 \cdot h_p - 12,5$	Gl. 22
Massivholzplatten (MHP), Spanplatten (SP), OSB- Platten (OSB), Mitteldichte Faserplatten (MDF) $h_p \leq 40 \text{ mm}$	$\beta = \beta_0 \cdot k_\rho \cdot k_h^{**} \geq 0,65^*$ $\frac{h_p}{\beta_0 \cdot k_\rho \cdot k_h^{**}}$ mit $\beta \geq 0,65^*$ mit $\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ für MHP $\beta_0 = 0,72 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ für SP $\beta_0 = 0,9 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ für OSB / MDF	nach prEN 1995-1-2:2020 (E) oder alternativ nach Rauch (2022) mit $\frac{h_p - d_{\text{res}}}{\beta_0 \cdot k_\rho}$ mit $\beta_0 \geq 0,65^*$ mit $d_{\text{res}} = 3,5 \cdot h_p^{0,2}$	Gl. 23
Zementestriche	$30 \cdot \left(\frac{h_p}{35}\right)^{1,4}$	$18,5 \cdot \left(\frac{h_p}{35}\right)^{1,4}$	Gl. 24
Calciumsulfatestriche	$44 \cdot \left(\frac{h_p}{35}\right)^{1,5}$	$32 \cdot \left(\frac{h_p}{35}\right)^{1,55}$	Gl. 25
Fertigestriche basierend auf Gipsplatten	vgl. Gipsplatten (GF, GKF, Typ F, Typ DF)		Gl. 26

Fortsetzung Tabelle 40: Bestimmungsgleichungen für Grundschutzzeit $t_{prot,0,i}$ und Grundisoliationszeit $t_{ins,0}$

Material		Grundschutzzeit $t_{prot,0,i}$	Grundisoliationszeit $t_{ins,0}$	
Mineralische Dämmstoffe Steinwolle $h_i \geq 40$ mm	aus	$0,3 \cdot h_i^{(0,75 \cdot \log(\rho_i) - (\frac{\rho_i}{400}))^{***}}$	$(0,01 \cdot \rho_i^{0,224} - 0,02) \cdot h_i^2$ ***	Gl. 27
Mineralische Dämmstoffe Steinwolle $h_i < 40$ mm	aus	$0,45 \cdot h_i^{(0,65 \cdot \log(\rho_i) - (\frac{\rho_i}{700}))}$	$(0,01 \cdot \rho_i^{0,224} - 0,02) \cdot h_i^2$ ***	Gl. 28

- * Begrenzung, da nur wenige Versuchsergebnisse für geringere Abbrandraten zur Validierung vorliegen
 - ** k_h müsste nur bei einer Hinterlegung mit Dämmstoffen angewendet werden. Vereinfachend wird die Korrektur als allgemeiner Faktor für Holzwerkstoffplatten empfohlen.
 - *** nach (Schleifer 2009)
- mit:
- $t_{prot,0}$ [min] Grundschutzzeit der Schicht
 - $t_{ins,0}$ [min] Grundisoliationszeit der Schicht
 - h_p [mm] Plattendicke der jeweiligen Schicht für Platten und Bekleidungen
 - h_i [mm] Dicke der Dämmung (Insulation)
 - d_{res} [mm] Restquerschnittsdicke
 - ρ_i [kg/m³] Rohdichte der betrachteten Schicht
 - k_p [-] Faktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Rohdichten
 - k_h [-] Faktor zur Berücksichtigung geringer Dicken (nur für eine Hinterlegung mit Dämmstoffen)
 - β_0 [mm/min] Bemessungswert der Abbrandrate

Tabelle 41: Angepasste Positionsbeiwerte $k_{pos,exp}$ und $k_{pos,unexp}$ für Estriche

Material	$k_{pos,exp}$	$k_{pos,unexp}$	
Zementestrich:	$k_{pos,exp} = \begin{cases} 1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0}} & \text{mit } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0}}{2} \\ 0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{prot,0}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0}}{2} \end{cases}$	0,85	Gl. 29
Calciumsulfat-estrich:		0,85	

Tabelle 42: Angepasste k_2 -Faktoren für Gipsplatten

Material	k_2 - Faktor entsprechend Norm EN 1995-1-2:2020(E)	
Gipsplatten Typ F, DF, GKF oder GF und Trockenstriche	$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55}$	Gl. 30
Mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle mit $\rho \geq 30$ kg/m ³ und einem Schmelzpunkt > 1000 °C	$k_2 = 0,6$ für $h_p \geq 45$ mm $k_2 = 0,6$ für 20 mm $\leq h_p \leq 45$ mm	Gl. 31
Zementestriche	$k_2 = \frac{15}{h_{Estrich}} + 0,003 \cdot h_{SW} - 0,045$ für Trittschalldämmstoffe (Steinwolle)	Gl. 32
	$k_2 = 0,8 - 0,006 \cdot h_{Estrich}$ für Holzmassiv- oder Holzwerkstoffplatten	Gl. 33

- mit k_2 [-] Schutzbeiwert
 h_p [mm] Schichtdicke
 (bei Estrichen wurde zur Unterscheidung das Material mit angegeben)

Für Brettsperrholzwände wurde das Stufenmodell analog zu den Deckenkonstruktionen untersucht und ein Vorschlag für Wände erarbeitet.

Eine um 20% erhöhte lineare Abbrandrate (vgl. Modell nach prEN 1995-1-2:2020 (E)) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen und kann auch in Zukunft als einfache Bemessungsmöglichkeit herangezogen werden.

Eine genauere Berechnung mit wirtschaftlicheren Lösungen, vor allem für die ersten Lamellen ist über das Stufenmodell möglich. Hierfür für Wände in der Phase 3 ein k_3 - Wert von 1,3 (anstelle von 2,0 bei Decken) anzuwenden.

Tabelle 43: Angepasste β_n -Werte für ungeschützte Brettsperrholzwände und Decken (ohne „Bond Line Integrity“)

Material	β_n -Werte für Phase 3	
	Decken: $\beta_n = 2 \cdot k_g \cdot \beta_0$	Gl. 34
	Wände: $\beta_n = 1,3 \cdot k_g \cdot \beta_0$	Gl. 35

8.1.3 Anwendungsgrundlagen für Einbauteile (Elektrodosen)

Einbauteile wie Elektrodosen können unabhängig von deren Größe mit der SFM nachgewiesen werden. Hierfür sind folgende Annahmen zu treffen, die sich aus den experimentellen Untersuchungen sowie den theoretischen Grundlagen nach Rauch (2022) zusammensetzen:

- Die Beanspruchung innerhalb des Einbauteils (auch bei kleinen Einfachdosen) entspricht der Beanspruchung des flächigen Bauteils auf der feuerzugewandten Seite.
- Feuerzugewandte Kunststoffeinbauteile (Hohlwanddosen) schmelzen bei direkter Brandbeanspruchung sehr schnell ($t < 5 \text{ min}$) und können im Berechnungsmodell vernachlässigt werden.
- Bei einer Brandbeanspruchung auf der Seite des Einbauteils können zusammengedrückte, mineralische Dämmstoffe mit einem Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ °C}$ und einer Rohdichte $\geq 26 \text{ kg/m}^3$ als Maßnahme zur partiellen Kompensation der Schwächung (Öffnung in der Bekleidung) herangezogen werden. Durch das schnelle Schmelzen des Einbauteils ist eine Berücksichtigung mit der Ausgangsrohichte und Ausgangsdicke des Gefachdämmstoffes im Berechnungsmodell möglich. Durch die mehrdimensionale Temperaturausbreitung im Bauteil kann die Grundschutzzeit des Dämmstoffes im Bereich des Einbauteils im Rechenmodell um:
 - 20 % für Einbauteile bis zu $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$
 - 50 % für Einbauteile bis zu $60 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$
 erhöht werden.
- Mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle (mit einem Schmelzpunkt $\geq 1000 \text{ °C}$) im Bereich von feuerzugewandten Einbauteilen schützen dahinterliegende Schichten auch nach dem Erreichen der Schutzzeit. Davorliegende Bekleidungsschichten verhindern ein vorzeitiges Versagen (Herausfallen des Dämmstoffes). Somit kann im Berechnungsmodell das Versagen des Dämmstoffes im Bereich des

Einbauteils mit der Versagenszeit (herausfallen) des Dämmstoffes im restlichen Gefach gleichgesetzt werden.

- Die experimentelle Untersuchung des Einbauteils auf der feuerabgewandten Seite zeigt, dass ein Versagen des Raumabschlusses kurz nach dem Versagen (Abfallen) der feuerzugewandten Bekleidungsanlagen auftritt. Ein Schutz durch die Dämmung für das dahinterliegende Einbauteil nach dem Bekleidungsversagen ist nicht zwingend sichergestellt, da wie im Versuch ein Konvektionsstrom durch das Zusammendrücken hinter der Dämmung auftreten kann, der zu einem Raumabschlussversagen führt. Im Berechnungsmodell ergibt sich das Versagen somit aus dem Minimum zwischen der Schutzzeit des Dämmstoffes unter der prozentualen Berücksichtigung der Komprimierung (Reduktion der Dicke und Erhöhung der Rohdichte) und der Versagenszeit (Abfallzeit) der feuerzugewandten Bekleidungsanlagen bis zum Dämmstoff.
- Die seitlichen Abstände zu Holzbauteilen von mineralisch gedämmten Konstruktionen im Bereich des Einbauteils können nicht über die SFM berechnet werden. Hier wird auf die empirisch bzw. mittels Simulation bestimmten Mindestabstände verwiesen, die auf der konservativen Seite liegend angegeben werden:
 - ≥ 50 mm für 30 *min* Feuerwiderstand
 - ≥ 100 mm für 60 *min* Feuerwiderstand
 - ≥ 150 mm für 90 *min* Feuerwiderstand

8.2 Diskussion des Modells zur Bestimmung der Tragfähigkeit

Das Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit von Holztafelbaukonstruktionen basiert auf der Arbeit von Tiso (2018). Laut den Analysen von Ernstberger (2020) führt das Nachweisverfahren zu stark konservativen, teilweise unwirtschaftlichen Werten. Eine abschließende quantitative Analyse ist erst möglich, wenn die finalen Eingangsgrößen wie Schutz- und Versagenszeiten der Bekleidungsanlagen vorliegen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Da es sich bei der Bemessung an sich um ein Modell handelt, das auf der Berechnung des Abbrandes basiert und die Schutzzeiten auf Basis der Methode des Raumabschlusses bis 90 Minuten Feuerwiderstand berechnet werden können, ist eine Anwendung des Verfahrens zur Berechnung der Tragfähigkeit ebenfalls bis zu einem Feuerwiderstand von 90 Minuten möglich. Die Untersuchung der d_0 -Werte nach Tiso (2018) wurde bis 90 Minuten Brandbeanspruchung durchgeführt, so dass auch hier keine Nachweislücke entsteht. Das Berechnungsbeispiel im Anhang zeigt, dass für Holzquerschnitte mit einer Gefachdämmung des Protection-Level 1 (z.B. Steinwolle) teilweise sehr geringe d_0 -Werte bzw. auch negative d_0 -Werte für quadratische Querschnitte nach prEN 1995-1-2:2020 (E) möglich sind. Hier ist eine weitere Überarbeitung bzw. Untersuchung im Rahmen der Weiterentwicklung der prEN 1995-1-2 vorgesehen.

9 Beispielnachweise

9.1 Vorbemerkung

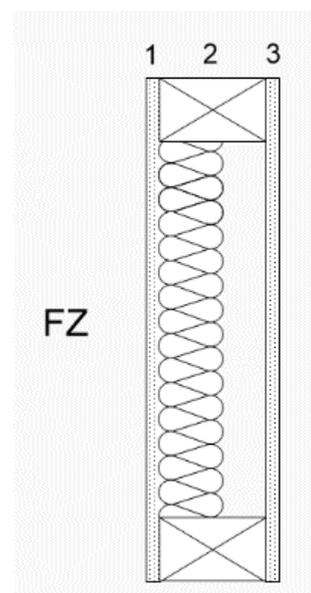
Das nachfolgend dargestellte Berechnungsbeispiel diene als Grundlage für den Workshop „Bauteilbemessung“ zum Forschungsprojekt F-REI 90 am 15.07.2020 und wurde in der nachfolgenden Version an die prEN 1995-1-2:2020 (E)(Final Draft) angepasst.

Durch die ständige Weiterentwicklung des Entwurfsdokuments stellten diese Beispiele nur den gegenwärtigen Stand dar und spiegeln kein eingeführtes Bemessungsverfahren wider. Diese Beispiele dienen zur Diskussion der Methoden und der Einflussgrößen und zeigen die systematische Vorgehensweise für den Bauteilnachweis.

9.2 Bauteilaufbau

Tabelle 44: Wandkonstruktion, Last-Ausnutzung: 0,8, Last pro Ständer: 12 kN

Position	Material/ Abmessungen
Bekleidung feuerzugewandt	GKF d = 12,5 mm Fugenausführung: verspachtelt / hinterlegt
Tragkonstruktion	<u>Holzständer:</u> Nadelschnittholz (C24): b x h = 60 mm x 100 mm Achsabstand e = 625 mm
Gefachdämmung	Mineralwolle mit Schmelzpunkt $\geq 1000\text{ °C}$, $\rho \geq 30\text{ kg/m}^3$ d = 60 mm
Bekleidung feuerabgewandt	GKF d = 12,5 mm Fugenausführung: verspachtelt

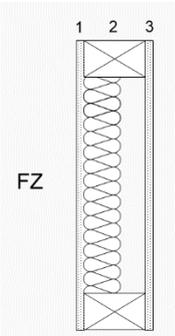


In diesem Berechnungsbeispiel wird aufgrund des asymmetrischen Bauteilaufbaus der Nachweis für den Raumabschluss und die Tragfähigkeit von beiden Seiten erbracht (Wandseite A und Wandseite B).

9.3 Raumabschluss der Wandseite A

9.3.1 Schichtaufbau

Tabelle 45: Nummerierung der Schichten von Beispielkonstruktion 1 bei Brandbeanspruchung

Schichten von innen nach außen			
Nr.	Stärke	Bezeichnung	
1	12,5 mm	GKF	
2	60 mm 40 mm	Steinwolle ($\rho = 30 \text{ kg/m}^3$) Hohlraum	
3	12,5 mm	GKF	

Der Nachweis wird über die Einhaltung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer für den Raumabschluss geführt.

9.3.2 Ermittlung der Isolationszeit t_{ins} des betrachteten Wandaufbaus:

$$t_{\text{ins}} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{\text{prot},i} + t_{\text{ins},n} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.54)}$$

mit

t_{ins}	[min]	Isolationszeit des gesamten Bauteils
$t_{\text{prot},i}$	[min]	Schutzzeit der untersuchten Schicht i
$t_{\text{ins},n}$	[min]	Isolationszeit der letzten Schicht n (feuerabgewandte Seite)
i	[-]	Nummer der Schichten auf der feuerzugewandten Seite
n	[-]	Nummer der letzten Schicht auf der feuerabgewandten

Der betrachtete Wandaufbau besteht aus drei Schichten, die für den Raumabschluss berücksichtigt werden können. Für die Schichten 1-2 auf der feuerzugewandten Seite ist jeweils die Schutzzeit $t_{\text{prot},i}$ zu ermitteln. Für die letzte Schicht auf der feuerabgewandten Seite (Schicht 3) ist die Isolationszeit $t_{\text{ins},n}$ zu ermitteln. Der Hohlraum wird in der dahinterliegenden Schicht mitberücksichtigt.

$$t_{\text{ins}} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{\text{prot},i} + t_{\text{ins},n} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.54)}$$

$$t_{\text{ins}} = t_{\text{prot},1} + t_{\text{prot},2} + t_{\text{ins},3}$$

$$t_{\text{ins}} = (17,59 + 16,84 + 10,97) \text{ min}$$

$$t_{\text{ins}} = \mathbf{45,40 \text{ min}}$$

9.3.3 Berechnung $t_{\text{prot},1}$ GKF

$$t_{\text{prot},1} = (t_{\text{prot},0,1} \cdot k_{\text{pos,exp},1} \cdot k_{\text{pos,unexp},1} + \Delta t_1) \cdot k_{j,1} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.55)}$$

mit

$t_{\text{prot},1}$	[min]	Schutzzeit der betrachteten Schicht 1
$t_{\text{prot},0,1}$	[min]	Grundsutzzeit der betrachteten Schicht 1
$k_{\text{pos,exp},1}$	[-]	Positionskoeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses der davorliegenden Schichten

$k_{\text{pos,unexp},1}$	[-]	Positionskoeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses von dahinterliegenden Schichten
Δt_1	[min]	Korrekturzeit der betrachteten Schicht 1
$k_{j,1}$	[-]	Fugenbeiwert der betrachteten Schicht 1

Die in der folgenden Gleichung eingetragenen Werte werden in den nachfolgenden Abschnitten hergeleitet.

$$t_{\text{prot},1} = (24,10 \text{ min} \cdot 1,0 \cdot 0,73 + 0 \text{ min}) \cdot 1,0 \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.55)}$$

$$t_{\text{prot},1} = 17,59 \text{ min}$$

9.3.4 Berechnung der Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0,1}$:

$$t_{\text{prot},0,1} = 30 \cdot \left(\frac{h_1}{15}\right)^{1,2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.56)}$$

mit

$t_{\text{prot},0,1}$ [min] Grundschutzzeit der betrachteten Schicht 1 nach prEN 1995-1-2 Tabelle 7.10

h_1 [mm] Dicke der betrachteten Schicht 1

$$t_{\text{prot},0,1} = 30 \cdot \left(\frac{12,5}{15}\right)^{1,2}$$

$$t_{\text{prot},0,1} = 24,10$$

9.3.5 Berechnung des Positionskoeffizienten $k_{\text{pos,exp},1}$:

Der Positionskoeffizient $k_{\text{pos,exp},1}$ berücksichtigt den Einfluss von davorliegenden Schichten. Da es sich bei der betrachteten Schicht um die erste Schicht auf der feuerzugewandten Seite der Konstruktion handelt, kann $k_{\text{pos,exp},1}$ ohne weiteren Nachweis zu 1,0 angenommen werden.

9.3.6 Berechnung des Positionskoeffizienten $k_{\text{pos,unexp},1}$:

Die GKF in der betrachteten Schicht 1 weist als dahinterliegende Schicht eine 60 mm dicke Dämmschicht aus Steinwolle auf.

$$k_{\text{pos,unexp},1} = 0,5 \cdot h_1^{0,15} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.84)}$$

mit

$k_{\text{pos,unexp},1}$ [-] Positionskoeffizient zur Berücksichtigung der hinter Schicht 1 liegenden Schicht

h_1 [mm] Dicke der betrachteten Schicht 1

$$k_{\text{pos,unexp},1} = 0,5 \cdot (12,5 \text{ mm})^{0,15} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.84)}$$

$$k_{\text{pos,unexp},1} = 0,73$$

9.3.7 Ermittlung des Fugenbeiwerts $k_{j,1}$:

Gemäß den Angaben des Bauteilaufbaus werden die Fugen verspachtelt ausgeführt.

Die Schicht hinter der GKF besteht aus einer 60 mm dicken Dämmung. Der Fugenbeiwert bestimmt sich somit gemäß prEN 1995-1-2 (4th Draft) Abschn. 7.3.5 (1) und ist gleich 1,0.

9.3.8 Berechnung der Korrekturzeit Δt_1 :

Die Korrekturzeit Δt berücksichtigt die zusätzliche schützende Funktion von brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungsanlagen. Da die betrachtete GKF nicht durch ein Brandschutzsystem mit $t_{f,pr} > t_{\text{prot}}$ geschützt wird, ist Δt für diese Schicht nicht relevant und wird daher gleich Null gesetzt. Die feuerzugewandte Lage entspricht hier der brandschutztechnischen Bekleidung.

9.3.9 Berechnung $t_{\text{prot},2}$ Steinwolle

$$t_{\text{prot},2} = (t_{\text{prot},0,2} \cdot k_{\text{pos},\text{exp},2} \cdot k_{\text{pos},\text{unexp},2} + \Delta t_2) \cdot k_{j,2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.55)}$$

mit

$t_{\text{prot},2}$	[min]	Schutzzeit der betrachteten Schicht 2
$t_{\text{prot},0,2}$	[min]	Grundsutzzeit der betrachteten Schicht 2
$k_{\text{pos},\text{exp},2}$	[-]	Positionskoeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses der davorliegenden Schichten
$k_{\text{pos},\text{unexp},2}$	[-]	Positionskoeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses von dahinterliegenden Schichten
Δt_2	[min]	Korrekturzeit der betrachteten Schicht 2
$k_{j,2}$	[-]	Fugenbeiwert der betrachteten Schicht 2

Die in der folgenden Gleichung eingetragenen Werte werden in den nachfolgenden Abschnitten hergeleitet.

$$t_{\text{prot},2} = (20,59 \text{ min} \cdot 0,54 \cdot 1,0 + 9,93 \text{ min}) \cdot 0,8 \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.55)}$$

$$t_{\text{prot},2} = 16,84 \text{ min}$$

9.3.10 Berechnung der Grundsutzzeit $t_{\text{prot},0,2}$:

Die verwendete Steinwolle ist mit ihrer Rohdichte von $\geq 26 \text{ kg/m}^3$ gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Tabelle 7.5 in PL 1 einzuordnen und weist eine Dicke h_2 von 60 mm auf. Die Grundsutzzeit wird daher nach Gleichung (7.61) ermittelt.

$$t_{\text{prot},0,2} = 0,3 \cdot h_2^{\left(0,75 \cdot \log(\rho_2) - \frac{\rho_2}{400}\right)} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.61)}$$

mit

$t_{\text{prot},0,2}$	[min]	Grundsutzzeit der betrachteten Schicht 2 nach prEN 1995-1-2 Tabelle 7.10
h_2	[mm]	Dicke der betrachteten Schicht 2
ρ_2	[kg/m ³]	Rohdichte der betrachteten Schicht 2

$$t_{\text{prot},0,2} = 0,3 \cdot 60 \text{ mm}^{\left(0,75 \cdot \log(30 \text{ kg/m}^3) - \frac{30 \text{ kg/m}^3}{400}\right)} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.61)}$$

$$t_{\text{prot},0,2} = 20,59 \text{ min}$$

9.3.11 Berechnung des Positionskoeffizienten $k_{\text{pos},\text{exp},2}$:

$$k_{\text{pos},\text{exp},2} = \begin{cases} 1 - 0,6 \frac{\sum t_{\text{prot},i-1}}{t_{\text{prot},0,2}} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} \leq \frac{t_{\text{prot},0,2}}{2} \\ 0,5 \sqrt{\frac{t_{\text{prot},0,2}}{\sum t_{\text{prot},i-1}}} & \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,2}}{2} \end{cases} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.80)}$$

mit

$t_{\text{prot},0,2}$	[min]	Grundsutzzeit der betrachteten Schicht 2 nach prEN 1995-1-2 Tabelle 7.10
$\sum t_{\text{prot},i-1}$	[min]	Summe der Schutzzeiten aller davorliegenden Schichten

Bedingung von Gleichung (7.80) überprüfen:

$$\sum t_{\text{prot},i-1} > \frac{t_{\text{prot},0,2}}{2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 1 Bed. (7.80)}$$

$$t_{\text{prot},1} > \frac{t_{\text{prot},0,2}}{2}$$

$$17,59 \text{ min} > \frac{20,59 \text{ min}}{2}$$

$$17,59 \text{ min} > 10,295 \text{ min}$$

⇒ Bedingung der zweiten Zeile von Gleichung (7.80) erfüllt.

$$k_{\text{pos,exp},2} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{prot},0,2}}{\sum t_{\text{prot},i-1}}} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.80)}$$

$$k_{\text{pos,exp},2} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{20,59}{17,59}}$$

$$k_{\text{pos,exp},2} = 0,54$$

9.3.12 Berechnung des Positionskoeffizienten $k_{\text{pos,unexp},2}$:

Die Steinwolle füllt das Gefach nicht komplett aus, wodurch hinter der Dämmschicht ein Hohlraum mit $d = 40 \text{ mm}$ liegt. Daher wird $k_{\text{pos,unexp},2}$ entsprechend Tabelle 7.14 in prEN 1995-1-2:2020 (E) bestimmt.

$$k_{\text{pos,unexp},2} = 1,0$$

9.3.13 Ermittlung des Fugenbeiwerts $k_{j,2}$:

Die Ermittlung des Fugenbeiwerts $k_{j,2}$ erfolgt nach prEN 1995-1-2:2020 (E), Tabelle 7.15. Hinter der betrachteten Schicht aus Steinwolle liegt ein Hohlraum $\geq 40 \text{ mm}$, der Fugenbeiwert ist gleich 0,8.

9.3.14 Berechnung der Korrekturzeit Δt_2 :

Die Korrekturzeit Δt berücksichtigt die zusätzliche schützende Funktion von Brandschutzsystemen. Da die betrachtete Dämmung aus Steinwolle durch ein Brandschutzsystem mit geschützt wird, muss Δt für diese Schicht nach prEN 1995-1-2:2020 (E), Abs. 7.3.6 herangezogen werden.

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,\text{pr}} - \sum_{k=i}^{i-1} t_{\text{prot},k}) \cdot \Delta t_{\text{max},i}}{t_{\text{prot},\text{max},i}} \leq \Delta t_{\text{max},i} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.95)}$$

mit

$$\Delta t_i \quad [\text{min}] \quad \text{Korrekturzeit der Schicht 2 nach prEN 1995-1-2 (7.95)}$$

$$t_{f,\text{pr}} \quad [\text{min}] \quad \text{Versagenszeit des Brandschutzsystems nach Tab. 5.4}$$

$$\sum_{k=i}^{i-1} t_{\text{prot},k} \quad [\text{min}] \quad \text{Summe der Schutzzeit des Brandschutzsystems}$$

$$\Delta t_{\text{max},i} \quad [\text{min}] \quad \text{Maximale Korrekturzeit der Schicht 2}$$

Bei dem Brandschutzsystem handelt es sich um eine Gipsplatte Typ F mit $d = 12,5 \text{ mm}$ in vertikaler Ausrichtung (Wand). Daher berechnet sich $t_{f,\text{pr}}$ nach Gl. (5.10) in Tabelle 5.4 (prEN 1995-1-2:2020 (E))

$$t_{f,\text{pr}} = 4,6 \cdot h_p - 25 \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 Tab. 5.4 (5.10)}$$

$$t_{f,\text{pr}} = 4,6 \cdot 12,5 - 25$$

$$t_{f,\text{pr}} = 32,5 \text{ min}$$

Die maximale Schutzzeit des Brandschutzsystems berechnet sich nach (7.97)

$$t_{\text{prot},\text{max},i} = \frac{t_{\text{prot},0,i}}{k_2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.97)}$$

Der Modifikationsfaktor k_2 berechnet sich nach Abschnitt 5.4.2.2 Tabelle 5.3, da die Dicke der Gipsplatte (h_p) \leq 50 mm ist.

$$t_{\text{prot,max},i} = \frac{t_{\text{prot},0,i}}{k_2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.97)}$$

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} \quad [-] \quad (5.3)$$

$$k_2 = 1 - \frac{12,5}{55}$$

$$k_2 = 0,773$$

Die maximale Schutzzeit berechnet sich dementsprechend zu:

$$t_{\text{prot,max},i} = \frac{20,59}{0,773} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.97)}$$

$$t_{\text{prot,max},i} = 26,64 \text{ min}$$

Die maximale Korrekturzeit berechnet sich nach 7.3.6 (6) zu:

$$\Delta t_{\text{max},i} = t_{\text{prot,max},i} - t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} \cdot k_{ji} \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.99)}$$

$$\Delta t_{\text{max},i} = 26,64 - 20,59 \cdot 0,54 \cdot 1,0 \cdot 0,8$$

$$\Delta t_{\text{max},i} = 17,75 \text{ min}$$

Die Korrekturzeit Δt_i berechnet sich also final zu

$$\Delta t_i = \frac{(t_{f,\text{pr}} - \sum_{k=1}^{i-1} t_{\text{prot},k}) \cdot \Delta t_{\text{max},i}}{t_{\text{prot,max},i}} \leq \Delta t_{\text{max},i} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 1 (7.95)}$$

$$\Delta t_i = \frac{(32,5 - 17,59) \cdot 17,75}{26,64} \leq 17,75$$

$$\Delta t_i = 9,93 \leq 17,75$$

Und ist somit erfüllt.

9.3.15 Überprüfen der Limits der Schutzzeit, da es sich um eine Dämmung mit PL 1 handelt:

Dämmstoffe, die in PL 1 einzuordnen sind, dürfen gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Abschnitt 7.3.2 (6) folgende Limits ihrer Schutzzeit nicht übersteigen.

$$\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} \leq t_{f,\text{pr}} + \frac{h_2}{0,11 \cdot t_{f,\text{pr}} + 1,3} \quad \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} \leq t_{f,\text{pr}} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.68)}$$

$$\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} \leq \sum t_{\text{prot},i-1} + \frac{h_2}{0,11 \cdot \sum t_{\text{prot},i-1} + 1,3} \quad \text{für } \sum t_{\text{prot},i-1} > t_{f,\text{pr}} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.68)}$$

mit

$\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k}$	[min]	Summe der Schutzzeiten der vor der betrachteten Dämmung liegenden Schichten und Schutzzeit der betrachteten Dämmschicht
$\sum t_{\text{prot},i-1}$	[min]	Summe der Schutzzeiten der vor der betrachteten Dämmung liegenden Schichten
h_2	[mm]	Dicke der betrachteten Schicht 2
$t_{f,\text{pr}}$	[min]	Versagenszeit des davorliegenden Brandschutzsystems

Bedingung von Gleichung (7.68) überprüfen:

$$\sum t_{\text{prot},i-1} \leq t_{f,\text{pr}} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 Bed. (7.68)}$$

$$17,59 \leq 32,5$$

⇒ Bedingung von Gleichung (7.68) erfüllt.

$$\sum_{k=1}^i t_{\text{prot},k} \leq t_{f,\text{pr}} + \frac{h_2}{0,11 \cdot t_{f,\text{pr}} + 1,3} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.68)}$$

$$34,43 \leq 32,5 + \frac{60 \text{ mm}}{0,11 \cdot 32,5 + 1,3}$$

$$34,43 \text{ min} \leq 44,81 \text{ min}$$

⇒ Limit der Summe der Schutzzeiten bis einschließlich der betrachteten Dämmschicht gemäß Gleichung (7.68) eingehalten.

9.3.16 Berechnung $t_{\text{ins},3}$ GKF

$$t_{\text{ins},3} = (t_{\text{ins},0,3} \cdot k_{\text{pos,exp},3} + \Delta t_3) \cdot k_{j,3} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.72)}$$

mit

$t_{\text{ins},3}$	[min]	Isolationszeit der betrachteten Schicht 3
$t_{\text{ins},0,3}$	[min]	Grundisolationszeit der betrachteten Schicht 3
$k_{\text{pos,exp},3}$	[-]	Positionskoeffizient zur Berücksichtigung des Einflusses der davorliegenden Schichten
Δt_3	[min]	Korrekturzeit der betrachteten Schicht 3
$k_{j,3}$	[-]	Fugenbeiwert der betrachteten Schicht 3

Die in der folgenden Gleichung eingetragenen Werte werden in den nachfolgenden Abschnitten hergeleitet.

$$t_{\text{ins},3} = (18,59 \text{ min} \cdot 0,59 + 0 \text{ min}) \cdot 1,0 \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.72)}$$

$$t_{\text{ins},3} = 10,97 \text{ min}$$

9.3.17 Berechnung der Grundisolationszeit $t_{\text{ins},0,3}$:

$$t_{\text{ins},0,3} = 24 \cdot \left(\frac{h_3}{15}\right)^{1,4} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.73)}$$

mit

$t_{\text{ins},0,3}$	[min]	Grundisolationszeit der betrachteten Schicht 3 nach prEN 1995-1-2 Tabelle 7.11
h_3	[mm]	Dicke der betrachteten Schicht 3

$$t_{ins,0,3} = 24 \cdot \left(\frac{12,5 \text{ mm}}{15}\right)^{1,4} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.73)}$$

$$t_{ins,0,3} = 18,59 \text{ min}$$

9.3.18 Berechnung des Positionskoeffizienten $k_{pos,exp,3}$:

Gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Abschnitt 7.3.4 (2) erfolgt die Berechnung von $k_{pos,exp}$ der letzten Schicht mit $t_{ins,0,3}$ statt $t_{prot,0,3}$.

$$k_{pos,exp,3} = \begin{cases} 1 - 0,6 \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{ins,0,3}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{ins,0,3}}{2} \\ 0,5 \sqrt{\frac{t_{ins,0,3}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \text{für } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{ins,0,3}}{2} \end{cases} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.80)}$$

mit

$t_{ins,0,3}$	[min]	Grundisolationszeit der betrachteten Schicht 3 nach prEN 1995-1-2 Tabelle 7.11
$\sum t_{prot,i-1}$	[min]	Summe der Schutzzeiten aller davorliegenden Schichten

Bedingung von Gleichung (7.80) überprüfen:

$$\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{ins,0,3}}{2} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 1. Bed. (7.80)}$$

$$t_{prot,1} + t_{prot,2} > \frac{t_{ins,0,3}}{2}$$

$$17,59 \text{ min} + 16,84 \text{ min} > \frac{18,59 \text{ min}}{2}$$

$$34,43 \text{ min} > 9,3 \text{ min}$$

⇒ Bedingung der zweiten Zeile von Gleichung (7.27) erfüllt

$$k_{pos,exp,3} = 0,5 \sqrt{\frac{t_{ins,0,3}}{\sum t_{prot,i-1}}} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.80)}$$

$$k_{pos,exp,3} = 0,5 \sqrt{\frac{18,59 \text{ min}}{34,43 \text{ min}}}$$

$$k_{pos,exp,3} = 0,37$$

Da die Schicht direkt hinter einem Hohlraum in Richtung des Wärmestroms liegt, soll der Positionsbeiwert mit 1,6 multipliziert werden.

$$k_{pos,exp,3} = 0,37 \cdot 1,6 = 0,59$$

9.3.19 Ermittlung des Fugenbeiwerts $k_{j,3}$:

Gemäß den Angaben des Bauteilaufbaus werden die Fugen der GKF gespachtelt und sind kleiner als 2 mm

Die Ermittlung des Fugenbeiwerts $k_{j,3}$ erfolgt nach prEN 1995-1-2:2020 (E), Tabelle 7.15. Für die betrachtete Schicht aus GKF ist $k_{j,3}$ gleich 1,0.

9.3.20 Gesamtergebnis

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad [\text{min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.54)}$$

$$t_{ins} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{ins,3}$$

$$t_{ins} = (17,59 + 16,84 + 10,97) \text{ min}$$

$$t_{ins} = 45,40 \text{ min}$$

Auf Basis der vorliegenden Berechnung darf die Konstruktion von der berechneten Seite nach prEN 1995-1-2:2020 (E) als **EI 45 Bauteil** klassifiziert werden.

9.3.21 Rechentool der TUM für den Raumabschluss Wandseite A

Um die Berechnung zu erleichtern, wurde ein Excel- Berechnungstool entwickelt, das eine automatisierte Berechnung ermöglicht. Entsprechend Abbildung 95 liefert das Tool identische Ergebnisse und zeigt, dass die Berechnungsmethode für den Raumabschluss für die praktische Anwendung automatisiert werden kann.

Abbildung 95: Rechenergebnis mit Tool - TUM



9.4 Tragfähigkeit der Wandseite A

9.4.1 Allgemeines

Für den Nachweis der Tragfähigkeit der betrachteten Wand ist der effektive Restquerschnitt der Holzständer zu ermitteln. Gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Abschnitt 7.2.1 (5) kann angenommen werden, dass die Tragfähigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des effektiven Restquerschnitts nicht reduziert werden müssen und entsprechend der Bemessung unter Normaltemperatur angesetzt werden können.

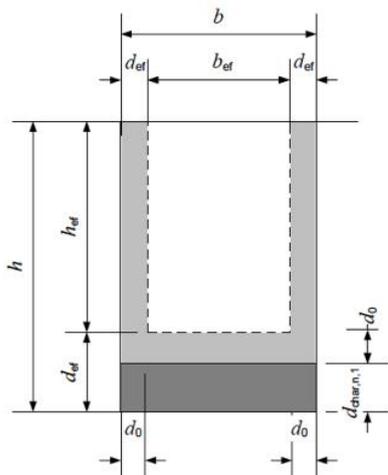
Im Gegensatz zur Berechnung des Raumabschlusses, für die eine Schutzzeit errechnet wird, muss bei der Tragfähigkeit zur Ermittlung des Restquerschnittes eine Branddauer, für die bemessen wird, eingegeben werden. Im Beispiel wird für eine Branddauer von 30 min bemessen, da der Raumabschluss auch nur 45 min erreicht und somit national maximal eine F 30-B Klassifikation möglich wäre.

Bei der Berechnung des Raumabschlusses besteht das Brandschutzsystem auf der feuerzugewandten Seite der Tragkonstruktion aus einer GKF mit einer Schutzzeit von $t_{prot} = 17,59 \text{ min}$.

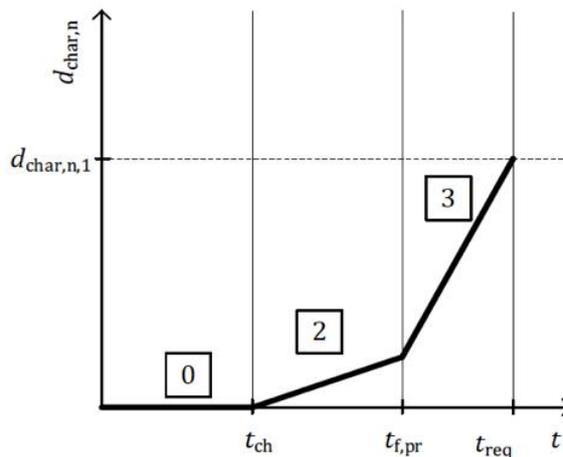
Werte für das Brandschutzsystem $\begin{cases} t_{ch} = 17,6 \text{ min} \\ t_f = 32,5 \text{ min} \end{cases}$

Die Ermittlung des effektiven Restquerschnitts erfolgt nach prEN 1995-1-2:2020 (E) Abschnitt 7.2.4 mit dem Berechnungsmodell für Gefache, die mit einem PL1 Dämmstoff gedämmt sind. Da bei einer Brandbeanspruchung des Holzquerschnitts mehrere Phasen des Abbrandes durchlaufen werden, ist der Zuwachs der Abbrandtiefe für jede stattfindende Phase einzeln zu ermitteln und anschließend zu addieren (vgl. Figure 7.6 (a) und (b)).

Abbildung 96: Bemessungsmodell für Holztafelelemente



(a) Effective cross-section for PL 1



(b) Phases for protection level PL 1

Da die Wand teildämmt ist, muss das Kriterium für die Teildämmung gemäß prEN 1995-1-2 7.2.4 (3) geprüft werden.

$$h_{ins} = \max \left\{ \begin{matrix} d_{char,n,1} + 50 \\ 100 \end{matrix} \right. \quad [\text{mm}]$$

Das Kriterium ist abhängig von der Branddauer und wird im Zuge des Nachweises geprüft. Wenn das Kriterium nicht eingehalten wird, muss ein Nachweis ohne Dämmung erfolgen.

9.4.2 Effektive Höhe des Restquerschnitts

$$h_{ef} = h - k_{side} \cdot d_{ef} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.21)}$$

$$d_{ef} = d_{char,n,1} + d_0 \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.22)}$$

mit

h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts
h	[mm]	Höhe des ursprünglichen Querschnitts
k_{side}	[-]	Anzahl der jeweils gegenüberliegenden Seiten, die dem Feuer ausgesetzt sind
d_{ef}	[mm]	Effektive Tiefe der Verkohlung
$d_{char,n,1}$	[mm]	Ideelle Abbrandtiefe auf der feuerzugewandten Seite
d_0	[mm]	Tiefe einer Schicht, bei der die Festigkeit und Steifigkeit zu null angenommen wird

Die in der folgenden Gleichung eingetragenen Werte werden in den nachfolgenden unterstrichenen Abschnitten hergeleitet.

$$d_{ef} = d_{char,n,1} + d_0 \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.22)}$$

$$d_{ef} = 9,92 \text{ mm} + 2 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = 11,92 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - k_{side} \cdot d_{ef} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.21)}$$

$$h_{ef} = 100 \text{ mm} - 1 \cdot 11,92 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = \mathbf{88,08 \text{ mm}}$$

$$b_{ef} = 60 \text{ mm} - 2 \cdot 2 \text{ mm} = 56 \text{ mm}$$

9.4.3 Abbrand Protection Phase:

$$d_{char,n,1,ph2} = \beta_{n,ph2,1} \cdot t_{ph2} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.25)}$$

mit

$d_{char,n,1,ph2}$	[mm]	Ideelle Abbrandtiefe der Phase 2 auf der feuerzugewandten Seite
$\beta_{n,p2,1}$	[mm/min]	Ideelle Abbrandrate während Phase 2 auf der feuerzugewandten Seite
t_{ph2}	[min]	Dauer der Phase 2

$$\beta_{n,ph2,1} = k_2 \cdot k_{s,n,1} \cdot \beta_0 \quad [\text{mm/min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.27)}$$

mit

$\beta_{n,ph2,1}$	[mm/min]	Ideelle Abbrandrate während Phase 2 auf der feuerzugewandten Seite
k_2	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des reduzierten Abbrands während die Bekleidung den Holzständer schützt
$k_{s,n,1}$	[-]	Querschnittsfaktor für die feuerzugewandte Seite
β_0	[mm/min]	Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung; (gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Tabelle 5.2)

Der Faktor k_2 für die feuerzugewandte Schmalseite des Holzquerschnitts ist abhängig von der vorhandenen Bekleidung und gemäß prEN 1995-1-2:2020 (E) Tabelle 5.3 zu berechnen.

$$k_2 = 1 - \frac{h_p}{55} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (Tabelle 5.3)}$$

mit

k_2	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des reduzierten Abbrands bis zum Abfall der Bekleidung
h_p	[mm]	Dicke der Gipsplatte

$$k_2 = 1 - \frac{12,5}{55} = 0,773 \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (5.3)}$$

$$k_{s,n,1} = \begin{cases} \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{21} + 3,6 & \text{für } b \leq 90 \text{ mm} \\ 1,25 & \text{für } b > 90 \text{ mm} \end{cases} \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.31)}$$

mit

$k_{s,n,1}$	[-]	Querschnittsfaktor für die feuerzugewandte Seite
b	[mm]	Breite der Balken; hier 60 mm

$$k_{s,n,1} = \left(\frac{60 \text{ mm}}{65}\right)^2 - \frac{60 \text{ mm}}{21} + 3,6 \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.31)}$$

$$k_{s,n,1} = \left(\frac{60 \text{ mm}}{65}\right)^2 - \frac{60 \text{ mm}}{21} + 3,6$$

$$k_{s,n,1} = 1,59$$

$$\beta_{n,ph2,1} = 0,773 \cdot 1,59 \cdot 0,65 \text{ mm/min} \quad [\text{mm/min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.27)}$$

$$\beta_{n,ph2,1} = 0,80 \text{ mm/min}$$

Mithilfe der berechneten Abbrandrate der geschützten Phase (Protection Phase) kann der hier entstehende Abbrand ermittelt werden.

$$d_{\text{char},n,1,\text{ph}2} = \beta_{n,\text{ph}2,1} \cdot t_{\text{ph}2} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.25)}$$

$$t_{\text{ph}2} = t_f - t_{\text{prot}} = 32,5 - 17,6 = 14,9 \text{ min}$$

Ausgehend von einer Branddauer von 30 min wird t_f nicht erreicht und somit kann der Abbrand folgendermaßen berechnet werden.

Prüfen des Kriteriums der Teildämmung gemäß prEN 1995-1-2 Abs. 7.2.4 (3)

$$h_{\text{ins}} = \max \left\{ \frac{d_{\text{char},n,1} + 50}{100} = 59,92 \text{ mm} \right\} \quad [\text{mm}]$$

$$t_{\text{ph}2} = \text{Branddauer} - t_{\text{prot}} = 30 - 17,6 = 12,4 \text{ min}$$

$$d_{\text{char},n,1,\text{ph}2} = \beta_{n,\text{ph}2,1} \cdot t_{\text{ph}2} = 0,80 \cdot 12,4 = 9,92 \text{ mm}$$

Es wird angenommen, dass das Kriterium für Dämmstoffe mit Protection Level 1 mit der Teildämmung von 60 mm erfüllt ist und der Nachweis der Tragfähigkeit wird exemplarisch geführt. Normalerweise müsste hier ein Nachweis ohne Dämmung durchgeführt werden. Das entspricht dem Ergebnis für Wandseite B.

9.4.4 Zero Strength Layer d_0

Der Zero Strength Layer d_0 ist für Holzrahmenbaukonstruktionen mit PL 1 Gefachdämmstoff nach (prEN 1995-1-2:2020 (E)) Abschnitt 7.2.4 (17) Tabelle 7.7 zu ermitteln.

$$d_0 = 3 - \frac{b}{10} + \frac{h}{20} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.41)}$$

mit

b [mm] Breite des ursprünglichen Querschnitts; hier 60 mm

h [mm] Höhe des ursprünglichen Querschnitts; hier 100 mm

$$d_0 = 3 - \frac{60 \text{ mm}}{10} + \frac{100 \text{ mm}}{20} = 2 \text{ mm} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.41)}$$

Für Holzrahmenbaukonstruktionen, die mit einem Dämmstoff PL 1 gedämmt sind, darf gemäß prEN 1995-1-2 (4th Draft) Abschn. 7.2.4 (18) der Wert für d_0 durch lineare Interpolation reduziert werden. Da die Dicke von $d_{0,\text{max}}$ mit 2 mm sehr gering ist, wir für die weitere Berechnung der konservative Wert $d_{0,\text{max}} = 2 \text{ mm}$ herangezogen und keine Interpolation durchgeführt.

9.4.5 Effektive Breite des Restquerschnitts

$$b_{\text{ef}} = b - 2 \cdot d_{\text{ef}} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.23)}$$

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n,2} + d_0 \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.24)}$$

mit

b_{ef} [mm] Effektive Breite des Restquerschnitts

b [mm] Breite des ursprünglichen Querschnitts

d_{ef} [mm] Effektive Tiefe der Verkohlung

$d_{\text{char},n,2}$ [mm] Ideelle seitliche Abbrandtiefe

d_0 [mm] Tiefe einer Schicht, bei der die Festigkeit und Steifigkeit zu null angenommen wird

Der betrachtete Holzquerschnitt des Balkentragwerks wird an seinen seitlichen Flächen durch einen Gefachdämmstoff mit PL 1 geschützt, weshalb die ideelle seitliche Abbrandtiefe $d_{\text{char},n,2}$ entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E) Figure 7.6 vernachlässigt werden kann. Die Werte für den Zero Strength Layer werden für

die effektive Höhe und Breite gleich ermittelt. Die Berechnung der folgenden Werte ist dem vorhergehenden Abschnitt zu entnehmen.

9.4.6 Last auf einen Ständer:

Die betrachtete Wand erfährt eine Last pro Ständer von 12 kN.

$$q_k = 2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 60\text{mm} \cdot 100\text{mm} \cdot 0,8 \text{ (maximale Auslastung 80 \%)} \quad [\text{kN}]$$

$$q_k = 12 \text{ kN}$$

9.4.7 Bemessungswert der Festigkeit im Brandfall

$$f_{c,0,d,fi} = k_\theta \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_{M,fi}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{prEN 1995-1-2 (4.1)}$$

mit

$f_{c,0,d,fi}$	[N/mm ²]	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung im Brandfall
k_θ	[-]	Temperaturabhängiger Reduktionsfaktor für lokale Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften; hier 1,0 gemäß prEN 1995-1-2 7.2.1 (5), da der effektive Querschnitt unter Normaltemperatur bemessen wird.
k_{fi}	[-]	Koeffizient für Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften im Brandfall; hier 1,25 gemäß prEN 1995-1-2 Tabelle 4.1
$f_{c,0,k}$	[N/mm ²]	Charakteristische Druckfestigkeit in Faserrichtung; hier 21 N/mm ² (C24) gemäß DIN EN 338 Tabelle 1
$\gamma_{M,fi}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffeigenschaften im Brandfall; hier 1,0 gemäß prEN 1995-1-2 Abschnitt 4.5 (1)

$$f_{c,0,d,fi} = 1,0 \cdot 1,25 \cdot \frac{21 \text{ N/mm}^2}{1,0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{prEN 1995-1-2 (4.1)}$$

$$f_{c,0,d,fi} = 26,25 \text{ N/mm}^2$$

9.4.8 Knicklänge

Gemäß prEN 1995-1-2 (4th Draft) 7.1.2 (4) darf die Knicklänge für das Knicken aus der Ebene reduziert werden, wenn die Wand am oberen und unteren Anschluss jeweils von einem horizontalen Bauteil gehalten wird.

$$l_y = l_{\text{wall}} \cdot 0,7 \quad [\text{mm}] \quad \text{pr.EN 1995-1-2 (7.1)}$$

mit

l_y	[mm]	Knicklänge für den Fall Knicken aus der Ebene
l_{wall}	[mm]	Länge des Bauteils; hier 3,00 m

$$l_{ef} = 3000 \text{ mm} \cdot 0,7 \quad [\text{mm}] \quad \text{pr.EN 1995-1-2 (7.1)}$$

$$l_{ef} = 2100 \text{ mm}$$

9.4.9 Vereinfachter Knicknachweis orthogonal zur Wandebene (gemäß Albert (2016), S. 9.28)

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{0,289 \cdot h_{ef}} \quad [-]$$

mit

λ	[-]	Schlankheit
l_{ef}	[mm]	Knicklänge; hier 2100 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 88 mm

$$\lambda = \frac{2100 \text{ mm}}{0,289 \cdot 88 \text{ mm}} \quad [-]$$

$$\lambda = 82,57$$

9.4.10 Ermittlung des Knickbeiwerts k_c nach Albert (2016) Tafel 9.29a für Nadelschnittholz C24 zu 0,425

$$\frac{F_{c,d,fi}}{b_{ef} \cdot h_{ef}} \leq k_c \cdot f_{c,0,d,fi} \quad [-]$$

mit

$F_{c,d,fi}$	[kN]	Bemessungswert der Druckkraft auf eine Stütze; hier 12,00 kN
b_{ef}	[mm]	Effektive Breite des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 56 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 88 mm
k_c	[-]	Knickbeiwert; hier 0,425
$f_{c,0,d,fi}$	[N/mm ²]	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung im Brandfall; hier 26,25 N/mm ²

$$\frac{12,00 \text{ kN}}{56 \text{ mm} \cdot 88 \text{ mm}} \leq 0,425 \cdot 26,25 \text{ N/mm}^2 \quad [-]$$

$$2,44 \text{ N/mm}^2 \leq 11,16 \text{ N/mm}^2$$

⇒ **Nachweis erfüllt 22 % Auslastung**

9.4.11 Nachweis ohne reduzierte Knicklänge

$$l_{ef} = l \cdot \beta \quad [\text{mm}]$$

mit

l_{ef}	[mm]	Knicklänge
l	[mm]	Länge des Bauteils; hier 3,00 m
β	[-]	Knicklängenbeiwert; hier 1,0 für Eulerfall 2

$$l_{ef} = 3000 \text{ mm} \cdot 1,0 \quad [\text{mm}]$$

$$l_{ef} = 3000 \text{ mm}$$

9.4.12 Vereinfachter Knicknachweis orthogonal zur Wandebene (gemäß Albert (2016), S. 9.28)

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{0,289 \cdot h_{ef}} \quad [-]$$

mit

λ	[-]	Schlankheit
l_{ef}	[mm]	Knicklänge; hier 3000 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 77,18 mm

$$\lambda = \frac{3000 \text{ mm}}{0,289 \cdot 88 \text{ mm}} \quad [-]$$

$$\lambda = 117,96$$

9.4.13 Ermittlung des Knickbeiwerts k_c nach Albert (2016) Tafel 9.29a für Nadelnschittholz C24 zu 0,223.

$$\frac{F_{c,d,fi}}{b_{ef} \cdot h_{ef}} \leq k_c \cdot f_{c,0,d,fi} \quad [-]$$

mit

$F_{c,d,fi}$	[kN]	Bemessungswert der Druckkraft auf eine Stütze; hier 12,00 kN
b_{ef}	[mm]	Effektive Breite des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 56 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 88 mm
k_c	[-]	Knickbeiwert; hier 0,173
$f_{c,0,d,fi}$	[N/mm ²]	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung im Brandfall; hier 26,25 N/mm ²

$$\frac{12,00 \text{ kN}}{56 \text{ mm} \cdot 88 \text{ mm}} \leq 0,223 \cdot 26,25 \text{ N/mm}^2 \quad [-]$$

$$2,44 \text{ N/mm}^2 \leq 5,85 \text{ N/mm}^2$$

⇒ Nachweis erfüllt 42 % Auslastung

9.5 Raumabschluss der Wand Seite B

9.5.1 Schichtaufbau

Tabelle 46: Nummerierung der Schichten von Beispielkonstruktion 1 bei Brandbeanspruchung

Schichten von innen nach außen		
Nr.	Stärke	Bezeichnung
1	12,5 mm	GKF
2	60 mm 40 mm	Steinwolle Hohlraum
3	12,5 mm	GKF

9.5.2 Berechnung mit Tool – TUM

⇒ 46,7 min

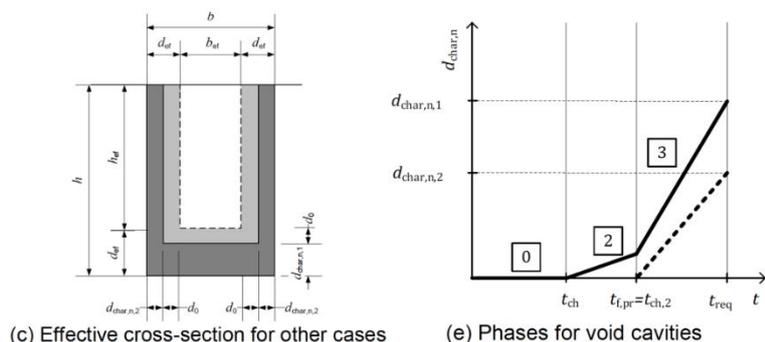
Abbildung 97: Rechenergebnis mit Tool - TUM

9.6 Tragfähigkeit der Wandseite B

9.6.1 Allgemeines

Der Nachweis erfolgt nach Abs. 7.2.4 und 7.3. Das Vorgehen ist analog, allerdings wird durch die Dämmung auf der feuerabgewandten Seite für die Tragfähigkeit von einem Hohlraum ausgegangen. Die Berechnung von $d_{char,n,2}$ erfolgt analog zum Vorgehen für Konstruktionen mit einem Hohlraum einer Dämmung PL3 entsprechend Abs. 7.2.4 (vgl. Figure 7.6 (c) und (e)).

Abbildung 98: Bemessungsmodell für Holztafelelemente



Der Beginn des seitlichen Abbrands $t_{ch,2}$ ist gleichgesetzt mit dem Zeitpunkt des Versagens der Bekleidung $t_{f,pr}$. Da $t_{f,pr} = 32,5 \text{ min} > t_{req} = 30 \text{ min}$ tritt während der angesetzten Feuerwiderstandsdauer von 30 min kein seitlicher Abbrand der Holzständer auf, weshalb die ideale seitliche Abbrandtiefe $d_{char,n,2}$ in der Berechnung vernachlässigt wird.

Werte für das Brandschutzsystem $\begin{cases} t_{ch} = 17,6 \text{ min} \\ t_f = 32,5 \text{ min} \end{cases}$

9.6.2 Berechnung des effektiven Restquerschnittes

Da $t_{req} = 30 \text{ min} \leq t_f = 32,5 \text{ min}$ wird nur die „protected charring phase (phase 2)“ relevant.

$$\beta_{n,ph2,1} = k_2 \cdot k_{s,n,1} \cdot \beta_0 = 0,773 \cdot 1,59 \cdot 0,65 = 0,80 \quad [\text{mm/min}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.27)}$$

$$k_2 = 1 - \frac{12,5}{55} = 0,773 \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (5.3)}$$

$$k_{s,n,1} = \left(\frac{b}{65}\right)^2 - \frac{b}{21} + 3,6 \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.31)}$$

$$k_{s,n,1} = \left(\frac{60 \text{ mm}}{65}\right)^2 - \frac{60 \text{ mm}}{21} + 3,6$$

$$k_{s,n,1} = 1,59 \quad [-] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.31)}$$

$$d_{char,n,1,ph2} = \beta_{n,ph2,1} \cdot t_{ph2} = 0,80 \cdot (30 - 17,6) = 9,92 \text{ mm} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 (7.25)}$$

Der Wert für d_0 ist entsprechend prEN 1995-1-2:2020 (E) Abs. 7.2.4 (20) entsprechend Tabelle 7.9 zu wählen. Für das Knicken aus der Ebene gilt Gleichung (7.49):

$$d_0 = 4 + \frac{b}{17} + \frac{h}{100} \quad [\text{mm}] \quad \text{prEN 1995-1-2 Tab. 7.9 (7.49)}$$

$$d_0 = 4 + \frac{60 \text{ mm}}{17} + \frac{100 \text{ mm}}{100} = 8,53 \text{ mm}$$

$$d_{ef,1} = 9,92 \text{ mm} + 8,53 \text{ mm} = 18,45 \text{ mm}$$

$$d_{ef,2} = d_0 = 8,53 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - k_{side} \cdot d_{ef,1} = 100 \text{ mm} - 1 \cdot 18,45 \text{ mm} = 81,55 \text{ mm} \approx 81 \text{ mm} \text{ (sichere Seite)}$$

$$b_{ef} = b - 2 \cdot d_{ef,2} = 60 \text{ mm} - 2 \cdot 8,53 \text{ mm} = 42,94 \text{ mm} \approx 43 \text{ mm}$$

9.6.3 Vereinfachter Knicknachweis orthogonal zur Wandebene (gemäß Albert (2016), S. 9.28)

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{0,289 \cdot h_{ef}} \quad [-]$$

mit

$$\lambda \quad [-] \quad \text{Schlankheit}$$

l_{ef}	[mm]	Knicklänge; hier 3000 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 81 mm

$$\lambda = \frac{3000 \text{ mm}}{0,289 \cdot 81 \text{ mm}} \quad [-]$$

$$\lambda = 128,16$$

9.6.4 Nachweis der Tragfähigkeit mit k_c nach Albert (2016) Tafel 9.29a für Nadelschnittholz C24 zu 0,195

$$\frac{F_{c,d,fi}}{b_{ef} \cdot h_{ef}} \leq k_c \cdot f_{c,0,d,fi} \quad [-]$$

mit

$F_{c,d,fi}$	[kN]	Bemessungswert der Druckkraft auf eine Stütze; hier 12,00 kN
b_{ef}	[mm]	Effektive Breite des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 41,9 mm
h_{ef}	[mm]	Effektive Höhe des Restquerschnitts für Knicknachweis orthogonal zur Wandebene; hier 77,18 mm
k_c	[-]	Knickbeiwert; hier 0,195
$f_{c,0,d,fi}$	[N/mm ²]	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung im Brandfall; hier 26,25 N/mm ²

$$\frac{12,00 \text{ kN}}{43 \text{ mm} \cdot 81 \text{ mm}} \leq 0,195 \cdot 26,25 \text{ N/mm}^2 \quad [-]$$

$$3,45 \text{ N/mm}^2 \leq 5,12 \text{ N/mm}^2$$

⇒ **Nachweis erfüllt 67 % Auslastung**

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im hier durchgeführten Forschungsvorhaben wurden experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zu brandbeanspruchten Holzbauteilen durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass das erweiterte Berechnungsmodell der prEN 1995-1-2, basierend auf Schleifer (2009) für Brandbeanspruchungen bis 120 Minuten angewendet werden kann und eine gute Grundlage zur Berechnung des Raumabschlusses darstellt. Mit zunehmender Branddauer nimmt die Sicherheit des Verfahrens zu. Das additive, auf Einzelschichten basierende Verfahren ermöglicht es, neue Materialien oder Bauteilschichten zu integrieren sowie bestehende Erkenntnisse zu Einzelschichten zu optimieren.

In diesem Vorhaben wurde die Bestimmungsgleichung für die Grundschutzzeit zu Gipsplatten angepasst und ein Modell für Holzwerkstoffplatten, basierend auf Abbrandraten, vorgeschlagen. Ergänzend hierzu wird das Berechnungsverfahren durch neue Bestimmungsgleichungen für Trittschalldämmstoffe und Estriche erweitert und ermöglicht eine Berechnung des Raumabschlusses sowie der Schutzwirkung für Decken bei einer Brandbeanspruchung von der Oberseite. Für Wände aus Brettsper Holz wurde ein optimierter, wirtschaftlicherer Bemessungsansatz, basierend auf dem Stufenmodell, analog zu Deckenbauteilen vorgestellt. Grundlagen der numerischen Simulation und der Optimierung von Materialparametern wurden in dem parallel zu diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Promotionsvorhabens (Rauch 2022) erarbeitet und ergänzen die experimentell ermittelten Ergebnisse und somit die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens. Dadurch konnten für die Praxis anwendbare Bestimmungsgleichungen erarbeitet werden, die die gegenwärtig vorhandenen Bemessungsansätze der prEN 1995-1-2:2020 (E) erweitern. Das Verfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit der prEN 1995-1-2 wird gegenwärtig noch überarbeitet. Der hier untersuchte Stand liefert sehr konservative Werte. Durch die angewandte Systematik (Abbrandmodell für den Holzständer) und die Erweiterung des Verfahrens für den Raumabschluss zur Berechnung des Beginns des Abbrandes, ist auch dieses Verfahren für 90 Minuten Brandbeanspruchung anwendbar.

Ergänzend hierzu lieferten experimentelle Untersuchungen neue Ergebnisse zur Berücksichtigung von Einbauteilen (Steckdosen) im Berechnungsverfahren bzw. hinsichtlich praktischer Anwendungsgrundsätze, wie Randabstände zu brennbaren Holzbauteilen. Die Ergebnisse des Vorhabens werden im Rahmen der Überarbeitung der prEN 1995-1-2 vorgestellt und sollen dazu beitragen, das dort enthaltende Modell für den Raumabschluss zu erweitern.

Die erarbeiteten Ergebnisse für Einzelbauteilschichten und den Raumabschluss bilden die Grundlage zur Bestimmung der Schutzwirkung von Bauteilschichten für dahinterliegende Schichten oder tragende Holzbauteile und somit auch zur Berechnung der Tragfähigkeit von Holztafel- und Holzmassivbauteilen. Die Methoden zur Berechnung der Tragfähigkeit können mit den im Vorhaben untersuchten Grundlagen zukünftig weiter optimiert werden. Die im Anhang dargestellten experimentellen Ergebnisse bieten auch für zukünftige Vorhaben eine Validierungsgrundlage für numerische oder rechnerische Verfahren sowie für die Auswertung der Schutzwirkung von Einzelschichten.

Zwischen den gemessenen Schutzzeiten von Bekleidungen und Dämmstoffen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen dem 1-m-Ofen und dem „Großversuch“ beobachtet. Untersuchungen zur Skalierung von Brandversuchen liegen nur in sehr begrenztem Umfang vor, weshalb in der Regel nur Versuche im Großmaßstab im bauaufsichtlichen Zulassungsprozess akzeptiert werden. Hier ist ein erhebliches wirtschaftliches Optimierungspotential vorhanden. Anstelle der experimentellen Untersuchungen bieten numerische Simulationen eine gute Untersuchungsmöglichkeit der feuerzugewandten Schichten für den Raumabschluss. Hierfür liegen Materialkennwerte vor und Möglichkeiten zur Bestimmung dieser Parameter wurden in dieser Arbeit vorgestellt, bzw. im Promotionsvorhaben optimiert. Um präzisere Ergebnisse zu erhalten, sind weiterführende Untersuchungen zum Versagen (Abfallen) von Einzelschichten erforderlich. Temperaturabhängige Last- Verformungskurven für Holz sollten überprüft werden, um zuverlässige Ergebnisse mittels numerischer Untersuchungen für die Tragfähigkeit zu erreichen.

In diesem Vorhaben wurden zahlreiche Versuchsergebnisse seitens der Industrie zur Verfügung gestellt und in einer Datenbank erfasst. Hier besteht aus Sicht der Autoren die Chance, diese Ergebnisse zukünftig anonymisiert zu erfassen und automatisiert mittels Methoden des Big Data- Management über Ansätze des maschinellen Lernens auswerten zu lassen.

11 Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Rauch, Michael, M. Sc. (Technische Universität München)

Dr.-Ing. Werther, Norman (Technische Universität München)

Suttner, Elisabeth, M. Sc. (Technische Universität München)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Winter, Stefan (Technische Universität München)

Weitere Mitwirkende

Badini, Lorenzo; Kaiser, Magdalena; Orth, Laura; Ross, Wolfgang (Technische Universität München)

Brogstter, Julian (Technische Universität München, BA)

Demandt, Michael; Distler Clara; Goth, Lea; Mändl, Michael (Technische Universität München, MA)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft BAU.

- Holzbau Deutschland-Institut e.V., Berlin
- Studiengemeinschaft Holzleimbau, Wuppertal
- Gump & Maier GmbH, Binswangen
- MFPA Leipzig
- Knauf Gips KG, Iphofen
- James Hardie Europe GmbH, Düsseldorf
- Saint-Gobain Rigips GmbH, Bodenwerder
- Egger Holzwerkstoffe Wismar GmbH & Co. KG
- Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Gladbeck
- Saint-Gobain Isover G+H AG, Ludwigshafen

Fachliche Betreuung

Dipl.-Ing. Steffen Kisseler

Brüggemann Kisseler Ingenieure im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“

Kurzbiographien



Michael Rauch, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion im Fachbereich Brandschutz der Technischen Universität München. Forschungstätigkeit im Bereich Brandschutz von Holzbauteilen und Holzgebäuden mit dem Schwerpunkt Leistungseigenschaften und Verwendbarkeit von Bauarten und Bauprodukten im Holzbau. Davor mehrjährige Tätigkeit als Bauingenieur im Ingenieurbüro Rauch GmbH mit Schwerpunkt Bau- und Projektleitung im Bereich Hochbau.



Elisabeth Suttner, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion im Fachbereich Brandschutz der Technischen Universität München. Forschungstätigkeit im Bereich Brandschutz von Holzbauteilen und Holzgebäuden mit dem Schwerpunkt Leistungseigenschaften und Verwendbarkeit von Bauarten und Bauprodukten im Holzbau. Mehrjährige Tätigkeit als Bauingenieurin im Ingenieurbüro FIRE & TIMBER .ING GmbH mit Schwerpunkt Brandschutzplanung im Bereich Hochbau und Holzbau.



Dr.-Ing. Norman Werther

Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München, Arbeitsgruppenleiter des Bereichs Brandschutz. Ehemals Prüflingenieur an der MFPA Leipzig im Bereich baulicher Brandschutz. Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Normungsgremien, wie z.B. zur Überarbeitung der Brandschutzbemessung von Holzbauteilen EN 1995-1-2



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Seit 2003 ist Prof. Winter Ordinarius für Holzbau und Baukonstruktion, derzeit Head of Department CEE an der School of Engineering and Design der TU München. Davor leitete er von 2000-2003 die Professur für Stahlbau und Holzbau der Universität Leipzig und hatte von 2009-2012 eine Finnish Distinguished Professorship an der Aalto Universität, Helsinki inne. Prof. Winter ist seit 2006 Prüflingenieur für Baustatik, Fachrichtung Holzbau und Mitglied zahlreicher nationaler und internationaler Normenausschüsse (u.a. DIN NA Bau, EC 5).

12 Verzeichnisse

12.1 Literaturverzeichnis

Albert, Andrej (Hg.) (2016): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Bundesanzeiger Verlag. 22. Auflage. Köln: Reguvis.

Albrecht, Philipp (2020): Untersuchung der Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit flächiger Holztafelbauelemente im Brandfall. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

DIN EN 338, 2016-06: Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.

Bauministerkonferenz (2004): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise. M-HFHolzR, vom 07.2004. Online verfügbar unter <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=759O986O991>, zuletzt geprüft am 13.11.2015.

Bauministerkonferenz (2020): Musterbauordnung. MBO, in der Fassung November 2002.

Bauministerkonferenz (2021): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise. MHolzBauRL, Ausgabe Juni 2021.

DIN 4102-2:1977-02: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 2: Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

DIN 4102-4:2016-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.

DIN 4102-8:2003-10: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand.

Brogstter, Julian (2020): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Mineralwollämmstoffen auf den Feuerwiderstand. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Deutsches Institut für Bautechnik (2015): Bauregelliste A, B und C, in der Fassung vom Februar 2015.

Distler, Clara (2021): Untersuchungen zum Abfallverhalten von Gipsplatten im Brandfall. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Ernstberger, Johannes (2020): Entwicklung von Validierungsbeispielen zur Bemessung von Holzkonstruktionen im Brandfall. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

DIN EN 1991-1-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

prEN 1995-1-2:2020 (E), 2020-05 2nd Draft: Eurocode 5 - Design of timber structures, Part 1-2: Structural fire design.

- prEN 1995-1-2:2020 (E), 2021-05 Final Draft: Eurocode 5 - Design of timber structures, Part 1-2: Structural fire design.
- DIN EN 1995-1-2:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- EN 1995-1-2/NA:2014, 2014-05: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall – Nationaler Anhang NA zu SN EN 1995-1-2:2004.
- DIN V ENV 1995-1-2:1994-05: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung.
- ÖNORM B 1995-1-2, 2011-09: Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1995-1-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
- DIN EN 1363-1:2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- DIN EN 1365-2:2015-02: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer; Deutsche Fassung EN 1365-2:2014.
- Frangi, Andrea; Angehrn, Christoph; Brühwilder, Ivan; Wiederkehr, Reinhard (2017): Bauteile in Holz. Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand. Zürich (Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.1).
- Frangi, Andrea; Angehrn, Christoph; Brühwilder, Ivan; Wiederkehr, Reinhard (2019): Feuerwiderstandsbemessung. Bauteile und Verbindungen. Zürich (Lignum-Dokumentation Brandschutz, 3.1).
- Frangi, Andrea; Brühwilder, Ivan; Studhalter, Jakob; Wiederkehr, Reinhard (2011): Feuerwiderstandsbemessung. Bauteile und Verbindungen. Zürich (Lignum-Dokumentation Brandschutz, 3.1).
- Goth, Lea (2021): Experimentelle und numerische Untersuchung zu Abbrandraten von Holzwerkstoffplatten. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Hafner, Anette; Schäfer, Sabrina; Krause, Karina; Rauch, Michael; Merk, Michael; Werther, Norman; Opitsch, Wolf (2017): Methodenentwicklung zur Beschreibung von Zielwerten zum Primärenergieaufwand und CO₂-Äquivalent von Baukonstruktionen zur Verknüpfung mit Grundstücksvergaben und Qualitätssicherung bis zur Entwurfsplanung. Ruhr Universität Bochum; Technische Universität München; Landeshauptstadt München. Bochum. Online verfügbar unter https://www.ruhr-uni-bochum.de/reb/mam/content/2016_dbu-abschlussbericht_az_31943-25_final_ge.pdf, zuletzt geprüft am 19.06.2018.
- Harmathy, T. Z. (1965): Ten rules of fire endurance rating. In: *Fire Technol* 1 (2), S. 93–102. DOI: 10.1007/BF02588479.

- Huber, Maximilian (2020): Analyse und Vergleich des Abbrandmodells für massive Holzquerschnitte mit der „Separating Function Method“. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Joas, Carla (2016): Numerische Beurteilung des Abbrandverhaltens. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Just, Alar (2010): Structural Fire Design of Timber Frame Assemblies Insulated by Glass Wool and Covered by Gypsum Plasterboards. Dissertation. Tallinn University of Technology, Tallinn.
- Kampmeier, Björn (2020): Verbundvorhaben: Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo-Dämmstoffe). Teilvorhaben Arbeitsbereich 1 „Brandschutz und Glimmverhalten“. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
- DIN EN 13501-2:2010-02: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.
- DIN EN 13501-2:2016-06: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2016.
- Klippel, Michael; Just, Alar (2018): Guidance on Fire design of CLT including best practise. Hg. v. COST FP1404. Zürich (N223-07).
- König, J.; Walleij, L. (2000): Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire exposure. Institutet för Träteknisk Forskning.
- König, Jürgen; Rydholm, D. (2003): Small-scale fire tests of heavy timber components. Institutet för Träteknisk Forskning. Stockholm (Trätek, Rapport P 0310036).
- Maeger, Katrin Nele (2016): Implementation of new materials to the component additive method for fire design of timber structures. Hg. v. SP Wood Technology. SP Technical Research Institute of Sweden (SP Report 2016:71).
- Maeger, Katrin Nele; Just, Alar; Frangi, Andrea (2018): Improvements to the Component Additive Method. Ulster University, Belfast, UK. SiF 2018– The 10th International Conference on Structures in Fire.
- Maeger, Katrin Nele; Just, Alar; Schmid, Joachim; Werther, Norman; Klippel, Michael; Brandon, Daniel; Frangi, Andrea (2019): Procedure for implementing new materials to the component additive method. In: *Fire Safety Journal* 107, S. 149–160. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.09.006.
- Mäger, Katrin Nele; Just, Alar; Frangi, Andrea (2018): Improvements to the Component Additive Method. Hg. v. Ulster University FireSERT. SiF 2018– The 10th International Conference on Structures in Fire. Belfast.

- Mändl, Michael (2019): Untersuchung des Beitrages von Fußbodenaufbauten zum Feuerwiderstand von Deckenkonstruktionen. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Norén, Joakim (1994): Additionsmetoden : beräkning av brandmotstånd hos avskiljande väggar = Addition method : calculation of fire resistance. Stockholm: Trättek.
- Östman, Birgit (2010): Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe. Unter Mitarbeit von Esko Mikkola, René Stein, Andrea Frangi, Jürgen König, Dhionis Dhima, Tuula Hakkarainen und Julie Bregulla. Science Technical Research Institute of Sweden. Schweden (SP Report, 19).
- DIN EN 13381-7:2019-06: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen – Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile; Deutsche Fassung EN 13381-7:2019.
- Rauch, Michael (2022): Beurteilung der raumabschließenden Funktion brandbeanspruchter Holzbauteile mittels einer „Component Additive Method“. Dissertation [noch nicht veröffentlicht]. Technische Universität München, München.
- Rauch, Michael; Morelli, Flavia; Werther, Norman; Just, Alar (2018): Evaluation of the Component Additive Method until 90 minutes fire exposure. In: Joachim Schmid (Hg.): Fire safe use of bio-based building products. Book of abstracts of the final conference COST FP 1404, Zürich, 1st and 2nd October 2018. Zürich: ETH - Eidgenössische Technische Hochschule, S. 87–90.
- Rauch, Michael; Suttner, Elisabeth; Werther, Norman (2019): Weiterentwicklung und Optimierung der brandschutztechnischen Bemessungsverfahren für raumabschliessende Holzbauteile. Hg. v. Technische Universität Braunschweig. Technische Universität Braunschweig.
- Rauch, Michael; Werther, Norman; Winter, Stefan (2020a): Feuerwiderstandsbemessung bis 90 Minuten – Jetzt auch mit Holz. In: *Holzbau – die neue Quadriga* 2020 (5), S. 20–26.
- Rauch, Michael; Werther, Norman; Winter, Stefan (2020b): FIRE DESIGN METHODS FOR TIMBER FLOOR ELEMENTS THE CONTRIBUTION OF SCREED FLOOR TOPPINGS TO THE FIRE RESISTANCE. In: *WCTE 20/21*. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1579052>.
- Scheer, Claus; Peter, Mandy (Hg.) (2009): Holz-Brandschutz-Handbuch. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. 3. Aufl. Berlin: Ernst (Informationsdienst Holz). Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3070184&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Schleifer, Vanessa (2009): Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. Institut für Baustatik und Konstruktion.
- Schleifer, Vanessa; Frangi, Andrea; Fontana, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Plattenelementen. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Institut für Baustatik und Konstruktion.

- Schmid, Joachim (Hg.) (2018): Fire safe use of bio-based building products. Book of abstracts of the final conference COST FP 1404, Zürich, 1st and 2nd October 2018. Zürich: ETH - Eidgenössische Technische Hochschule.
- Schmid, Joachim; Klippel, Michael; Fahrni, Reto; Frangi, Andrea; Tiso, Mattia; Just, Alar; Werther, Norman (2018): An improved model for the fire design of Cross Laminated Timber in bending. Konferenzbeitrag WCTE 2018. Hg. v. Konferenzbeitrag WCTE 2018.
- Studhalter, Jakob; Kolb, Josef; Weber, Heinz; Wiederkehr, Reinhard; Kammer, Peter (2010): Haustechnik. Installationen und Abschottungen. Zürich (Lignum-Dokumentation Brandschutz, 6.1).
- Suttner, Elisabeth; Rauch, Michael; Werther, Norman; Winter, Stefan (2019): Ganzheitlicher Feuerwiderstand für Konstruktionen in Holzbauweise. In: *Bautechnik* 96 (11), S. 815–823. DOI: 10.1002/bate.201900058.
- Suttner, Elisabeth; Werther, Norman (2019): Auch im Brandschutz eine Bank. In: *Holzbau – die neue Quadriga* 2019 (5), S. 15–19.
- Teibinger, Martin; Matzinger, Irmgard (2010): Grundlagen zur Bewertung von Holzkonstruktionen. Endbericht. Hg. v. Holzforschung Austria. Wien.
- TIMPuls (2022): Forschungsprojekt TIMPuls. Online verfügbar unter <https://www.bgu.tum.de/timpuls/startseite/>, zuletzt aktualisiert am 11.01.2022, zuletzt geprüft am 11.01.2022.
- Tiso, Mattia (2018): The Contribution of Cavity Insulations to the Load-Bearing Capacity of Timber Frame Assemblies Exposed to Fire. Dissertation. Tallinn University of Technology, Tallinn. Department of Civil Engineering and Architecture.
- Werther, Norman (2016): Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren, Technische Universität München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Winter, Stefan; Werther, Norman; Hofmann, Veronika; Kammerer, Elisabeth; Rauch, Michael (2019): Standardisierung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Holztafelkonstruktionen mit biogenen Dämmstoffen. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3101).
- Wörle, Viktoria (2019): Ganzheitliche Betrachtung der Abbrandrate von Holz und Holzwerkstoffen. Einflüsse, Rahmenbedingungen der Brandbeanspruchung und Vorgehen bei der Ermittlung. Masterarbeit. Technische Universität München. Forschungslaboratorium Holz, Holzforschung München.

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitstrahl - Rechenmethoden für die Ermittlung des Raumabschlusses	14
Abbildung 2: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Berechnung der Tragfähigkeit	14
Abbildung 3: Systematik – Modell des Abbrandes massiver Holzquerschnitte	15
Abbildung 4: Abbrandmodell ($t_{ch} = t_f$) nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)	16
Abbildung 5: Abbrandmodell ($t_{ch} < t_f$) nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)	16
Abbildung 6: Berechnung des Restquerschnitte nach DIN EN 1995-1-2:2012-12 (DIN EN 1995-1-2:2010-12)	17
Abbildung 7: Abbrandmodell für geschützte Querschnitte nach König und Walleij (2000)	18
Abbildung 8: Abbrandmodell für Holztafelbauelemente mit einer Gefachdämmung aus Glaswolle nach (Östman 2010)	18
Abbildung 9: Abbrandmodell für Holzquerschnitte in Holztafelbauteilen (prEN 1995-1-2:2020 (E))	19
Abbildung 10: Systematische Darstellung – Lagenweise Ermittlung der Schutzzeiten	20
Abbildung 11: Zeitstrahl - Rechenmethoden für die Ermittlung des Raumabschlusses – bisher existierende Methoden	21
Abbildung 12: Modellbeschreibung Bild 4.3 nach Schleifer (2009)	22
Abbildung 13: Systematische Bauteildarstellung als Grundlage für das additive Berechnungsverfahren entsprechend der Lignum Dokumentation in der Schweiz, basierend auf dem Verfahren nach Schleifer (2009).	22
Abbildung 14: Wand – Vergleich der Berechnungsverfahren nach DIN EN 1995-1-2:2010-12 (EC5) und Lignum	25
Abbildung 15: Vergleich der Schutzzeiten von Bekleidungsmaterialien nach Lignum	25
Abbildung 16: Vergleich von vorhandenen Prüfergebnissen (Rauch et al. 2019) mit den Berechnungsergebnissen und der daraus resultierenden Klassifikation (SFM = Separating-Function-Method, entspricht dem Verfahren nach Lignum)	25
Abbildung 17: Validierungsbeispiele für die Tragfähigkeit nach Ernstberger (2020)	26
Abbildung 18: Vergleich der Isolationszeit aus den Berechnungsmodellen mit den Versuchsergebnissen, Berechnung auf Basis des Lignum- Verfahrens (Lignum) im Vergleich zur prEN 1995-1-2 (Final Draft) aller Versuche.	27
Abbildung 19: Vergleich der Isolationszeit mit Versuchsergebnissen von auf Raumabschluss versagenden Konstruktionen und Einfluss der Begrenzung der Schutzzeit für Dämmstoffe (PL).	28
Abbildung 20: Vergleich der Rechenmethoden anhand von Einzelschichten nach (Rauch et al. 2018)	30
Abbildung 21: Systemskizze -Teil 8 - Ofen	34
Abbildung 22: Prüfaufbau - Teil 8 - Ofen	34
Abbildung 23: Systemskizze - 1 m x 1 m Wand / Decke	34
Abbildung 24: Brandprüfung - 1 m x 1 m Wand / Decke	34
Abbildung 25: Systemskizze Brandversuch 3 m x 3 m	34
Abbildung 26: Brandversuch 3 m x 3 m	34
Abbildung 27: Systemschnitt Versuch	35

Abbildung 28: PK ZF- groß	35
Abbildung 29: PK ZF, SW- klein	35
Abbildung 30: PK ZF – Teil 8	35
Abbildung 31: Übersicht der geprüften Konstruktionen	36
Abbildung 32: 3-m Wand ZF/SW kurz vor dem E-Versagen	37
Abbildung 33: Kleinbrandversuch (1-m) Wand und Decke nach dem E-Versagen	37
Abbildung 34: Teil-8 Versuch (ca. 50 cm x 50 cm) ZF nach dem I und kurz vor dem E-Versagen	37
Abbildung 35: Versagenszeiten der jeweils maßgebenden Konstruktionsschichten der betrachteten Aufbauten	38
Abbildung 36: Systematische Darstellung der Teil- 8 Prüfung der Holzwerkstoffplatten (Goth 2021)	40
Abbildung 37: Stufenfalz der einlagigen Holzwerkstoffplatte (Goth 2021)	40
Abbildung 38: Thermoelemente zwischen den Holzwerkstoffplatten (Goth 2021)	40
Abbildung 39: Kleinprüfstand nach DIN 4102-8 an der MFPA Leipzig	41
Abbildung 40: Prüfkörper 1 nach dem Einbau in den Brandprüfofen (Goth 2021)	41
Abbildung 41: Einflussfaktoren auf das mechanische Versagen/Abfallen von Bekleidungssystemen mit Gipsplatten	43
Abbildung 42: Einflussfaktoren auf das Versagen von Bekleidungssystemen und zugeordnete Versuchskonfiguration bzw. Ofengröße mit Bezug auf den Referenzversuch	44
Abbildung 43: Schnittdarstellung der Referenzdecke: Holztafelbau / Brettsperrholz, Bekleidet mit 18 mm GKF	46
Abbildung 44: Ansicht feuerabgewandt des Probekörpers der Referenzdecke: Holztafelbau / Brettsperrholz, bekleidet mit 18 mm GKF	47
Abbildung 45: Ansicht feuerzugewandt / aus dem inneren des Brandofens: Holztafelbau / Brettsperrholz, bekleidet mit 18 mm GKF	47
Abbildung 46: Systematische Darstellung der Holztafelbauwand / -decke (HTB), bekleidet mit 18 mm GKF - Ansicht	47
Abbildung 47: Systematische Darstellung der Holztafelbauwand / -decke (HTB), bekleidet mit 18 mm GKF - Schnitt	48
Abbildung 48: Systematische Darstellung der Holzmassivwand / -decke (BSP), bekleidet mit 18 mm GKF - Ansicht	48
Abbildung 49: Systematische Darstellung der Holzmassivwand / -decke (BSP), bekleidet mit 18 mm GKF - Schnitt	49
Abbildung 50: Prüfung der HTB-Elemente im 1-m- Ofen	49
Abbildung 51: Prüfung der BSP-Elemente im 1-m- Ofen	49
Abbildung 52: Versagen der Gipsplatte der Referenzdecke, hinterlegt mit Dämmung in der 46. Prüfminute (Distler 2021)	50
Abbildung 53: Versagen der Gipsplatte der Referenzdecke, auf Brettsperrholz in der 58. Prüfminute (Distler 2021)	50

Abbildung 54: Referenzdecke- HTB nach dem Brandversuch. Randgefach mit intakter Spanplatte hinter der Dämmlage	50
Abbildung 55: Referenzdecke BSP nach dem Brandversuch mit Holzkohleschicht und teilweise abgelöster erster Brettlage.	50
Abbildung 56: Versagen der Gipsplatte in der 46. Prüfminute in V2-D-1m-HTB-18 mm GKF	50
Abbildung 57: Versagen der Gipsplatte in der 77.-79. Prüfminute in V2-W-1m-HTB-18 mm GKF	50
Abbildung 58: Versagen der Decke in der 93. Prüfminute in V2-D-1m-HTB-18 mm GKF (Durchbrand in der Stoßfuge)	51
Abbildung 59: Wandkonstruktion nach der Prüfung in V2-W-1m-HTB-18 mm GKF und im Gefach vorhandener Dämmung	51
Abbildung 60: Systematischer Schnitt und Darstellung des Teil-8 Probekörpers für Estrichaufbauten nach (Mändl 2019)	53
Abbildung 61: Systematischer Schnitt und Darstellung des Teil-8 Probekörpers für Trittschalldämmstoffe nach (Brogsitter 2020)	53
Abbildung 62: <i>Einbauteile V1</i>	55
Abbildung 63: <i>Einbauteile V2</i>	56
Abbildung 64: <i>Einbauteile V3a</i>	56
Abbildung 65: <i>Einbauteile V3b</i>	56
Abbildung 66: <i>Einbauteile V4a</i>	56
Abbildung 67: <i>Einbauteile V4b</i>	57
Abbildung 68: Versagen der Wand mit dem Einbauteil auf der feuerabgewandten Seite (V2)	57
Abbildung 69: Gipskasten nach dem Versuch mit Bekleidung (V4a)	57
Abbildung 70: Ungleichmäßiger Abbrand (rechte	57
Abbildung 71: Gipskasten nach dem Versuch mit demontierter Bekleidung (V4b)	57
Abbildung 72: Exemplarischer Temperaturverlauf in Anlehnung an Rauch (2022) durch ein Bauteil zum Zeitpunkt $t = 30$ min mit beidseitiger GKF- Bekleidung feuerabgewandt und feuerzugewandt sowie einer Gefachdämmung aus Steinwolle (Der Temperaturverlauf wurde exemplarisch ohne ein Abfallen von Schichten dargestellt).	62
Abbildung 73: Systematische Abbildung des Simulationsmodells zur Berechnung der Tragfähigkeit	63
Abbildung 74: Beispielhafter Versuch zur Untersuchung der Versagenszeit von Dämmstoffen (Rauch 2022)	66
Abbildung 75: Probekörperückseite, Thermolemente hinter 15 mm MDF-Platte mit Hinterlegung in der Stoßfuge.	68
Abbildung 76: Brandversuch – 15 mm MDF-Platte am Wandbauteil nach 19 min Brandbeanspruchung	68
Abbildung 77: Vergleich der Berechnungsergebnisse für t_{ch} und t_{prot} mit den Versuchswerten der Datenbank (vgl. Abs. 3.2) für Gipsplatten (Rauch 2022)	71
Abbildung 78: Auswirkung von Grundschutz- und Versagenszeiten der feuerzugewandten Gipsbekleidung auf den Gesamtisoliationszeit (t_{ns}) der Konstruktion	72

Abbildung 79: Vorliegende Versuchsergebnisse sowie Vergleich mit den Schutzzeiten nach Schleifer abhängig von der Rohdichte der Dämmung und der Dicke im Anwendungsbereiche für Mineralwolle nach DIN 4108-10 (Brogsitter 2020)	73
Abbildung 80: Vergleich der Versuche mit den Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung der Materialparameter nach Schleifer (Rauch 2022)	74
Abbildung 81: Vergleich der Bestimmungsgleichungen für hohe Rohdichten von Mineralwolldämmstoffen (Rauch 2022)	74
Abbildung 82: Temperaturverlauf hinter den Estrichen und Darstellung der Schutzzeit (Test 270 °C entspricht der Zeit bis zum Erreichen von 270°C)	75
Abbildung 83: Temperaturverlauf hinter den Estrichen – hinterlegt mit Steinwolldämmung und Darstellung der Schutzzeit (Test 270 °C entspricht der Zeit bis zum Erreichen von 270°C)	75
Abbildung 84: Temperaturverlauf hinter der Steinwollgedämmung – hinterlegt mit Estrich und Darstellung der Schutzzeit (Test 270°C - Zeit bis zum Erreichen von 270°C)	75
Abbildung 85: Vergleich zwischen Bestimmungsgleichung (EQ), Simulation (FEM) und Versuchsergebnissen (Test) von Zement (CT)- und Calciumsulfatestrichen.	75
Abbildung 86: Vergleich t_{ins} in Abhängigkeit der Vorerwärmung zwischen Simulation und analytischen Ansatz von GKF- Platten hinter Dämmstoffen	77
Abbildung 87: Vergleich t_{ins} von GKF- Platten hinter Holzwerkstoffplatten	77
Abbildung 88: Vergleich der Isolationszeiten (t_{ins}) nach der SFM und dem Abbrandmodell (Rauch 2022)	78
Abbildung 89: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt ohne die Berücksichtigung des Versagens von Einzellamellen (z.B. Vollholzquerschnitt) → linearer Ansatz	79
Abbildung 90: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt unter Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. BSP- Decke) → Stufenmodell	79
Abbildung 91: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperholz-elemente mit 20 mm dicken Einzellagen	80
Abbildung 92: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,3$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP- Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettsperholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen	80
Abbildung 93: Vergleich zwischen dem Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) unterschiedlicher Versuchsdaten von Brettsperholzelementen	81
Abbildung 94: Untersuchungen zu Einbauteilen in Holztafelbauelementen	82
Abbildung 95: Rechenergebnis mit Tool - TUM	96
Abbildung 96: Bemessungsmodell für Holztafelelemente	97
Abbildung 97: Rechenergebnis mit Tool - TUM	103
Abbildung 98: Bemessungsmodell für Holztafelelemente	104

12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebäudeklassen in Deutschland	11
Tabelle 2: Grundlagen der Berechnungsmodelle zum Nachweis des Feuerwiderstandes von Holzkonstruktionen	13
Tabelle 3: Protection Level (PL) der Dämmstoffe nach (Tiso 2018)	19
Tabelle 4: Vergleich der Berechnungsverfahren für den Raumabschluss	24
Tabelle 5: Untersuchungsziele der experimentellen Versuche	35
Tabelle 6: Versagenszeiten der jeweils maßgebenden Konstruktion	37
Tabelle 7: Prüfkörper und Materialkennwerte der geprüften Holzwerkstoffplatten	41
Tabelle 8: Versuchsergebnis – Schutzzeiten	42
Tabelle 9: Versuchsergebnis: Abbrandraten rückgerechnet aus dem 300 °C Kriterium	42
Tabelle 10: Versuchskonfigurationen	45
Tabelle 11: Versuchsergebnisse der Untersuchungen zum Wärmedurchgang und zur Abfallzeit von Gipsplatten	51
Tabelle 12: Experimentelle Untersuchungen der Estrichaufbauten und Versagenszeiten	54
Tabelle 13: Experimentelle Untersuchungen der Estrichaufbauten und Versagenszeiten	54
Tabelle 14: Darstellung der durchgeführten Versuche zu Einbauteilen (Rauch 2022)	55
Tabelle 15: Versagenszeiten der durchgeführten Untersuchungen	58
Tabelle 16: Werte für die Emissivität von Bauteiloberflächen	59
Tabelle 17: Werte für den Wärmeübergang von Bauteiloberflächen	59
Tabelle 18: Modifizierte Eingangswerte für Holz und Holzwerkstoffe ursprünglich basierend auf den Materialparametern nach DIN EN 1995-1-2:2010-12. Die fett dargestellten Werte zeigen die Abweichung von den normativen Werten.	60
Tabelle 19: Materialkennwerte für Gipsplatten und Gipsfaserplatten nach Schleifer (Schleifer 2009) und optimierter Wärmeleitfähigkeit auf Massivholz / Holzwerkstoffplatten nach Rauch (2022)	60
Tabelle 20: Materialkennwerte für Dämmstoffe aus Steinwolle nach Schleifer (2009)	61
Tabelle 21: Materialkennwerte für Dämmstoffe aus Glaswolle nach Schleifer (Schleifer 2009) sowie mit modifizierter Rohdichte für hohe Temperaturen (Rauch 2022)	61
Tabelle 22: Materialkennwerte für Zementestriche, abgeleitet durch Mändl (2019) und Rauch (2022) auf Basis der Versuche entsprechend Anhang A9	61
Tabelle 23: Materialkennwerte für Calciumsulfatestriche, abgeleitet durch (Mändl 2019) auf Basis der Versuche entsprechend Anhang A9	61
Tabelle 24: Versagensmechanismen von Dämmstoffen (Rauch 2022)	64
Tabelle 25: Experimentell ermittelte Versagenszeiten für das Berechnungsmodell zur Beurteilung des Versagens von Dämmstoffen	65
Tabelle 26: Bemessungswerte der Abbrandraten (DIN EN 1995-1-2:2010-12)	66
Tabelle 27: Grundsutzzeiten/ Grundisolationszeiten für Holzwerkstoffplatten nach Schleifer (2009)	67
Tabelle 28: Zeitdifferenz zwischen $t_{= 270\text{ °C}}$ und $t_{= 300\text{ °C}}$	68

Tabelle 29: Unterscheidung zwischen Durchbrand und Abbrand (Rauch 2022)	69
Tabelle 30: Neue, homogenisierte Abbrandraten für Holzwerkstoffe	69
Tabelle 31: Vergleich der Schutzzeiten unterschiedlicher normativer Grundlagen	70
Tabelle 32: Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	71
Tabelle 33: Grundschutzzeit und Grundisolationszeit für mineralische Dämmstoffe aus Steinwolle nach Rauch (2022)	74
Tabelle 34: $k_{\text{pos,exp}}$ von Estrichelementen auf Trittschalldämmung	76
Tabelle 35: k_2 für Materialien hinter Estrichen	76
Tabelle 36: Δt der Trittschalldämmung	76
Tabelle 37: Schutzzeiten [min] von Estrichen auf Trittschalldämmung oder Holzwerkstoffplatten – Schutzzeit des Gesamtaufbaus	77
Tabelle 38: Abbrandraten β_n entsprechend der verschiedenen Abbrandphasen	79
Tabelle 39: Abbrandtiefe β_n für Phase 1 nach Abbildung 87	79
Tabelle 40: Bestimmungsgleichungen für Grundschutzzeit $t_{\text{prot},0,i}$ und Grundisolationszeit $t_{\text{ins},0}$	84
Tabelle 41: Angepasste Positionsbeiwerte $k_{\text{pos,exp}}$ und $k_{\text{pos,unexp}}$ für Estriche	85
Tabelle 42: Angepasste k_2 -Faktoren für Gipsplatten	85
Tabelle 43: Angepasste β_n -Werte für ungeschützte Brettsperrholzwände und Decken (ohne „Bond Line Integrity“)	86
Tabelle 44: Wandkonstruktion, Last-Ausnutzung: 0,8, Last pro Ständer: 12 kN	88
Tabelle 45: Nummerierung der Schichten von Beispielkonstruktion 1 bei Brandbeanspruchung	89
Tabelle 46: Nummerierung der Schichten von Beispielkonstruktion 1 bei Brandbeanspruchung	103

Anlagen Bauteilprüfungen

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (Anlage A1 bis A 21) stehen unter: <https://www.cee.ed.tum.de/hbb/forschung/abgeschlossene-forschungsprojekte/> zum Download zur Verfügung.

- A.1 Teil 8 Wandausschnitt - Steinwolle und Zellulosefaser**
- A.2 Teil 8 Wandausschnitt - Glaswolle und Holzfaser**
- A.3 1-m Wand- /Deckenausschnitt Steinwolle / Zelluloseeinblasdämmstoff**
- A.4 1-m Wand- /Deckenausschnitt Glaswolle / Holzfaser**
- A.5 3-m Wand Steinwolle / Zelluloseeinblasdämmstoff**
- A.6 3-m Wand Glaswolle / Holzfaser**
- A.7 1-m Wand mit Einbauteilen feuerzugewandt**
- A.8 1-m Wand mit Einbauteil feuerzugewandt und feuerabgewandt**
- A.9 Fußbodenaufbauten und Estrich**
- A.10 Durchwärmung von Steinwollendämmstoffen mit hohen Rohdichten**
- A.11 Schutz- und Versagenszeiten von Gipsplatten (Decke)**
- A.12 Schutz- und Versagenszeiten von Gipsplatten 12,5 mm HTB -1-m- Versuch**
- A.13 Schutz- und Versagenszeiten von Gipsplatten 12,5 mm BSP - 1-m- Versuch**
- A.14 Schutz- und Versagenszeiten von Gipsplatten 18 mm HTB - 1-m- Versuch**
- A.15 Schutz- und Versagenszeiten von Gipsplatten 18 mm BSP - 1-m- Versuch**
- A.16 bis A.19 Prüfergebnisse – Abbrandverhalten von Holzwerkstoffplatten**
- A.20 bis A.21 Prüfergebnisse – Einbauteile – Teil 8- Versuche**