

Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau – Neues aus der Forschung, Details für die Praxis

Thomas Engel, Norman Werther, Christoph Kurzer, Stefan Winter

1 Einleitung

Das Bauen mit Holz erfreut sich steigender Beliebtheit. Holz ist der wichtigste nachwachsende Rohstoff der Zukunft und kann für die notwendige Dekarbonisierung der Erde einen wesentlichen Beitrag leisten. Entscheidend für diesen Veränderungsprozess sind typische mehrgeschossige Gebäude unterhalb der Hochhausgrenze wie beispielsweise Wohngebäude.

Das Verbundforschungsvorhaben TIMpuls [1] der Technischen Universität München, der Technischen Universität Braunschweig, der Hochschule Magdeburg-Stendal und dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge hatte die Erarbeitung des wissenschaftlich begründeten Nachweises zum Ziel, die unbedenkliche Verwendbarkeit tragender und raumabschließender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze zu ermöglichen. Auf Basis umfangreicher experimenteller und numerischer Untersuchungen wurden die erforderlichen Grundlagen zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Brandschutzregelungen für eine erweiterte Anwendung des mehrgeschossigen Holzbaus erarbeitet.

Dieser Beitrag stellt einen Auszug relevanter Grundlagen und abgeleiteter Ergebnisse für die brandschutztechnische Planung von Holzgebäuden dar. Den gesamten Schlussbericht des Verbundforschungsvorhabens TIMpuls [1] finden Sie unter <https://doi.org/10.14459/2022md1661419>.

2 Abbrandverhalten von Holz

Holz ist ein brennbarer Baustoff. Unabhängig davon lassen sich auch mit dem Baustoff Holz alle gewünschten Feuerwiderstandsdauern durch Dimensionierung erreichen. Die maßgebende Größe für die Bestimmung ist hier der Abbrand. Holz bildet unter Brandeinwirkung eine Holzkohleschicht aus, die sich wie eine Schutzschicht verhält. Der Verkohlungsbereich verzögert den Abbrand des Restquerschnitts, weil dieser die thermische Zersetzung nach innen langsamer fortschreiten lässt. Dies liegt u. a. an der geringen Wärmeleitfähigkeit der Holzkohle und des Holzes. Normativ wird die Grenztemperatur zwischen Holzkohleschicht und nicht verbranntem Querschnitt (Abbrandgrenze) durch die DIN EN 1995-1-2 [2] mit 300 °C festgelegt. Als Abbrandgrenze wird dabei der Bereich benannt, der keine Verkohlung mehr aufweist, jedoch braun verfärbt ist, vgl. Abb. 1. [3]

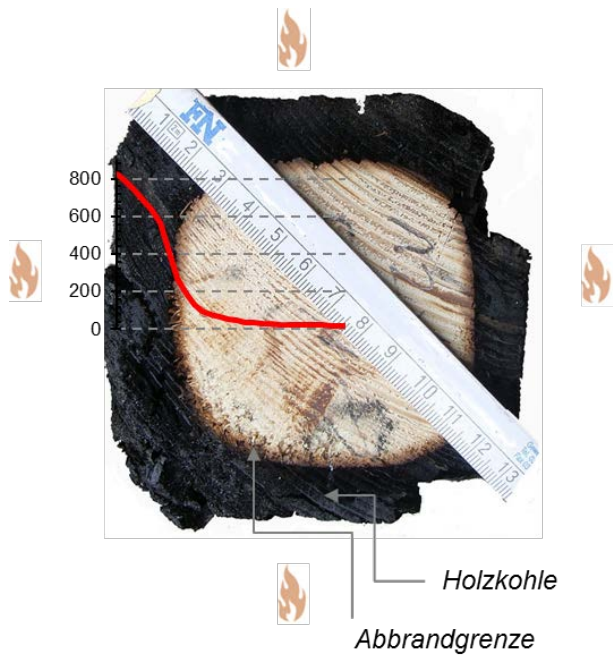


Abb. 1: Darstellung der Abbrandgrenze mit zugehörigen Temperaturgradienten

Als eine der wesentlichen Kenngrößen bei der normativen Bemessung der Tragfähigkeit von brandbeanspruchten Holzbauteilen ist die Abbrandrate anzusehen. Als Abbrandrate β wird die Geschwindigkeit der Umwandlung von Holz zu Holzkohle bezeichnet. Aus der Abbrandrate lässt sich unter Beachtung der auftretenden Abbrandphasen der verbleibende Restquerschnitt zu jeder Branddauer bestimmen.

Der normative Bemessungsansatz der DIN EN 1995-1-2 [2] für Vollholz entspricht einer konstanten Abbrandrate, die je nach Beanspruchungsszenario und Holzart zwischen 0,65 und 0,8 mm/min liegt. Dieses Modell kann für Vollholz, Brettstapelbauteile und üblicherweise auch für Brettschichtholz herangezogen werden.

Das Abbrandmodell von Brettsperrholz kann hingegen zu dem zuvor beschriebenen linearen Ansatz abweichen und durch produktspezifische Eigenschaften und die Einbaubedingungen beeinflusst werden. Brettsperrholz besteht aus mehreren über Kreuz flach aufeinander verklebten Brettlagen. Anders als bei Brettschichtholz und Vollholzteilen liegen die Klebefugen parallel zum Abbrand und folglich parallel zur Ausbildung der Kohleschicht, vgl. Abb. 2.

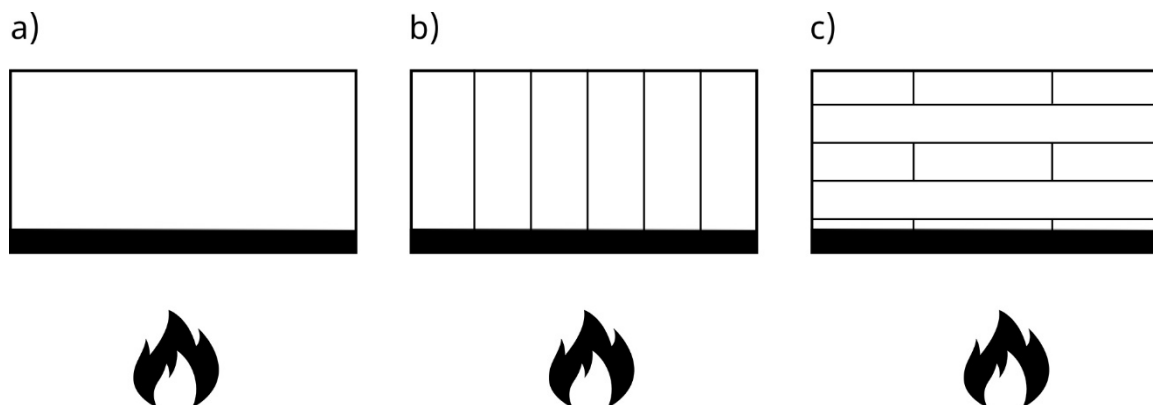


Abb. 2: Darstellung des jeweiligen Abbrandes von a) Vollholz, b) Brettschichtholz, c) Brettsperrholz mit Ausbildung einer Holzkohleschicht (schwarz)

Besonders das thermische Verhalten der Flächenverklebung, die Abmessung der Brettlamellen, der Aufbau der Elemente sowie die Ausrichtung der Bauteile bestimmen hier das Abbrandverhalten. Eine allgemeingültige Anwendung des bekannten Konzepts einer konstanten Abbrandrate ist damit nicht grundsätzlich gegeben und nur für Brettsperrholz möglich, bei dem das thermische Verhalten der Flächenverklebung äquivalent zu Vollholz bewertet werden kann. [4]

Hintergrund hierfür sind Erkenntnisse aus Brandversuchen, die zeigen, dass verkohlende Brettlamellen abfallen können und damit die schützende Funktion der Holzkohle („Schutzschicht“) für den dahinterliegenden Querschnitt verloren geht (Abb. 3). Dies führt so lange zu einer erhöhten Abbrandrate (Phase 3 nach Abb. 4b), bis wieder eine ausreichend dicke Holzkohleschicht (25 mm) gebildet ist [2]. Ein wesentlicher Grund für ein Abfallen der schützenden Holzkohleschichten ist die eingeschränkte thermische Beständigkeit der Flächenverklebung zwischen den einzelnen Brettlamellen im Brandfall [20]. Aufgrund der Bauteilorientierung und der Schwerkraft ist dieses Abfallverhalten bei Brettsperrholz-Deckenbauteilen ausgeprägter als bei Brettsperrholz-Wänden mit gleicher Konfiguration. [4]



Abb. 3: Brandversuch an einem Brettsperrholzdeckenelement, mit partiellem Abfall der Holzkohle [4]

Diesem Verhalten wird über einen Bemessungsansatz (Stufenmodell) Rechnung getragen. Abb. 4 stellt den linearen Ansatz bzw. das Stufenmodell dar. Hier wird entweder auf eine lineare Abbrandrate (Abb. 4a) oder auf einen stufenförmigen Abbrand (Abb. 4b), der die erhöhte Abbrandrate direkt nach dem Abfallen der Holzkohleschicht einer Brettlamelle berücksichtigt, zurückgegriffen. Im letztgenannten Fall kombiniert das Stufenmodell [5] einen Bemessungswert der Abbrandrate von $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ (Normalwert) mit einem Erhöhungsfaktor, um nach dem Abfallen der verkohlten Brettlamelle die beschleunigte Abbrandrate bis zum erneuten Erreichen einer Dicke der Holzkohleschicht von 25 mm abzubilden (Phase 3 nach Abb. 4b). Anschließend verlangsamt sich die Abbrandrate bis zum Erreichen der nächsten Klebstoffuge wieder auf den Normalwert. Für Brettsperrholz-Decken resultiert in der Phase des erhöhten Abbrands eine Abbrandrate von 1,3 mm/min. Für Brettsperrholz-Wände, bei denen es zum Abfallen von verkohlenden Schichten kommt, liegt im Stufenmodell in der Phase des erhöhten Abbrands eine Abbrandrate von 0,85 mm/min vor [6]. [4]

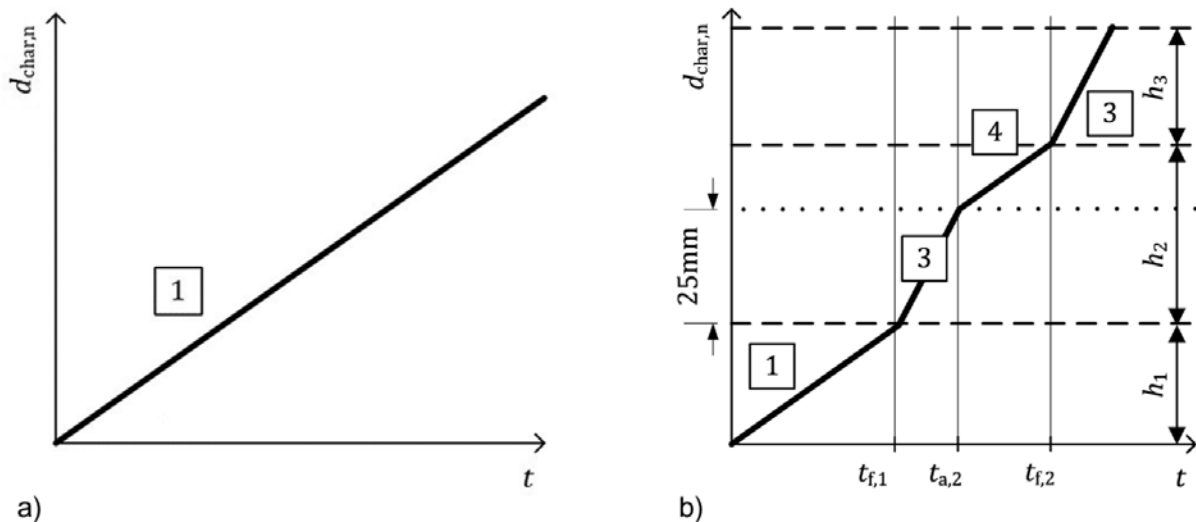


Abb. 4: Phasen des Abbrands (d = Abbrand, t = Zeit) für ungeschützte Brettsperrholzbauteile, wenn a) die Klebefuge keinen Einfluss auf das Abbrandverhalten hat, b) die Klebefuge einen Einfluss auf das Abbrandverhalten hat. Phase 1 = normaler Abbrand, Phase 3 = erhöhter Abbrand, Phase 4 = wieder konsolidierten Abbrand nachdem die Holzkohleschicht eine Dicke von 25 mm erreicht ist [4]

Je nach verwendetem Produkt und entsprechend den technischen Spezifikationen und Nachweisen für das Produkt (abZ, aBG, DoP/ETA) erfolgt die Bemessung des Abbrands bei Brettsperrholz damit entweder äquivalent zu Vollholz oder als lagenartiges zusammengesetztes Holzbauteil, sofern im Brandfall ein Abfallen der verkohlenden Brettlamellen zu erwarten ist.

3 Schutzwirkung von Brandschutzbekleidungen

In der brandschutztechnischen Bewertung von Holzbauteilen und Konstruktionen nimmt das Bekleiden der Holzbauteile einen wichtigen Stellenwert ein. Neben dem Erscheinungsbild der Bauteiloberflächen wird über Bekleidungen das brandschutztechnische Verhalten der Bauteile positiv beeinflusst. Die Schutzwirkung der Bekleidungen ermöglicht eine Optimierung der Bemessung von Holzbauteile oder schließt sogar die Beteiligung der Holzbauteile am Brandgeschehen aus. Üblicherweise werden hierzu nichtbrennbare Plattenwerkstoffe, wie Gipskarton-, Gipsfaser-, Kalziumsilikat-, - oder Lehmbauplatten als Bekleidungen eingesetzt. Je nach Anwendungsbereich oder Quelle werden bisher in der Praxis zur Benennung entsprechender Bekleidungen unterschiedliche Begriffe genutzt, was auf die bisher unterschiedlichen Schutzziele oder auch Unkenntnis des Anwenders zurück zu führen ist. So finden sich unter anderem Begriffe, wie Brandschutzbekleidung, brandschutztechnisch wirksame Bekleidung, Kapselbekleidung oder Schutzbekleidung wieder.

Besonders für die Anwendung im mehrgeschossigen Holzbau spielt die genaue Definition und einheitliche Benennung der eingesetzten Bekleidung eine entscheidende Rolle, um die gewünschte Schutzfunktion für die Holzbauteile sicherzustellen. Das Schutzvermögen entsprechender Bekleidungssysteme ist eine Eigenschaft, die durch die Materialität der Bekleidung und deren konstruktiven Aufbau (Dicke, Befestigung, Ausbildung der Fugen, Hinterlegungsmaterial) definiert wird.

Hinsichtlich der Schutzwirkung kann zwischen zwei Arten von Bekleidungen differenziert werden. Neben Bekleidungen mit klassifizierter Brandschutzfunktion (brand-

schutztechnisch wirksamen Bekleidung) auf Basis der DIN EN 13501-2 [7] wird weiterhin in Schutzbekleidungen nach DIN EN 1995-1-2 [2] unterschieden. Beide Arten von Bekleidungen werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Eigenschaften beschrieben.

a) Wand- und Deckenbekleidungen mit klassifizierter Brandschutzfunktion (brandschutztechnisch wirksame Bekleidung - „Kapselung“)

Zielsetzung einer solchen Bekleidung ist es, dahinterliegende Holz- und Holzwerkstoffe vor Schäden, wie Entzündung oder Verkohlung, vollständig zu schützen. Jedweder Beitrag der Holzbauteile am Brandgeschehen soll so für eine festgelegte Zeit ausgeschlossen werden. Grundlage hierzu sind die sogenannten „Kapselklassen“ z.B. K₂30 (30 Minuten) oder K₂60 (60 Minuten) nach DIN EN 13501-2 [7] auf Basis einer Prüfung nach DIN EN 14135 [8]. Neben der flächigen Schutzwirkung wird hierbei auch der Einfluss von Verbindungsmitteln bewertet, die zu einer vorzeitigen lokalen Verkohlung (Temperaturerhöhung) am zu schützenden Bauteil führen können. Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass bei Einsetzen einer Verkohlung an den Verbindungsmitteln die Temperaturen in der Fläche in der Regel um mehr als 100 K unterhalb der zulässigen Grenztemperaturerhöhung (250 K / 270 K) liegen, vgl. Abb. 5. Für die meistverwendeten Bekleidungen aus Gipskartonfeuerschutz- und Gipsfaserplatten resultieren im Hinblick auf die Klasse K₂30 typischerweise Bekleidungsstärken von 18 mm und für K₂60 typischerweise Bekleidungsstärken von 2 × 18 mm, vgl. MHolzBauRL [9]. Wesentlich hierfür ist zudem, dass eine adäquate Befestigung vorliegt.

b) Schutzbekleidungen im Sinn der DIN EN 1995-1-2

Mittels dieser Bekleidungen wird das globale Ziel verfolgt einen positiven Beitrag zum Feuerwiderstand des Holzbauteils zu leisten. Die Schutzwirkung der Bekleidung wird hierbei einerseits über den Wert t_{ch} (Zeit bis zum Beginn des Abbrandes hinter der Bekleidung) und andererseits durch den Werte t_f (Versagenszeit/Abfallen der Schutzbekleidung) beschrieben. Ein Nachweis der Schutzfunktion kann aktuell für ausgewählte generische Produkte der DIN EN 1995-1-2 [2] entnommen werden. Produktspezifisch lassen sich entsprechende Kennwerte auf Basis einer Prüfung nach DIN EN 13381-7 [10] ableiten. Auf Basis der nächsten Generation der prEN 1995-1-2 [5] werden neben den Schutzzeiten t_{ch} für Gipsplatten auch Kennwerte für Lehmbauplatten als auch für die Schutzzeit t_f bis zum Abfallen der Bekleidungen angegeben, wodurch für den Zeitraum zwischen t_{ch} und t_f ein reduzierter Abbrand berücksichtigt werden kann, vgl. Abb. 6. In der praktischen Anwendung zeigt sich, dass mit einer Bekleidung aus 2 × 18 mm Gipskartonfeuerschutzplatten oder Gipsfaserplatten eine Schutzzeit t_{ch} von bis zu 90 Minuten erreicht werden kann. Vergleichbar dazu ergibt sich für die nach MHolzBauRL [9] geforderte einlagige 18 mm dicke Bekleidung auf Massivholzelementen eine rechnerische Schutzzeit [2] von mehr als 36 Minuten.

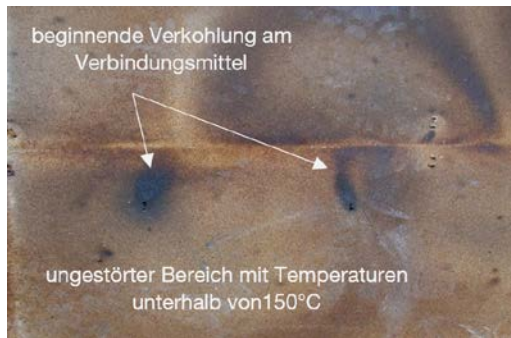


Abb. 5: Verfärbungsbild/Verkohlung im normativen Brandversuch auf der Trägerplatte

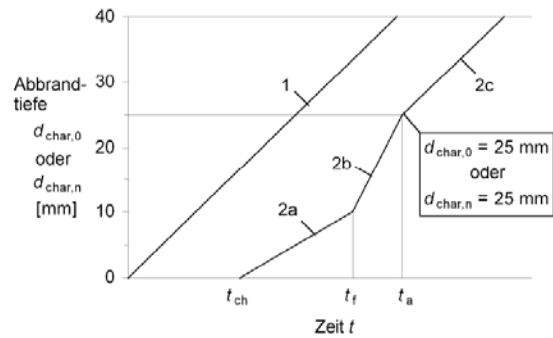


Abb. 6: Abbrandmodell [2] mit 1 = Abbrand ungeschütztes Bauteil, t_{ch} = Schutzzeit der Bekleidung, 2a = verminderter Abbrand bis zum Zeitpunkt t_f auf Grund der teilweise noch vorhandenen Teile der Bekleidung, 2b = kurzzeitig erhöhter Abbrand, 2c = „normaler“ Abbrand wie ungeschütztes Bauteil

Eine Gegenüberstellung der Schutzfunktionen der beiden Bekleidungsarten kann nachstehender Tabelle 1 entnommen werden.

Tab. 1: Vergleich der Schutzwirkungen von Bekleidungen nach DIN EN 1995-1-2 und DIN EN 13501-2

Beurteilungskriterium	Brandschutztechnisch wirksame Bekleidung nach DIN EN 13501-2	Schutzbekleidung nach DIN EN 1995-1-2
Begrenzung der Temperatur(erhöhung) hinter der Bekleidung	Temperaturerhöhung über Ausgangstemperatur - im Mittel um nicht mehr als 250 K - im Maxima um nicht mehr als 270 K	als Grenztemperatur für t_{ch} (Beginn des Abbrandes) gelten 300°C
Den Ausschluss von verbranntem oder verkohltem Material hinter der Bekleidung	Auch im Bereich von Befestigungsmitteln und Fugen (visuelle Wertung nach dem Versuchsende)	Nur in der Fläche (Fugen werden gesondert betrachtet, Befestigungsmittel bleiben unberücksichtigt)
Abfallen der Bekleidung	Ein Abfallen oder Zusammenbrechen (selbst von Teilen) ist unzulässig.	Zeitpunkt bis zum Abfallen der Bekleidung mit dahinter liegendem reduziertem Abbrand durch t_f charakterisiert

Auch wenn beide Arten von Bekleidungen unterschiedliche spezifische Schutzziele verfolgen, kann ihre Leistungsfähigkeit hinsichtlich der flächigen Schutzwirkung und damit bezüglich des Ausschlusses der Holzbauteile am Brandgeschehen (Temperaturkriterium) als vergleichbar angesehen werden. Ein Einfluss resultierend aus der vorzeitigen Verfärbung und pyrolytischer Zersetzung an den Verbindungsmitteln auf die Branddynamik im Raum ließ sich innerhalb der im Rahmen des Forschungsprojektes TIMpuls durchgeführten Versuche nicht ableiten [1]. Verdeutlicht wird dies ebenso bereits durch den geringen Flächenanteil, den entsprechende Verbindungsstellen im Vergleich zur Gesamtfläche einnehmen, vgl. Abb. 7 und Abb. 8.



Abb. 7: Verbindungsmittel nach Entfernen der Brandschutzbekleidung, V0



Abb. 8: Verfärbungen an den Befestigungspunkten am Ständer einer Holztafelbauwand, V4

Ergänzend zu brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen „K“ können somit auch Schutzbekleidungen aus dem Anwendungsbereich der DIN EN 1995-1-2 [2] für den mehrgeschossigen Holzbau hinreichende Eigenschaften liefern, um einen flächigen Mitbrand der Holzbauteile und eine Beteiligung am Brandgeschehen im Raum auszuschließen. Neben dem Ausschluss des Mitbrandes der Holzbauteile kann über die entsprechende Charakterisierung der Schutzbekleidung auch der Beitrag der Bekleidung zum Feuerwiderstand der Gesamtkonstruktion und deren Abfallzeit benannt werden.

Auf Basis der Differenzierung und Beschreibung des thermischen Versagenskriteriums zur Beurteilung der Schutzbekleidung für Holzbauteile (t_{ch}) wurde es im Rahmen des Forschungsprojektes TIMpuls möglich, die Leistungsfähigkeit von Schutzbekleidungen unter verschiedenen Brandszenarien miteinander zu vergleichen [1].

Aus der so geschaffenen Möglichkeit zum Vergleich der üblicherweise unter ETK-Beanspruchung ermittelten Schutzwirkungen für Bekleidungen aus Gipsplatten mit der Schutzwirkung im Naturbrand (Naturbrand 1 TIMpuls [1]) lässt sich erstmals ein Bezug herstellen, von welcher Schutzwirkung für die Holzbauteile in einem realen Vollbrand ausgegangen werden kann, ohne dass eine Beteiligung der geschützten Holzbauteile am Brandgeschehen erfolgt, vgl. Abb. 9. Hierbei wurde exemplarisch die im Forschungsprojekt genutzte Naturbrandkurve 1 in Bezug genommen. Diese Kennwerte lassen sich wiederum in Bezug zu den Eingriffszeiten der Feuerwehr setzen und erlauben so eine leistungsbezogene Bemessung der Bekleidung.

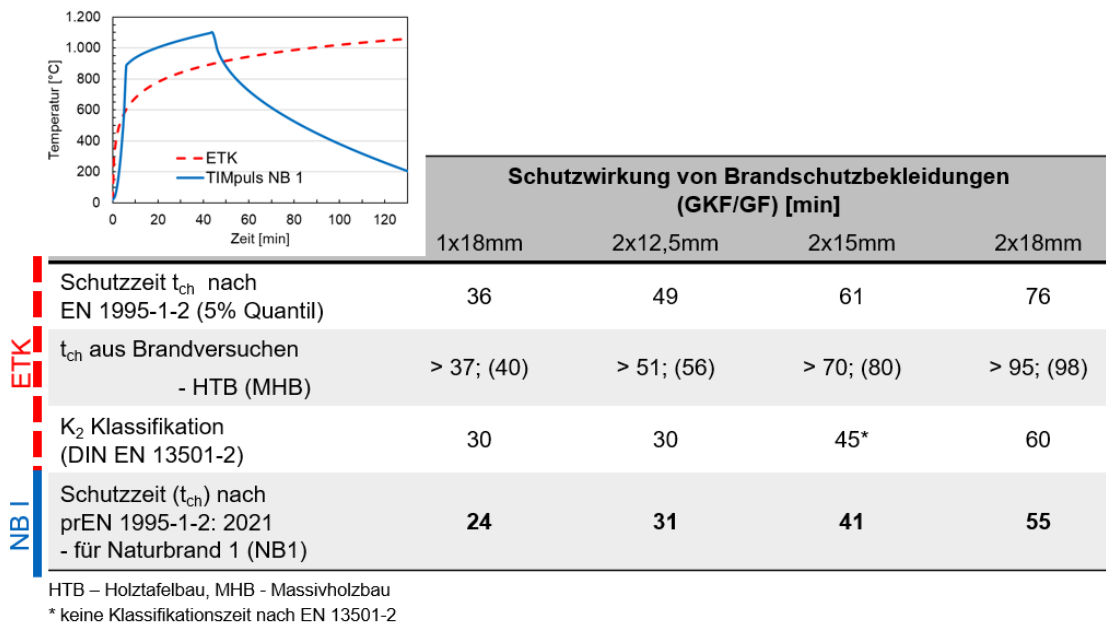


Abb. 9: Schutzwirkung von Gipsbekleidungen bei verschiedenen Brandszenarien

4 Einfluss ungeschützter Holzoberflächen auf die Brandraumdy- namik und die Brandeinwirkung auf die Fassade

Ungeschützte bzw. nur anfänglich durch eine Brandschutzbekleidung geschützte Holzoberflächen stellen eine zusätzliche immobile Brandlast (Brandlast aus der Konstruktion) dar. Sie haben in Abhängigkeit ihrer Masse, ihrer geometrischen Anordnung, des Öffnungsfaktors der Räume (Ventilationsbedingungen) und der Raumgröße Einfluss auf die Branddynamik, wie z.B. Zeitpunkt des Flashovers, die Branddauer und die Brandeinwirkung außen entlang der Fassade. [1]

Für die Untersuchung der Brandraumdynamik in Räumen mit ungeschützten bzw. nur anfänglich geschützten Holzoberflächen wurden innerhalb des Verbundforschungs-
vorhabens mehr Versuchsreihen durchgeführt.

Ein Beispiel hierfür sind die in Braunschweig realisierten mittelmaßstäblichen Brand-
versuche im Room Corner-Versuchsstand nach ISO 9705-1 [11]. Aus den durchge-
führten Room Corner Versuchen ist ersichtlich, dass ein Vorhandensein von immobiler
Brandlast eine Änderung der Brandraumdynamik bei sonst ausschließlich mobiler
Brandlast (Brandlast aus Einrichtung und Ausstattung z.B. Schrank, Bücher etc.) zur
Folge hat. [1], [12]

Mit den experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich durch
die immobile Brandlast eine kürzere Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des
Flashovers und eine Steigerung der Wärmefreisetzungsrate ergibt. Zudem kann durch
die zusätzliche immobile Brandlast früher ein ventilationsgesteuertes Brandregime im
Brandverlauf erreicht werden, was wiederum eine geringere maximale Wärmefreisetz-
ungsrate aber eine längere Branddauer im Brandraum zur Folge hat. Die immobile
Brandlast verursacht ergänzend die Verlängerung der Abkühlphase eines Raumbran-
des. Zudem erhöht sich das Ausmaß der aus der Öffnung schlagenden Flammen mit
zunehmender ungeschützter Holzoberfläche, da die freigesetzten Pyrolysegase erst
mit dem Sauerstoff außerhalb des Brandraumes oxidieren können. [1], [12]

In der TIMpuls Versuchsreihe konnte ein Selbstverlöschten massiver Holzbauteile beim Verlöschten der mobilen Brandlast (Stützfeuer) zuverlässig beobachtet werden, sofern nur die Decke oder eine Wand als ungeschützte Holzoberfläche ausgeführt wurde. [1], [12]

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde im Rahmen der fünf abschließenden Realbrandversuche (Belegversuche) der Einfluss der immobilien Brandlast auf die Brandraumdynamik im Raum weiter untersucht. Die Versuche wurden mit einer sehr hohen, mobilen Brandlastdichte (1085 MJ/m²/ 90%-Quantil gemäß [13]) durchgeführt. Während der erste Versuch in einem vollständig gekapselten (nicht brennbaren äquivalent Stahlbeton, Mauerwerk) Raum durchgeführt wurde, wurde die Menge der freiliegenden Holzflächen anschließend vergrößert [1], [14], [15]. Einen Überblick über die Versuchskonfigurationen gibt Tab. 2.

Tab. 2: Versuchsübersicht der abschließenden Realbrandversuchsreihe (Belegversuche)

Versuch	V0	V1	V2	V3	V4
Raumgröße (B x L x H)	4,5 m x 4,5 m x 2,4 m			4,5 m x 9,0 m x 2,4 m	
Grundfläche	20,25 m ²			40,5 m ²	
Öffnungsgröße (B x H)	2,4 m x 2,2 m			4,2 m x 2,2 m	
Öffnungsfaktor	0,094 m ^{0,5}				
Brandlastdichte	1085 MJ/m ²				
Wand 1	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2x12,5 mm GF	150 mm BSP
Wand 2	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF
Wand 3	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2x18 mm GKF	140 mm HTB 2x18 mm GKF
Wand 4	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF
Decke	180 mm BSH 2x25 mm GKF	180 mm BSH	220 mm HTB 2x18mm GF	180 mm BSH	180 mm BSH
Lineare Bauteile	-	-	-	-	2x Stütze 1x Unterzug
Sichtbare Holzoberfläche*	-	35 %	37 %	42 %	58 %

BSP – Brettsperrholz; HTB – Holztafelbau mit Steinwolle gedämmt; BSH – Brettschichtholz; GKF – Gipskartonfeuerschutzplatte; GF – Gipsfaserplatte, Stütze – 300x300 mm² BSH; Unterzug – 300x320 mm² BSH

* bezogen auf alle vorhandenen Wand und Deckenflächen ohne Öffnung

Anhand dieser Versuchsreihe wird deutlich, dass die Brandraumtemperaturen in der Brandentwicklungsphase infolge identischer mobiler Brandlastdichte und identischem Zündvorgang fast keine Unterschiede aufwiesen. Die ab ca. der 10. Versuchsminute einsetzende Vollbrandphase zeigte bis zur 40. Versuchsminute ebenso nur geringfügige Unterschiede im Temperaturverlauf ($\Delta T < 150$ K), vgl. Abb. 10. Der Einfluss der ungeschützten bzw. anfänglich geschützten Holzbauteile war erst nach der 40. Versuchsminute sichtbar. Zusammenfassend können bei der Betrachtung der Temperatur-Zeit-Verläufe folgende Ergebnisse festgehalten werden [1], [14], [15]:

- Der Anteil an sichtbaren Holzoberflächen hatte in diesen Versuchen keinen messbaren Einfluss auf die Verläufe der Brandraumtemperaturen in der Aufheizphase.
- Bei allen Versuchen waren die höchsten Temperaturen im Bereich von 1.200 °C.

- Die Brandentwicklung (u.a. Zeit bis Flashover) ist bei allen Versuchen ähnlich schnell verlaufen, lediglich die Erhöhung der Raumgröße hatte einen geringen, aber erkennbaren Einfluss. Grund für dieses Verhalten in der Brandentwicklungsphase im Raum ist die zuvor erwähnte und für diese Versuche gewählte sehr hohe mobile Brandlastdichte. Damit ein Einfluss der zusätzlichen brennbaren Oberflächen (immobiler Brandlast) zum Tragen kommen könnte, wären mehr Sauerstoff bzw. eine noch größere Öffnungsfläche erforderlich gewesen [1], [14], [15]. Auch bei einer Reduktion der mobilen Brandlast würde ein entsprechender Einfluss der Holzoberflächen deutlich mehr hervortreten.
- Bei der Abkühlphase der Realbrandversuche ist hingegen ein deutlicher Einfluss der sichtbaren bzw. lediglich anfänglich geschützten Holzoberflächen erkennbar. Die zusätzlich vorhandenen Brandlasten (immobiler Brandlast) tragen dazu bei, dass die Abkühlphase länger anhält, die Brandraumtemperaturen also langsamer sinken oder sogar leicht ansteigen. [1], [14], [15]

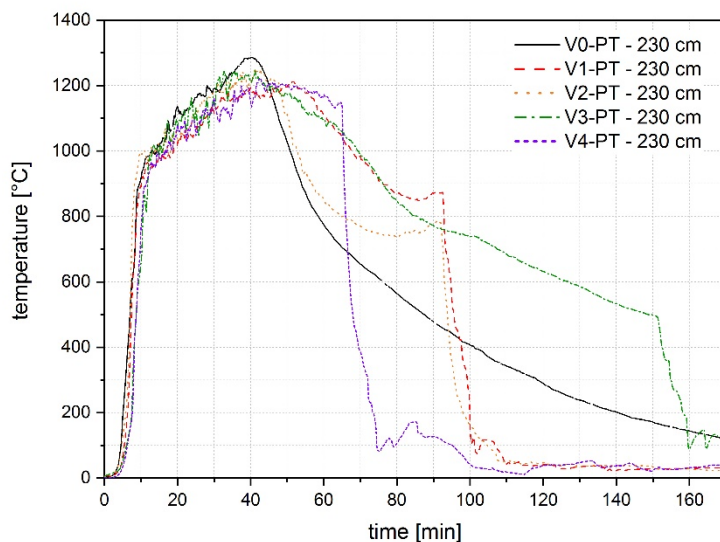


Abb. 10: Darstellung der Temperaturen im Brandraum gemessen an einem Plate-Thermoelement in 230 cm Höhe [16]

Ein weiteres Ziel der TIMpuls Studie war die Untersuchung der Veränderung der Brandeinwirkung durch ungeschützte Holzoberflächen oder nur anfänglich geschützte Holzbauteile auf die Fassade. [16]

Grundlage für die Untersuchung stellen ebenfalls die fünf Realbrandversuche dar [16], [14], [15]. Der Einfluss von freiliegenden bzw. nur anfangs geschützten Holzoberflächen auf die Brandeinwirkung auf die Fassade wurde anhand der gemessenen Gas-temperatur, Wärmefreisetzungsrates, Temperatur an der Fassade, Flammenhöhen, Wärmestrom und Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Fassade untersucht, siehe auszugsweise Abb. 11 und Abb. 12.

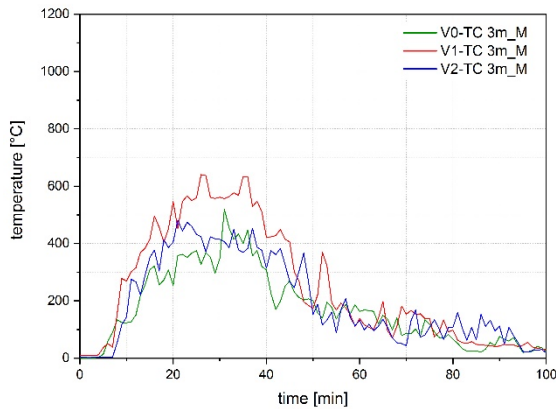


Abb. 11: Temperaturen an der Fassade 3 m über Sturz der Öffnung für Versuche V0, V1, V2 [16]

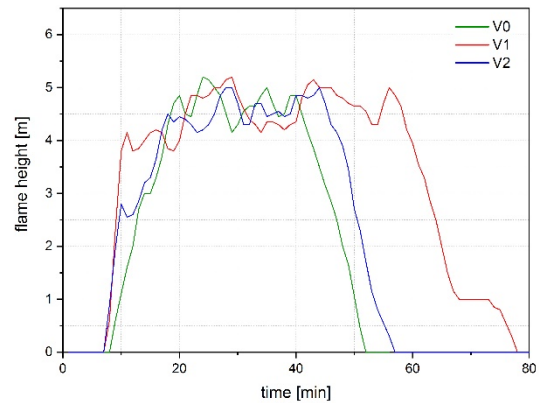


Abb. 12: Flammenhöhen an der Fassade über Sturz der Öffnung für Versuche V0, V1, V2 [16]

In der Wachstumsphase (Brandentwicklung bis Vollbrand Peak) des Brandes gibt es fast keine Unterschiede bei den Gastemperaturen und in der Vollbrandphase entstehen bezogen auf das Gesamt-Temperaturniveau geringe Unterschiede in den Temperaturkurven. Der wesentliche Einfluss der immobilen Brandlast wurde ebenso wie im Raum erst in der Abkühlphase sichtbar. Der Verlauf der Gastemperatur in der Abkühlphase wird also in erster Linie durch die freiliegenden bzw. nur anfangs geschützten Holzoberflächen bestimmt, die sich am Brand beteiligen (immobiler Brandlast). [16]

Die vorgenannten geringen Unterschiede der Temperaturen an der Fassade in der Vollbrandphase bei zusätzlicher immobiler Brandlast lassen sich im Vergleich zum Raum mit vollständig geschützter Oberfläche mit ca. 120 - 200 °C benennen, vgl. Abb. 11. Eine freiliegende Holzmassivdecke hat hier augenscheinlich jedoch einen größeren Einfluss auf die Fassade als freiliegende Holzmassivwände. Der spezifische Einfluss einer exponierten Decke auf die Brandbeanspruchung der Fassade sollte daher weiter untersucht werden. [16]

Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Flammenhöhe zwischen den Versuchen. Aufgrund der zusätzlichen immobilen Brandlast verlängert sich der Brandverlauf jedoch zeitlich. Der verlängerte Brand verursacht länger anhaltend höhere Flammen an der Fassade, vgl. Abb. 12. [16]

Eine freiliegende Massivholzdecke führt zu höheren Wärmeströmen an der Fassade als eine freiliegende Massivholzwand. Ergebnisse anderer Versuche zum einwirkenden Wärmestrom auf die Fassade zeigten etwa dreifache Werte für eine Holzmassivdecke gegenüber einer nicht brennbaren Decke [16], [17]. Entsprechende Größenordnungen konnten in dieser Versuchsreihe nicht bestätigt werden. Der Grund hierfür kann wiederum in den sehr hohen Brandlastdichten innerhalb der TIMpuls Versuche und der großen Breite der Öffnung gesucht werden. [16]

Darüber hinaus stützen die Ergebnisse der Strömungsmessungen an der Fassade die Hypothese, dass die Gasgeschwindigkeiten mit zunehmender immobiler Brandlast ansteigen. [16]

Insgesamt zeigt sich, dass die national und international vorliegenden Erkenntnisse aus Realbrandversuchen derzeit noch nicht ausreichen, um den Einfluss der immobilen Brandlast auf das Brandgeschehen im Raum und an der Fassade abschließend zu beschreiben. Da viele Faktoren, wie Geometrie, Öffnungsfläche, Anordnung der Holzoberflächen, Brandlastdichte, Raumgröße, Schutzzeiten von Bekleidungen etc. eine entscheidende Rolle spielen, können derzeit keine generellen Aussagen getroffen werden. Um dieses wichtige Thema weiter zu untersuchen und zu quantifizieren, sind zusätzliche Versuche in Originalgröße notwendig. Ablesbar ist jedoch, dass je mehr mobile Brandlast vorhanden ist, desto geringer wird der Einfluss der baulichen Brandlast in der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase. [16]

5 Grundsätzliche Anwendbarkeit von Decken und Wänden in Holztafelbauweise in der Gebäudeklasse 5 unterhalb der Hochhausgrenze

Die aktuelle Nichtberücksichtigung der Holztafel-/Holzrahmenbauweise für Bauteile abweichend zu feuerbeständig aus brennbaren Baustoffen ist mit Blick auf die Ergebnisse des Verbundforschungsvorhabens TIMpuls [1] aus brandschutztechnischer Sicht nicht weiter begründbar. Es bestehen keine Bedenken, entsprechende Bauteile und Anschlüsse für einen Feuerwiderstand von 90 Minuten auszubilden, sofern die bewährten Ausführungsregeln der M-HFHolzR [18] bzw. die der MHolzBauRL [9] adaptiv für die Gebäudeklasse 5 bis zur Hochhausgrenze in gleicher Weise übernommen werden.

Holztafelbauwände und -decken sind gemäß MHolzBauRL [9] mit mineralischer, nicht-brennbarer formstabiler Dämmung (Schmelzpunkt $\geq 1000^{\circ}\text{C}$) mit Übermaß voll ausgedämmt herzustellen, vgl. Abb. 13. Die raumseitig aufgebraachte brandschutztechnisch wirksame Bekleidung mit der Klassifizierung K_260 verhindert eine Brandbeanspruchung der Holzkonstruktion von mindestens 60 Minuten. Bezüglich der flächigen Schutzwirkung werden bei entsprechender Ausführung der Brandschutzbekleidungen aus 2×18 mm Gipskartonfeuerschutz- oder Gipsfaserplatten jedoch sogar Überkapazitäten der Schutzzeiten (t_{ch}) bei ETK-Normbrandbeanspruchung, mit bis zu 90 Minuten erreicht, vgl. Abb. 9. Eine Beteiligung der Holzrippen (Schwelle, Ständer, Rähm) am Brandgeschehen und Hohlraumbrände werden so ausgeschlossen. Nach dem Versagen der Brandschutzbekleidung werden die Holzrippen im Holztafel-/Holzrahmenbau innerhalb der Gefache durch den Gefachdämmstoff (nicht brennbare Dämmung mit einem Schmelzpunkt $\geq 1000^{\circ}\text{C}$) geschützt, wodurch nur ein einseitiger Abbrand an der Schmalseite stattfinden kann und ein seitlicher Einbrand bzw. Hohlraumbrände verhindert werden, vgl. Abb. 14. [1]



Abb. 13: Holztafelbauwand Steinwolldämmstoff im Gefach – vor dem Aufbringen der Bekleidung



Abb. 14: Schutzwirkung der Steinwolldämmung für die Gefache, V2

Der mögliche Beitrag der Tragkonstruktion von Holztafelbauteilen nach Versagen der Brandschutzbekleidung zur Branddynamik im Raum ist gegenüber Massivholzbauteilen als gering anzusehen, was durch die Versuchsbeobachtungen in [1] verdeutlicht wird. Dies lässt sich bereits auch aus dem Vergleich der Flächenanteile ableiten, da die typischerweise 60 mm breiten Holzrippen nur in einem Abstand von 625 mm vorliegen. In Folge der nichtbrennbaren formstabilen Dämmung ist nur von einem Abbrand der Schmalseiten der Konstruktionshölzer auszugehen. Bei Verwendung von Holzwerkstoffen zur Aussteifung hinter der Brandschutzbekleidung kann sich der Einfluss auf die Brandraumdynamik zwar erhöhen, bleibt aber im direkten Vergleich zur Massivholzbauweise nach wie vor gering, da die geringe Dicke der Holzwerkstoffplatten nur einen zeitlich sehr begrenzten Beitrag zur Wärmefreisetzung liefert. [1]

Basierend aus den durchgeführten Versuchen [1] war ebenso ersichtlich, dass Anschlüsse im Holztafelbau und Massivholzanschlüsse prinzipielle gleichwertig angesehen werden können. Entsprechend brandschutztechnisch sichere Anschlüsse können somit auch für den Holztafelbau erreicht werden. Hierauf wird im nachfolgenden Abschnitt spezifischer eingegangen.

6 Verifizierung von typischen Anschlussprinzipien unter Realbrandbeanspruchung

Bauteilanschlüsse und Elementfüugungen gehören brandschutztechnisch mit zu den kritischsten Übertragungswegen und bedürfen somit einer eingehenden Planung oder Ausführung, um eine vorzeitige Brandausbreitung auszuschließen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass im Anschlussbereich der Bauteile der gleiche Feuerwiderstand wie an den flächigen Wand- oder Deckenbauteilen erreicht wird. Besonders im

Bereich des mehrgeschossigen Holzbaus hat dieser Aspekt in den letzten Jahren immer wieder zu Diskussionen und Bedenken geführt, wodurch zugehörige Untersuchungen zu dieser Thematik auch in das Forschungsprojekt TIMpuls [1] einfließen. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus früheren Forschungsvorhaben, wie beispielsweise dataholz [19] oder aus dem Projekt HolzbauRLBW [20] wurden in den TIMpuls Versuchen entsprechende Bauteilanschlüsse und Elementfüugungen integriert. Infolgedessen konnte die entwickelte und bisher unter ETK-Beanspruchung untersuchte Systematik [21] auch unter Realbrandbeanspruchungen hinsichtlich ihrer Gültigkeit überprüft werden.

In Abb. 15, Abb. 16 und Abb. 17 ist eine Auswahl von Wand-Decken-Anschlüsse aus den Belegversuchen dargestellt. Es wird immer die geplante Ausführung und das dokumentierte Endresultat beim Rückbau gezeigt.

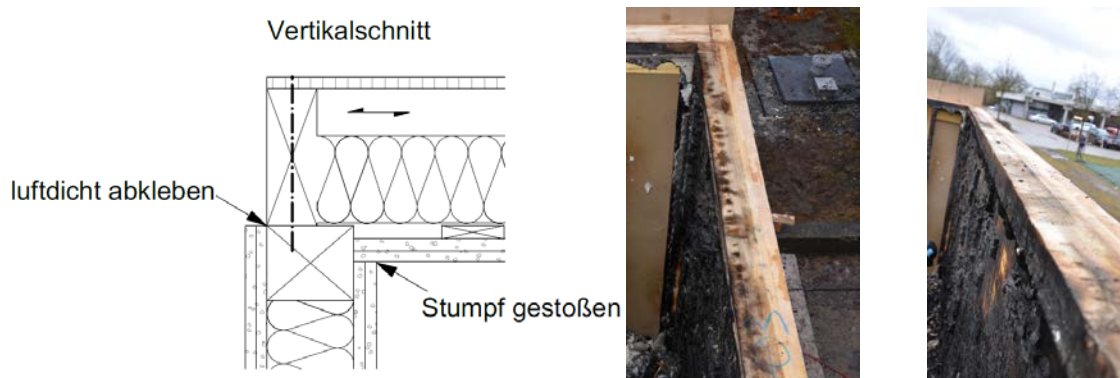


Abb. 15: V2 – Bauteilanschluss – Decke - Wand 4



Abb. 16: V4 - Bauteilanschluss – Decke - Wand 3



Abb. 17: V4 - Bauteilanschluss – Decke - Wand 1

Bei den Realbrandversuchen konnte kein Versagen, der nach den bekannten Konstruktionsregeln [19], [20], [21] handwerklich einwandfrei ausgeführten Bauteilanschlüsse und Elementfügungen während der Versuchsdauer beobachtet werden. Ebenso trat bei entsprechender Ausführung kein zusätzlicher Abbrand größer als der der flächigen Bauteile auf. Einzig gezielt mangelhaft ausgeführte Anschlüsse mit z.B. fehlender kraftschlüssiger Verbindung oder mit konvektiver Durchströmung im Fugenspalt führten zu kritischen Zuständen [1]. Die Ergebnisse bestätigen nochmals, dass brandschutztechnisch sichere Bauteilanschlüsse in Holztafel- und Massivholzbauweise auf Basis bekannter Konstruktionsregeln erreicht werden und so die Brandausbreitung (Feuer und Rauch) sowie ein negativer Einfluss auf die Standsicherheit ausgeschlossen sind.

Die zur Verfügung stehenden Anschlussprinzipien der MHolzBauRL [9] sind aktuell noch sehr begrenzt. So ist beispielweise kein Prinzip für die Ausbildung eines Schallschuttlagers (Elastomer) im Wand-Decken Anschluss dargestellt. Das Informationsdienst Holz Heft „Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5 Holz“ [21] bietet für abweichende Anschlüsse eine gute Orientierungshilfe für brandschutztechnisch sichere Prinzipien. Zu beachten bleibt jedoch der Abschnitt 3.1 MHolzBauRL „Soweit Anschlüsse nicht in dieser Richtlinie beschrieben sind, bedarf es eines Anwendbarkeitsnachweises gemäß § 16a MBO“. [9] Der Weg über vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen wird daher vorerst noch ein üblicher Weg für den Holzbau bleiben bis neue technische Baubestimmungen hierfür vorliegen.

7 Aus der Praxis zum 22. SVT Brandschutz (2021) Holzfassade

Holzfassade - Brandsperrre - Regenfallrohr

Wie auf den 22. EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz 2021 [22] vorgestellt stehen mit der MHolzBauRL [9] auf Basis der Studie [23] gute Grundlagen für die Planung und Ausführung von brandschutztechnisch sicheren Fassaden aus Holz zur Verfügung. Im Rahmen der Planungen von diversen Bauvorhaben und den daraus resultierenden Anfragen zeigte sich, dass die Kombination von Regenfallrohren und den horizontalen Brandsperrren aktuell nicht abschließend geklärt ist, vgl. Abb. 18. Der Einbau eines brennbaren Regenfallrohrs (z.B. Polyethylen) oder beispielsweise eines Kupfer- oder Aluminium-Regenfallrohrs innerhalb der Brandsperrre stellt keine brandschutztechnisch sichere Lösung dar.

Als brandschutztechnisch sichere Lösung wird angesehen:

- Regenfallrohr aus Stahlblech mit einem Blechdurchmesser $\geq 1,5$ mm
- Abstand des Regenfallrohrs und der Durchführung von ≥ 50 mm zur Holzschalung
- Ringspalt zwischen Regenfallrohr und Brandsperrre ≤ 2 mm

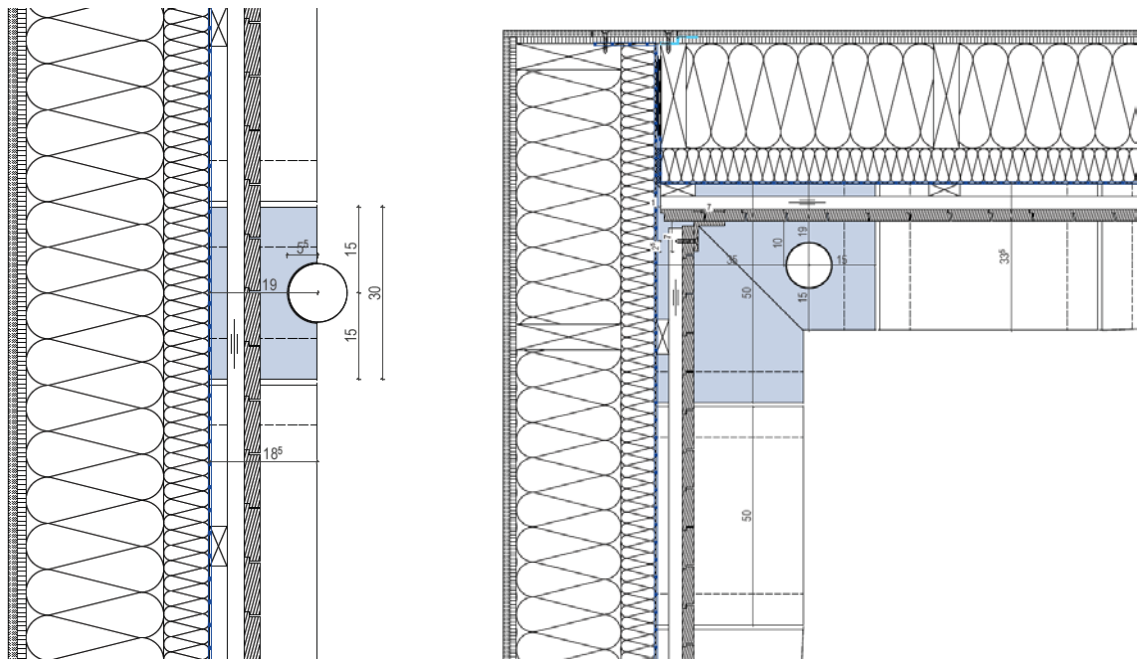


Abb. 18: Horizontalschnitt mit Verlauf eines Regenfallrohrs durch eine horizontale Brandsperre entlang des Gebäudes und in der Innenecke

Holzfassade - Brandsperre - Aluminium

Ein weiterer immer wieder auftretender Punkt ist die Ausführung von Brandsperren oder Fassadenkonstruktionen wie Rollschienen oder Befestigungen von Fassaden aus Aluminium. Aluminium besitzt einen Schmelzpunkt von ca. 660°C und ist daher kein geeigneter Baustoff für Brandsperren. Auch die Verwendung von Aluminium-Rollschienen für Teile der Holzfassade oder von Aluminium-Befestigungselementen für Holzfassade können durch das frühzeitige Herabfallen von Fassadenteilen im Brandfall zu brandschutztechnisch kritischen Ereignissen führen. Aluminium sollte daher im Bereich von Holzfassaden nicht für maßgebende baukonstruktive Maßnahmen herangezogen werden.

7 Fazit

Aus den Untersuchungen im Verbundforschungsvorhaben TIMpuls [1] wird ersichtlich, dass ein brandschutztechnisch sicheres Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze möglich ist und die bisherigen Regelungen der MHolzBauRL [9] in Teilbereichen unter Berücksichtigung des Sicherheitsniveaus weiterentwickelt werden könnten.

Dies umfasst vor allem konstruktive Lösungen. Eine der maßgebendsten Empfehlungen ist, dass auch die Holztafelbauweise die Eignung für das mehrgeschossige Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze erfährt. Ebenso kann bestätigt werden, dass brandschutztechnisch sichere Anschlüsse, die bisher unter ETK-Normbrand hinsichtlich der Brandausbreitung (Feuer und Rauch) bewertet wurden auch unter Realbrandbedingungen voll funktionsfähig sind.

Ausblick

Für den Holzbau konnten mittels dem Verbundforschungsvorhaben TIMpuls [1] bereits förderliche Erkenntnisse gewonnen werden, jedoch übersteigen die gewonnenen Daten die im Projekt vorhandenen Kapazitäten der Forschungspartner, so dass eine weiterführende Auswertung vorgesehen ist. Ein zugehöriges Folgeprojekt wird hierbei ebenso auf die Ergebnisvermittlung und das Schaffen eines ganzheitlichen Verständnisses bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen des Bauens mit Holz eingehen.

Danksagung

Das Vorhaben wurde dankenswerterweise vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert. Eine umfangreiche Kofinanzierung der Holzwirtschaft erfolgte koordinierend über den Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks.

Literatur

- [1] Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Butscher, D.; Kurzer, C.; Werther, N.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Neske, M. (2022) Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls - Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; Gülzow-Prüzen <https://doi.org/10.14459/2022md1661419>
- [2] DIN EN 1995-1-2:2010-12 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Berlin: Beuth. Ausgabe Dez. 2010
- [3] Werther, N. (2016) Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren [Dissertation]. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München
- [4] Werther, N.; Schmid, J.; Fahrni, R.; Klippel, M. (2022) Hintergründe und Nachweisgrundlagen zur Brandschutzbemessung von Brettsperrholzkonstruktionen – Teil 1. Bautechnik 99, H. 8, S. 587–593. <https://doi.org/10.1002/bate.202200041>
- [5] prEN 1995-1-2:2020 (E) (2021) Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: Structural fire design. Final draft Sep. 5, 2021 for informal Enquiry
- [6] Rauch, M.; Suttner, E.; Werther, N. (2022) F-REI 90 – Ein analytisches Berechnungsverfahren für Holzrahmen- und Holzmassivbauteile bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. BBSR-Online-Publikation 2/2022
- [7] DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2003; 2003-12 – aktuelle Fassung 2016-12

- [8] DIN EN 14135: Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung; Deutsche Fassung EN 14135:2004-11
- [9] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL); Fassung Oktober 2020
- [10] DIN EN 13381-7: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile; Deutsche Fassung EN 13381-7:2019-09
- [11] ISO 9705-1:2016-02 (2016) Reaction to fire tests - Room corner test for wall and ceiling lining products - Part 1: Test method for a small room configuration.
- [12] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2020) Experimental and Numerical Analysis of Fire Development in Compartment Fires with Immobile Fire Load. International Scientific Conference on Woods & Fire Safety. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_28
- [13] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
- [14] Engel, T.; Kurzer, C.; Werther, N.; Brunkhorst, S.; Winter, S.: Aus der Forschung: TIMpuls - mehrgeschossige Holzbauten unter Feuer. FeuerTrutz Brandschutzkongress 2021.
- [15] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J.; Engel, T.; Kurzer, C.; Werther, N.; Steeger, F.; Butscher, D.: TIMpuls Grossversuche an Holzbauten. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021 in Braunschweig.
- [16] Engel, T.; Werther, N. (2022) Impact of mass timber compartment fires on the façade fire exposure; Fire Technology [Manuscript submitted for publication]
- [17] Épernon Fire Tests Programme (2020) Synthesis Report; Report n° EFTP-2020/01; October 13, 2020. <http://www.epernon-fire-tests.eu/>
- [18] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR); Fassung Juli 2004
- [19] Rauch, M.; Werther, N.; Kurzer, C.; Winter, S.; Kaufmann, H.; et al (2019) dataholz.de - Abschlussbericht zum Forschungsprojekt dataholz.de. München, 2019
- [20] Dederich, L.; Sudhoff, P.; Kampmeier, B.; Rüter, N.; Winter, S.; Suttner, E.; Werther, N.: HolzbauRLBW - Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Rotenburg, 2020
- [21] Dederich, L.; Rüter, N.; Sudhoff, P.; Kampmeier, B.; Suttner, E. Werther, N.; Winter, S. (2021): Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5; Informationsdienst Holz
- [22] Engel, T. (2021) Aktuelle Erkenntnisse zur Planung von Holzfassaden. Tagungsband der EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz 2021
- [23] Engel, T., Werther, N. (2021) Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. Fire Technol. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2>



Engel, Thomas
M.Sc.

- 2006–2013 Studium Bauingenieurwesen Technische Universität München
- 2014–2017 Projektleiter Brandschutzplanung und Fachbauleitung
Brandschutz bei hhpberlin Ingenieure für den Brandschutz GmbH
- seit 2015 Kommandant einer Abteilung der Freiw. Feuerwehr München
- 2017-2021 Nebentätigkeit als Brandschutzingenieur und –sachverständiger
für das Büro FIRE & TIMBER .ING
- seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und
Baukonstruktion der Technischen Universität München und
Projektleiter der Verbundforschungsvorhaben TIMpuls und
FireSafeGreen
- seit 2022 Nebentätigkeit im eigenen Büro für Brandingenieurwesen
-