

Rechnerische Brandschutzbemessung von Holzbauteilen. Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand: Projekt «FREI 90»

Michael Rauch
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Norman Werther
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
München, Deutschland



Rechnerische Brandschutzbemessung von Holzbauteilen. Berechnungsmethoden bis 90 Minuten Feuerwiderstand

1. Einführung und Hintergrund

Dieser Beitrag basiert auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens «F-REI 90 - Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten» [1], gefördert durch die Forschungsförderung Zukunft Bau.

Ein gesteigertes ökologisches Bewusstsein, verbunden mit den Vorteilen der Holzbauweise und der geforderten Verdichtung 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 an Querschnittsgröße, Festigkeit und Steifigkeit verliert – das gilt genauso für andere Baustoffe - und andererseits im ungeschützten Zustand einen zusätzlichen Beitrag zur Branddynamik 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 [2] in München, zeigen deutlich die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Holz. Gegenwärtige Entwicklungen im Baurecht ermöglichen u.a. durch die Novellierung der Bauordnungen und die Veröffentlichung der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) [3] 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 Ver- 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 eine geforderte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten für tragende und raumabschließende Wand und Deckenelemente sowie die Leistungseigenschaft von Bekleidungsmaterialien oder biogenen Dämmstoffen umfassend nachzuweisen. Tabellierte Bauteilaufbauten 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.

2. Grundlagen

2.1. Baurechtliche Grundlagen

Parallel zur Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens fand eine ständige Weiterentwicklung des Baurechts statt. Während zu Beginn des Forschungsprojektes nur in einzelnen Bundesländern, wie beispielsweise Baden-Württemberg, Berlin oder Hamburg, die Bauordnungen den mehrgeschossigen Holzbau bis zur Hochhausgrenze ermöglichten, wurde inzwischen die Musterbauordnung [4] angepasst. Hochfeuerhemmende Bauteile mit tragenden und aussteifenden Teilen aus brennbaren Baustoffen waren ursprünglich nur mit einer allseitig brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung möglich. Für feuerbeständige Bauteile wurde neben der Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten auch die Nichtbrennbarkeit der Baustoffe gefordert. Mehrgeschossiger Holzbau in Gebäudeklasse 5 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.“ [4].

Als Technische Baubestimmung wurde die M-HFHolzR [5] weiterentwickelt und in eine neue Richtlinie, die „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise“ (MHolzbaURL) [3] überführt.

Somit können zukünftig Gebäude in Gebäudeklasse vier und fünf in Holzbauweise inklusive eines Anteiles sichtbarer Holzoberflächen ohne eine Abweichung vom präskriptiven Bau-recht realisiert werden. Für diesen neuen Anwendungsbereich sind Nachweismethoden erforderlich.

2.2. Bestehende Berechnungsmethoden

Nachfolgende Abbildungen zeigen die zeitliche Entwicklung der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer für den Raumabschluss (vgl. Abbildung 1) sowie der Tragfähigkeit (vgl. Abbildung 2) für Wand- und Deckenbauteile in Holzbauweise.

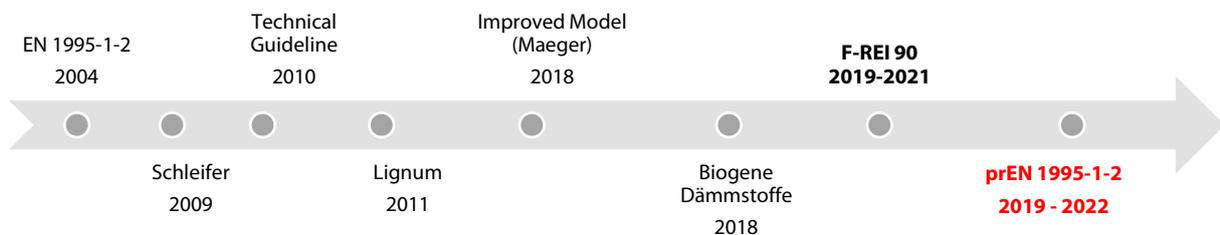


Abbildung 1: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Ermittlung des Raumabschlusses von Holzbauteilen im Brandfall

Während im deutschen Raum Verfahren zur Berechnung des Raumabschlusses nur selten praktisch angewandt werden – hier wird in der Regel auf herstellerspezifische Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweise zurückgegriffen – sind rechnerische Methoden zum Nachweis der Tragfähigkeit in der Praxis üblich.

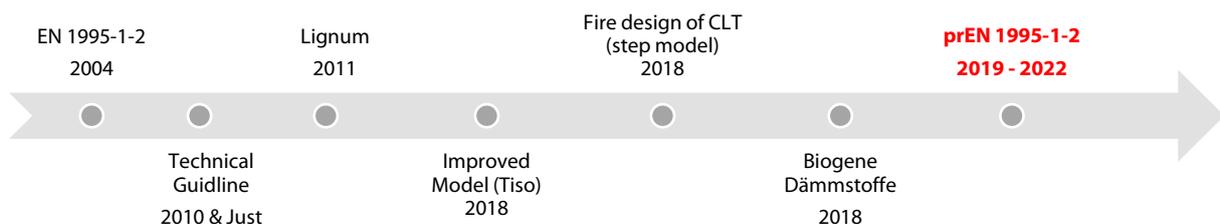


Abbildung 2: Zeitstrahl - Rechenmethoden zur Berechnung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen im Brandfall

Die Ursache für die unterschiedliche Herangehensweise liegt an der Verantwortung hinsichtlich der Nachweisführung. Während der Nachweis der Tragfähigkeit durch den Tragwerksplaner erbracht wird, stellt sich hinsichtlich des Raumabschlusses die Frage der Nachweisverantwortung. Einerseits liegt die Zuständigkeit für die Definition der Beanspruchung (hier die Brandbeanspruchung), somit auch für die Unterscheidung, ob eine einseitige oder mehrseitige Brandbeanspruchung vorliegt, im Verantwortungsbereich des Tragwerksplaners. Der Architekt entwickelt die Details im Zuge der Ausführungsplanung. Konstruktive Maßnahmen (wie z.B. die Lage der Abdichtungsmaßnahmen zur Begrenzung des Rauchdurchtritts im Anschlussbereich) sind ein Teil der Detailplanung und werden, da sie die tragenden Bauteile nicht direkt betreffen, nicht durch den Tragwerksplaner nachgewiesen. Hinsichtlich der Verantwortlichkeit für den Nachweis des Raumabschlusses der flächigen Bauteile gibt es keine eindeutige Regelung. Dennoch muss der Nachweis erbracht

werden. Die konstruktive Umsetzung der im Nachweis ermittelten Vorgaben zu Querschnitten, Bekleidungslagen und Fugen bzw. notwendigen Maßnahmen zur Erfüllung des Raumabschlusses sind im Zuge der Ausführungsplanung und späteren Ausführung umzusetzen.

Während in Deutschland die DIN EN 1995-1-2:2010-12 [6] als eingeführte technische Baubestimmung den einzigen rechnerischen Anwendbarkeitsnachweis für die Brandbemessung darstellt, hat sich in der Schweiz und in Österreich das Verfahren nach «Schleifer» [7] durchgesetzt. Im additiven Verfahren werden die Schutzzeiten (t_{prot}) der Einzelschichten (Zeitpunkt bis zu einer Temperaturerhöhung von jeweils 250 K) bzw. auf der feuerabgewandten Seite die Isolationszeiten (t_{ins}), dem Zeitpunkt bis zum Erreichen von 140 K Temperaturerhöhung, addiert und somit die Isolationszeit der Konstruktion ermittelt (vgl. Abbildung 3). Der Einfluss davor- bzw. dahinterliegender Schichten wird durch Positionsbeiwerte ermittelt.

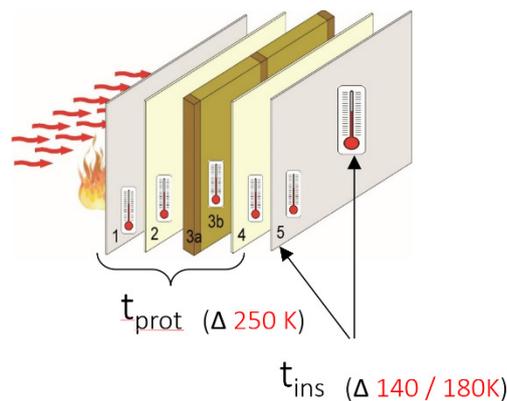


Abbildung 3: Systematische Bauteildarstellung als Grundlage für das additive Berechnungsverfahren basierend auf dem Verfahren nach Schleifer [7].

$$t_{\text{ins}} = \sum t_{\text{prot},i-1} + t_{\text{ins},i} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$t_{\text{prot},i} = (t_{\text{prot},0,i} \cdot k_{\text{pos,exp},i} \cdot k_{\text{pos,unexp},i} + \Delta t) \cdot k_{j,i} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

t_{ins}	[min]	Isolationszeit der Konstruktion
$t_{\text{prot},0}$	[min]	Grundschutzzeit einer Schicht
$t_{\text{prot},i}$	[min]	Schutzzeit der Schicht i unter Berücksichtigung der Positionsbeiwerte und des Fugenbeiwertes
$k_{\text{pos,exp}}$	[-]	Positionsbeiwert feuerzugewandt
$k_{\text{pos,unexp}}$	[-]	Positionsbeiwert feuerabgewandt
Δt	[min]	Faktor zur Berücksichtigung der Schutzwirkung über die Schutzzeit hinaus
k_j	[-]	Fugenbeiwert

In der Weiterentwicklung nach Mäger [8] wird die schützende Wirkung von brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen wie z.B. Gipsplatten, die dahinterliegende Bauteilschichten auch nach dem Erreichen von 250 K Temperaturerhöhung schützen, bis zum Versagen bzw. Abfallen dieser Schichten als externer Einflussparameter Δt mitberücksichtigt. Ergänzend werden die Schutzzeiten für Dämmstoffe begrenzt. Das Verfahren nach Schleifer mit den Erweiterungen nach Mäger bildet die Grundlage für die Separation Function Method (SFM) der prEN 1995-1-2 [9]. Da die Schutzzeit als Kriterium für den Beginn des Abbrandes herangezogen werden kann, wurde der Raumabschluss bzw. der Beitrag der Einzelschichten zum Feuerwiderstand im Forschungsvorhaben F-REI 90 fokussiert.

Eine Validierung von Versuchen, berechnet nach dem Verfahren der Lignum Dokumentation Brandschutz 3.1 [10] mit Erweiterungen für Holzfaserdämmstoffe, bzw. dem erweiterten Verfahren nach prEN 1992-1-2 (Final Draft) [9] ist in Abbildung 4 dargestellt.

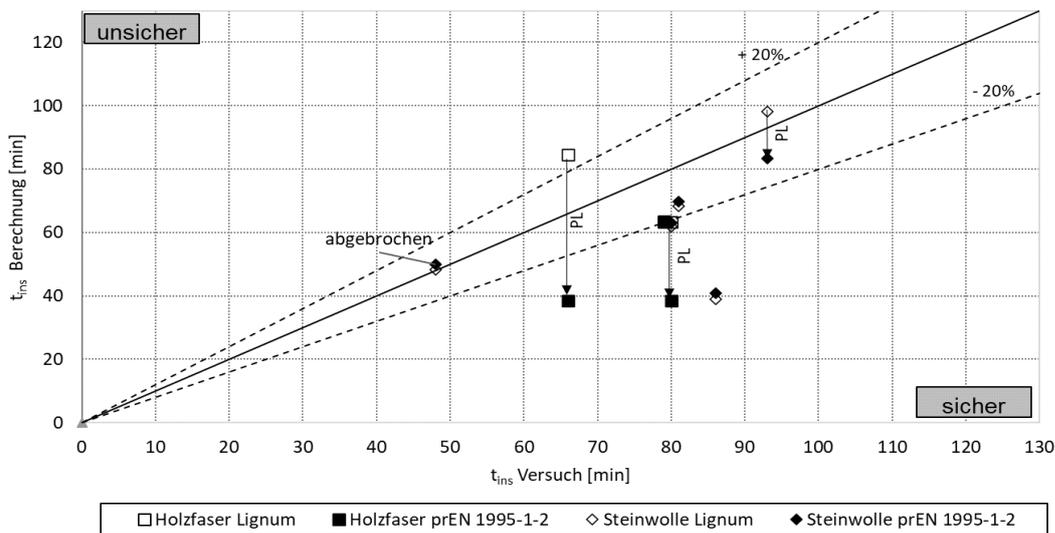


Abbildung 4: Validierung der bestehenden Verfahren zum Raumabschluss mit Berücksichtigung der Begrenzung der Schutzzeit für Dämmstoffe durch das Protection Level (PL)

Abbildung 4 zeigt den Einfluss der Begrenzung der Schutzzeit für Holzfaserdämmstoffe bzw. Steinwolle in Anlehnung an Mäger, Just, et al. [8], die in der prEN 1995-1-2:2021-11 [9] mitberücksichtigt wird. Nach dem Lignum-Verfahren noch auf der «unsicheren» Seite liegenden Konstruktionen werden auf die «sichere» Seite verschoben. Konstruktionen mit Feuerwiderstandsdauern über 60 Minuten (vgl. Abbildung 4) werden im Berechnungsverfahren ebenso konservativ abgebildet wie Konstruktionen mit geringeren Feuerwiderstandsdauern, die bereits durch Schleifer [7] validiert wurden.

3. Forschungsansatz und Umsetzung

Aus dem Vergleich und der Validierung der Berechnungsmodelle ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht wurden. Folgende Aspekte werden in diesem Beitrag vorgestellt:

- Der Wärmedurchgang identischer Konstruktionsaufbauten in unterschiedlichen Abmessungen und in unterschiedlichen Brandprüföfen wurde verglichen.
- Das Berechnungsverfahren und die Positionsbeiwerte für Brandbeanspruchungen über 60 Minuten wurden analysiert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.
- Im Verfahren nach Lignum wird für Holzwerkstoffplatten und massive Holzplatten eine Grundschutzzeit und Grundisoliationszeit über eine Exponentialfunktion berechnet. Für Holzwerkstoffe ist in DIN EN 1995-1-2:2012 – Tabelle 3.1 eine Abbrandrate von 0,9 für Holzwerkstoffplatten angegeben. Es wurde untersucht, ob zukünftig eine einheitliche Bestimmung von Schutzzeiten auf Basis einer Abbrandrate möglich ist.
- In Deutschland müssen Deckenkonstruktionen auch von der Oberseite nachgewiesen werden. Um den positiven Einfluss von Fußbodenaufbauten und Estrichen zu berücksichtigen, ist eine Erweiterung des Berechnungsverfahrens notwendig.

- Für Brettsperrholzelemente ist für Decken, deren Klebefugen im Brandfall versagen und zu einem Abfallen von Lagen führen, das Stufenmodell in der prEN 1995-1-2:2022-11 enthalten. Für Wände ist ein pauschaler Erhöhungsfaktor der Abbrandrate möglich. Eine Anwendung des Stufenmodells für Wandkonstruktionen wurde im Forschungsvorhaben geprüft, um wirtschaftlichere Berechnungsergebnisse zu erhalten und die Methodik für Wände und Decken zu homogenisieren.

Zur Untersuchung dieser Aspekte wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, diese ggf. über numerische Simulationen ergänzt und basierend darauf Bestimmungsgleichungen für die SFM optimiert oder neue Gleichungen abgeleitet. Diese Gleichungen stellen eine Erweiterung der bisherigen Berechnungsmodelle für den Raumabschluss dar (vgl. Abbildung 1) und beeinflussen den Beginn des Abbrandes und somit auch die Tragfähigkeit.

4. Experimentelle Untersuchungen

Um den Beitrag von Einzelschichten zum Feuerwiderstand sowie der Gesamtkonstruktionen zu untersuchen wurden Versuche in unterschiedlichen Geometrien von Brandöfen und verschiedener Probekörperabmessungen durchgeführt (vgl. Abbildung 5 bis Abbildung 10).

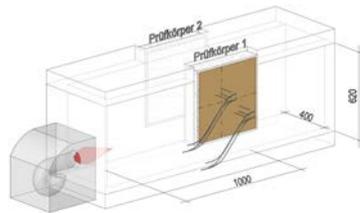


Abbildung 5: Systemskizze -Teil 8 - Ofen



Abbildung 6: Prüfaufbau - Teil 8 - Ofen

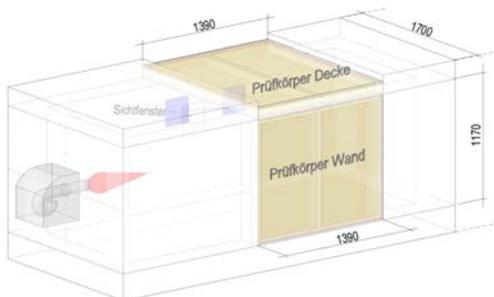


Abbildung 7: Systemskizze - 1 m x 1 m Wand / Decke



Abbildung 8: Brandprüfung - 1 m x 1 m Wand / Decke

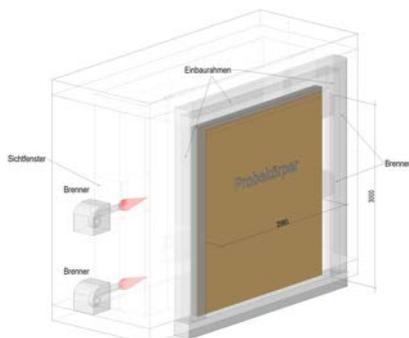


Abbildung 9: Systemskizze Brandversuch 3 m x 3 m



Abbildung 10: Brandversuch 3 m x 3 m

Die Vergleichsuntersuchungen hatten das Ziel einen Einfluss unterschiedlicher Ofengrößen und der zugehörigen Probekörperabmessungen auf den Wärmedurchgang, bei ansonsten

gleichem Aufbau, aufzuzeigen. Da der Wärmedurchgang in diesen Versuchen vergleichbar war, wurden zur weiteren Untersuchung an Holzwerkstoffplatten, Gipsplatten und Estrichaufbauten experimentelle Untersuchungen im Teil- 8 Ofen nach DIN 4102-8 [11] unter ETK- Beanspruchung nach EN 1363 [12] durchgeführt (vgl. Abbildung 5 bzw. Abbildung 6). Um ergänzend zum Wärmedurchgang den Einfluss von unterschiedlichen Hinterlegungsmaterialien (Dämmstoff und Brettsperrholz) auf das Versagen (Abfallen) von Gipsplatten (18 mm dicke GKF Platten) zu untersuchen, wurde zudem ein großmaßstäblicher Deckenversuch durchgeführt (vgl. Abbildung 11). Neben den experimentellen Untersuchungen wurden durch die Industriepartner im Projekt Versuchsergebnisse aus normativen Brandprüfungen zur Verfügung gestellt, um die eigenen Prüfergebnisse zu erweitern und die Berechnungsergebnisse zu validieren.

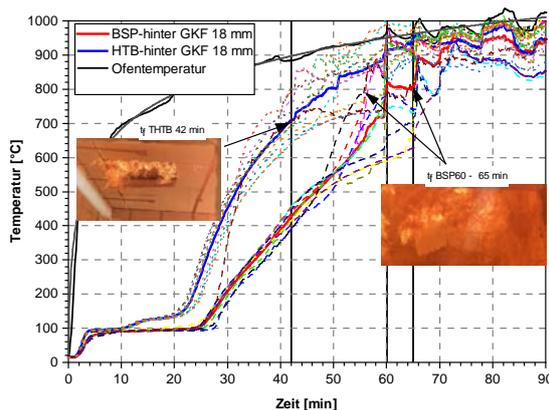


Abbildung 11: Vergleichsuntersuchung des Wärmedurchgangs und der Abfallzeiten von Gipsplatten auf Brettsperrholzelementen (BSP) bzw. auf Holztafelbauelementen (HTB) in einem Versuch

5. Numerische Untersuchung von Einzelschichten

Resultierend aus den experimentellen Untersuchungen wurden durch eine antwortflächenbasierte Optimierung die Materialkennwerte Rohdichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit für die numerische Simulation optimiert bzw. für neue Bauteilschichten, wie beispielsweise Zementestriche, ermittelt. Die numerischen Untersuchungen wurden mittels dem Softwarepaket Ansys Workbench 2020 R3 in Verbindung mit dem Optimierungstool OptiSLang 2020 durchgeführt. Mittels der abgeleiteten thermischen Materialkennwerte wurden basieren auf zahlreichen numerischen Simulationen analytische Bestimmungsgleichungen abgeleitet.

Beispielhaft ist der Prozess nachfolgend anhand der Materialparameter für Zementestriche dargestellt:

- I. Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen Estrichdicken auf Spanplatte (SP):
 - V1: Estrich 35 mm Dicke
 - V2: Estrich 25 mm Dicke
 - V3: Estrich 55 mm Dicke
- II. Auswahl der Startparameter der thermischen Materialkennwerte für die Simulation (hier nach EN 1992-1-2[13])
- III. Optimierung der Parameter und Vergleich mit den Versuchsergebnissen
- IV. Ableitung von analytischen Bestimmungsgleichungen für die SFM.

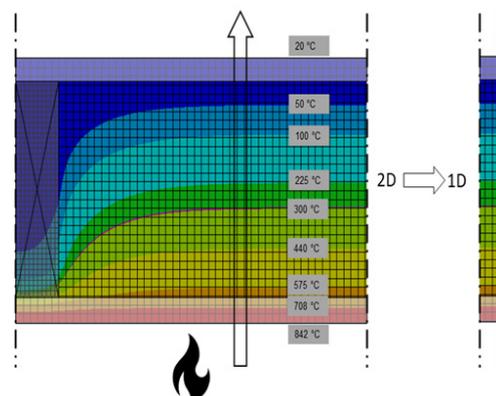


Abbildung 12: Numerisches Simulationsmodell (1-D) zur Berechnung des Temperaturverlaufes im Brandfall

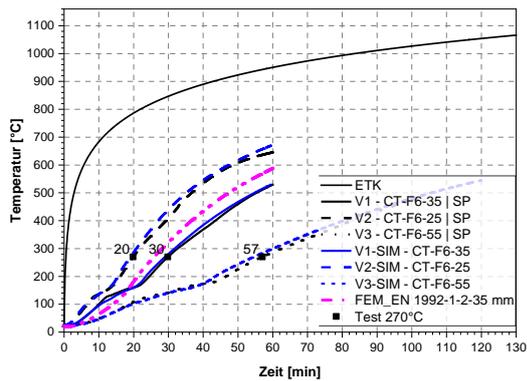


Abbildung 13: Simulation von Estrichaufbauten im Vergleich zu den Versuchsergebnissen

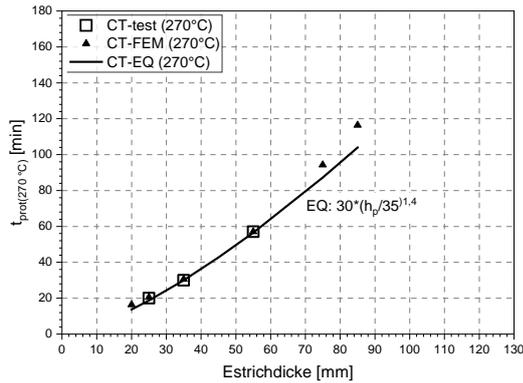


Abbildung 14: Ableiten der Bestimmungsgleichung für Zementestriche aus der Simulation bzw. dem Versuch

6. Analytisches Rechenmodell und Ergebnisse

6.1. Das grundlegende Modell

Das analytische Berechnungsmodell basiert auf dem Modell nach Schleifer [7] bzw. den Weiterentwicklungen nach Mäger, Just et al. [8]. Durch die Trennung zwischen der Schutzwirkung der kritischen Erwärmung und dem Versagen durch Abfallen der Schichten ist es möglich, eine Schicht über die Parameter Schutzzeit (t_{prot}), Versagenszeit (t_r) und den zugehörigen Positionsbeiwerten zu beschreiben. Neue Materialien können somit nachträglich in das bestehende Modell integriert werden oder unterschiedliche Befestigungssysteme über den Parameter t_r berücksichtigt werden.

6.2. Validierung für lange Brandbeanspruchungen

Um eine Anwendung des Berechnungsmodells für lange Brandbeanspruchungen (über 60 Minuten hinaus) zu untersuchen wurde neben der Validierung der Gesamtkonstruktionen (vgl. Abbildung 4) zusätzlich der feuerzugewandte Positionsbeiwert, der Einflussfaktor langer Vorerwärmungszeiten von Schichten innerhalb der Konstruktion, betrachtet.

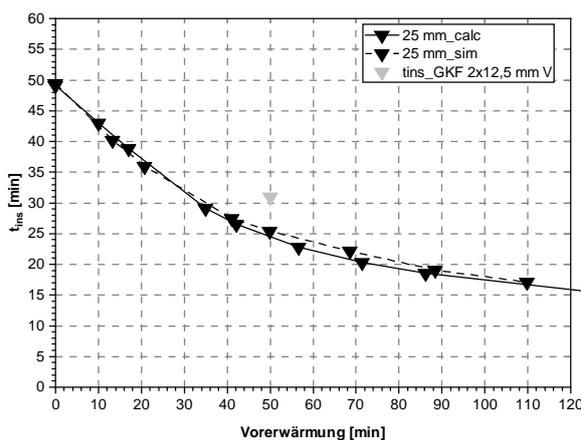


Abbildung 15: Vergleich von Versuch, Simulation und analytischem Berechnungsansatz für t_{ins} von GKF-Platten hinter Dämmstoffen abhängig von der Vorerwärmung (nur ein Versuch 2 x 12,5 mm GKF)

mit: V Versuch
calc Berechnungsmodell
sim Simulation

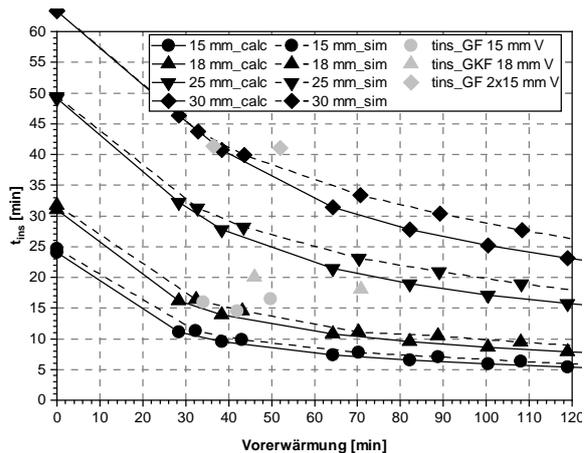


Abbildung 16: Vergleich von Versuch, Simulation und analytischem Berechnungsansatz für t_{ins} von GKF-Platten hinter Holzwerkstoffplatten

Es konnte gezeigt werden, dass das Modell und die Positionsbeiwerte nach Schleifer [7] auch für lange Brandbeanspruchungen (somit lange Vorerwärmungszeiten der feuerabgewandten Schicht) konservative Ergebnisse liefert (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16).

6.3. Ein überarbeitetes Modell für Holzwerkstoffplatten

Für Holzwerkstoffplatten wird die Grundschutzzeit nach Schleifer [7] über eine Exponentialgleichung beschrieben. Da die Grundschutzzeit (mittlere Temperaturerhöhung auf 270 °C) durch den hohen Gradienten hinter der Bekleidungsfläche zwischen 270 °C und 300 °C mit dem Beginn des Abbrandes vergleichbar ist, kann anstelle der Exponentialgleichung für t_{prot} das bisherige Modell über Abbrandraten auch zur Bestimmung der Schutzzeit mit angesetzt werden. Der negative Einfluss dahinterliegender dämmender Schichten wird über den Positionsbeiwert auf der feuerabgewandten Seite mitberücksichtigt. Über eine Rückrechnung aus den bestehenden Ergebnissen sowie aus ergänzenden experimentellen Untersuchungen wurden folgende Abbrandraten berechnet:

Tabelle 1: Abbrandraten für Holzwerkstoffplatten

	β_0 [mm/min)	Bezugsrohddichte [kg/m ³]	Referenzdicke [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.

6.4. Fußbodenaufbauten als brandschutztechnisch wirksame Schicht in der SFM

Fußbodenaufbauten auf der Deckenoberseite liefern einen wesentlichen Beitrag zum Feuerwiderstand für eine Brandbeanspruchung von der Oberseite. Dieser Nachweis ist in Deutschland zwingender Bestandteil für den Feuerwiderstand einer Deckenkonstruktion. Das bisherige Berechnungsmodell der SFM wurde daher um Estriche und Trittschalldämmstoffe erweitert. Somit ist es zukünftig möglich, die Schutzzeit von Estrichen bei der Berechnung des Raumabschlusses von Deckenkonstruktion mit Brandbeanspruchung von der Oberseite zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Mindestdicken von Estrichen, der Kombination Estrich + Trittschalldämmung bzw. Estrich + Holzwerkstoffplatte bis zum Erreichen der Schutzzeit von 30, 60 oder 90 Minuten (ausgehend von einer Hinterlegung mit Holz bzw. Holzwerkstoffen)

	Estrichdicke [mm]										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	80	
S		-				30			60	90	
15 I	-		30				60			90	
20 I	-		30			60			90		
30 I		30		60				90			
13 H			30			60				90	
15 H			30			60			90		
19 H		30			60			90			

mit: **S** t_{prot} der Estrichschicht (hinterlegt mit Holzwerkstoffplatten)
xx I/W Dicke des Hinterlegungsmaterials
I: Trittschalldämmung Rohddichte $\geq 100 \text{ kg/m}^3$
H: Holz bzw. Holzwerkstoffplatte

6.5. Massivholzelemente – Das Stufenmodell für Wände

In prEN 1995-1-2:2021-11 [9] ist zur Bestimmung des Restquerschnittes von Brettsperrholzdecken ohne nachgewiesene thermischen Beständigkeit der Klebefugen im Brandfall (bond line integrity not maintained) das Stufenmodell anzuwenden. Wird gewährleistet, dass die Klebefuge nicht vor dem Erreichen des Abbrandes (300 °C Isotherme) versagt, kann mit dem linearen Abbrandmodell gerechnet werden und ein vorzeitiges Versagen (Abfallen) der Lamellen muss nicht mitberücksichtigt werden (vgl. Abbildung 17). Bei einem Abfallen verkohlender Brettlagen ist das Stufenmodell (vgl. Abbildung 18 Phase 1 bis 4) zu berücksichtigen. In Phase 1 ist die materialspezifischen Abbrandrate (in der Regel 0,65 mm/min) zu berücksichtigen. Nach dem Abfallen der Lamelle (Phase 3) ist die doppelte Abbrandgeschwindigkeit ($k_3 = 2$) bis zum Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm anzusetzen. Danach (Phase 4) kann wieder bis zum Erreichen der nächsten Klebefuge die ursprüngliche Abbrandrate herangezogen werden.

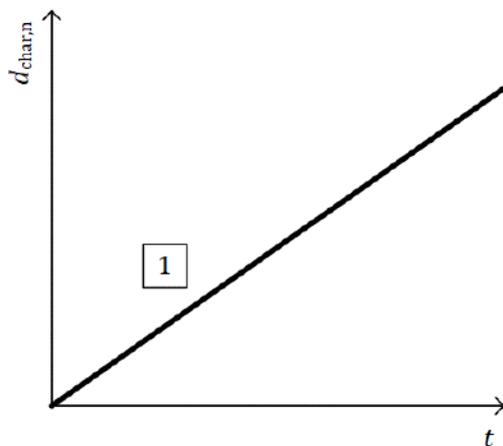


Abbildung 17: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt ohne die Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. Vollholzquerschnitt) → linearer Ansatz

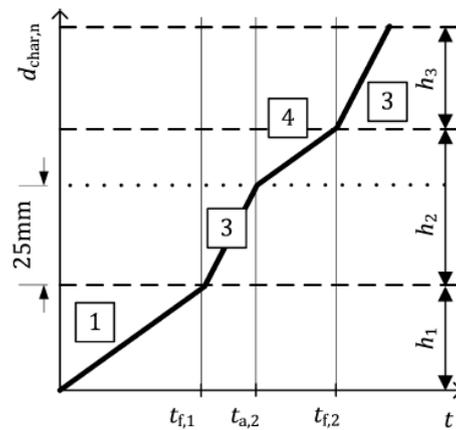


Abbildung 18: Abbrandmodell für einen ungeschützten Holzquerschnitt unter Berücksichtigung des vorzeitigen Versagens von Einzellamellen (z.B. BSP-Decke) → Stufenmodell

Für Wandkonstruktionen ist anstelle zum Stufenmodell eine pauschale Erhöhung der Abbrandrate zur Berücksichtigung des Abfallens der Einzellamellen zulässig. Als globale Abbrandrate über alle Lamellen kann für Wände zur Bestimmung des Restquerschnitts nach prEN 1995-1-2:2021-11 folgender Wert (Gl.1) genutzt werden:

$$\text{für Wände} \quad \beta_n = 1,2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (\text{Gl. 3})$$

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 i.d.R. = 1

Die 20 % Erhöhung der Abbrandrate (ausgedrückt durch den Faktor 1,2) decken den Einfluss eines Abfallens von anhaftender Holzkohle ab. Anstelle eines Stufenmodells darf vereinfacht ein linearer Ansatz mit erhöhter Abbrandrate gewählt werden. Dies führt vor allem für die erste brandzugewandte Lamelle zu einem erhöhten Abbrand im Vergleich zum Stufenmodell und somit vor allem für dreischichtige Brettsperrholzelementen zu unwirtschaftlicheren Ergebnissen. Im nachfolgenden wurde ein Ansatz für das Stufenmodell vorgeschlagen, um Wandkonstruktionen zu berechnen. Der Einfluss des Abfallens von Lagen ist aufgrund der Orientierung geringer als bei Deckenkonstruktionen. Somit wurde für das Stufenmodell bei Wänden entsprechend Abbildung 18 ein geringerer k_3 -Faktor ermittelt.

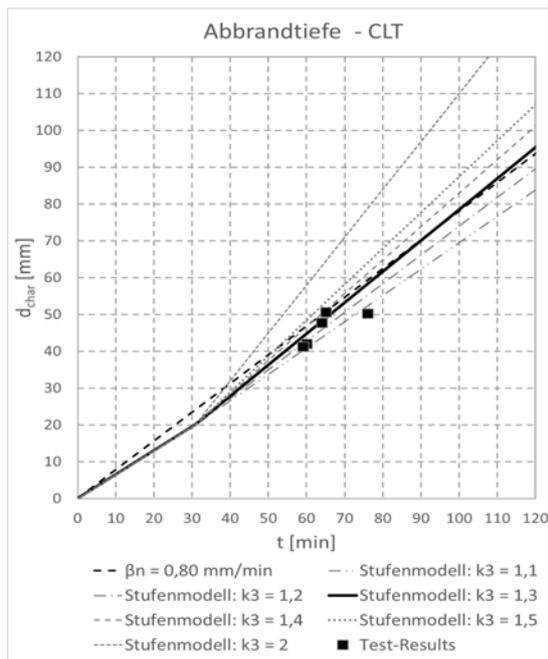


Abbildung 19: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,1$ bis $2,0$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettspertholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

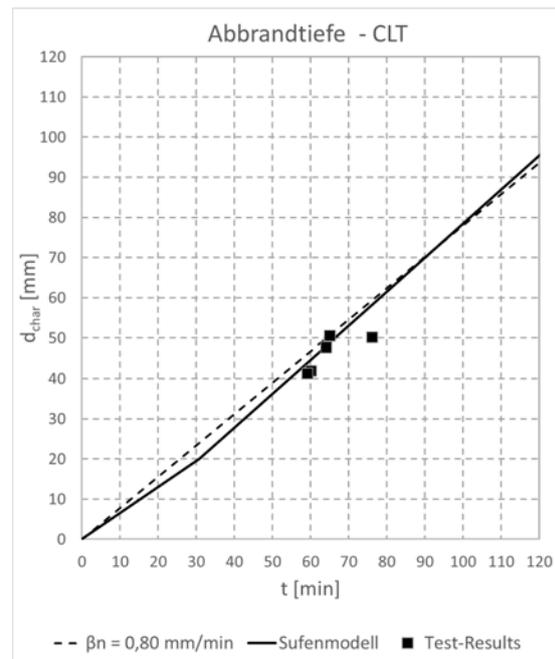


Abbildung 20: Vergleich zwischen Stufenmodell ($k_3=1,3$) und dem linearen Abbrandmodell ($\beta=0,8$ mm/min) eines 7-lagigen BSP-Wandelementes (20-20-20-20-20-20-20) sowie zugehöriger Versuche unterschiedlich dicker Brettspertholzelemente mit 20 mm dicken Einzellagen

Die Auswertung zeigt, dass die Anwendung eines k_3 -Faktor von 1,3 innerhalb der Phase 3 des Abbrandmodells bei Wänden ($\beta_n = 1,3 \cdot k_g \cdot \beta_0$) eine gute Übereinstimmung mit dem globalen linearen Ansatz einer erhöhten Abbrandrate sowie den Versuchsergebnissen liefert. Für die Abbrandrate im Stufenmodell bei Brettspertholzwänden in der Phase 1 und 4 darf analog zum Stufenmodell bei Decken der Grundwert der Abbrandrate mit 0,65 mm/min angesetzt werden. Hierdurch wird besonders für dreilagige Wandelemente eine optimierte Bemessung ermöglicht.

7. Zusammenfassung und Ausblick für die Normung

Im hier durchgeführten Forschungsvorhaben wurden experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zu brandbeanspruchten Holzbauteilen durchgeführt. Es wird gezeigt, dass das erweiterte Berechnungsmodell der prEN 1995-1-2 [9], basierend auf Schleifer [7] für Brandbeanspruchungen bis 120 Minuten angewendet werden kann und eine gute Grundlage zur Berechnung des Raumabschlusses darstellt. Die vorhandenen Positionsbewerte können herangezogen werden und die neuen Ansätze zur Berechnung des Δt -Wertes bzw. der Begrenzung der Schutzzeit der Dämmstoffe liefern konservative Ergebnisse. 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. Es wurde ein einheitliches Modell für Holzwerkstoffplatten, basierend auf Abbrandraten, vorgeschlagen. Ergänzend hierzu wird das Berechnungsverfahren durch neue Bestimmungsgleichungen für Estriche erweitert und ermöglicht eine Berechnung des Raumabschlusses sowie der Schutzwirkung für Decken bei einer Brandbeanspruchung von der Oberseite. Für Wände aus Brettspertholz wird ein optimierter, wirtschaftlicherer Bemessungsansatz, basierend auf dem Stufenmodell, analog zu Deckenbauteilen vorgestellt. Die Ergebnisse wurden im Prozess zur Weiterentwicklung der prEN 1992-1-2 vorgestellt und bestätigen bzw. erweitern die bisherigen Berechnungsmethoden.

8. Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung der Forschungsinitiative Zukunft Bau durchgeführt. Zusätzliche Unterstützung in finanzieller Art, sowie durch die Lieferung von Material oder die Zurverfügungstellung von Prüfergebnissen erfolgt durch die Beteiligung von zahlreichen Unterstützern. Hierfür möchten wir uns besonders bedanken, da dieses, mit hoher Praxisrelevanz versehene Forschungsvorhaben, nur in enger Zusammenarbeit mit der Praxis und deren Unterstützung umgesetzt werden konnte.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Rauch, M.; Werther, N.; Suttner, E.; Winter, S.: F-REI 90 - Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Bonn, noch nicht veröffentlicht
- [2] Hafner, A.; Schäfer, S.; Krause, K.; Rauch, M.; Merk, M.; Werther, N.; Optisch, W.: Methodenentwicklung zur Beschreibung von Zielwerten zum Primärenergieaufwand und CO₂-Äquivalent von Baukonstruktionen zur Verknüpfung mit Grundstücksvergaben und Qualitätssicherung bis zur Entwurfsplanung. Bochum, 01/2017
- [3] Bauministerkonferenz: Muster- Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (idF v. 10.2020) (2021)
- [4] Bauministerkonferenz: Musterbauordnung (idF v. 11.2002) (2020)
- [5] Bauministerkonferenz: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
- [6] DIN EN 1995-1-2:2010-12. 12/2010. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
- [7] Schleifer, V.: Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion. Dissertation. (2009)
- [8] Maeger, K.; Just, A.; Frangi, A.: Improvements to the Component Additive Method. SiF 2018– The 10th International Conference on Structures in Fire, (2018)
- [9] prEN 1995-1-2:2021-11. 09/2021. Eurocode 5 - Design of timber structures, Part 1-2: General - Structural fire design (Final Draft)
- [10] Frangi, A.; Angehrn, C.; Brühwilder, I.; Wiederkehr, R.: Feuerwiderstandsbemessung: Bauteile und Verbindungen. Zürich, 2019 (Lignum-Dokumentation Brandschutz 3.1)
- [11] DIN 4102-8:2003-10. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.
- [12] DIN EN 1363-1: 2012-10. Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [13] DIN EN 1992-1-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken