

TIMPULS GROSSVERSUCHE AN HOLZBAUTEN

Sven Brunkhorst und Jochen Zehfuß
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische
Universität Braunschweig, Braunschweig

Thomas Engel, Christoph Kurzer, Norman Werther
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München,
München

Felix Steeger,
Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion, Hochschule Magdeburg-Stendal,
Magdeburg

Daniel Butscher,
Abteilung Forschung, Institut für Brand- und Katastrophenschutz,
Heyrothsberge

EINLEITUNG

Im Verbundforschungsvorhaben TIMpuls [1], [2] der Technischen Universität München, der Technischen Universität Braunschweig, der Hochschule Magdeburg-Stendal und dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge erfolgt die Erarbeitung eines wissenschaftlich begründeten Nachweises, um die unbedenkliche Verwendbarkeit tragender und raumabschließender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze zu ermöglichen. Auf Basis umfangreicher experimenteller und numerischer Untersuchungen werden die erforderlichen Grundlagen zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Brandschutzregelungen für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus erarbeitet.

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

ZIELSETZUNG DER BELEGVERSUCHE

Aufbauend auf eine Vielzahl an klein-, mittel- und großskaligen Brandversuchen [3], [4], [5], [6] und [7] sowie theoretischen Arbeiten folgte die Planung und Durchführung von abschließenden Belegversuchen an Holzkonstruktionen [8], [9] und [10], welche zur Bestätigung der im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse dienen. Die Belegversuche wurden vom 11. Januar bis zum 12. Februar 2021 auf dem Außengelände der Feuerwehr der TU München des Forschungscampus in Garching durchgeführt. Die Ergebnisse der Belegversuche sind als Grundlage zum Nachweis der bauordnungsrechtlichen

Schutzziele respektive der entsprechenden funktionalen Anforderungen anzusehen.

Analysiert werden in den Belegversuchen Raumbrände von Holzkonstruktionen mit mobilen Brandlasten entsprechend der normativen Regelung und bautypischen Bauteilausführungen sowie Fügungen. Besonders die sich ändernde Branddynamik zwischen teilweise ungeschützten, anfänglich geschützten und vollständig geschützten Holzoberflächen ist hierbei von essentieller Bedeutung, wie auch die raumabschließende Funktion der betrachteten Element- und Anschlussfugen.

Die konkreten Ziele der Belegversuche lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Skalierbarkeit:
Bestätigung der Erkenntnisse aus den klein-, mittel- und großskaligen Brandversuchen,
- Branddynamik bei ungeschützten Massivholzbauteilen;
Einfluss auf die drei Brandphasen (Brandentwicklung-, Vollbrand- und Abklingphase), das Nachbrandverhalten inkl. möglichem Selbstverlöschen sowie thermische Einwirkung auf die aufgehende Fassade,
- Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung:
Schutzwirkung / Versagen der Brandschutzbekleidung und Einfluss auf die Branddynamik durch Mitbrennen der anfänglich geschützten Bauteile,
- Leistungsfähigkeit abwehrender Maßnahmen:
Wirksamkeit von abwehrenden Maßnahmen (Löschbarkeit), Umfang der Nachlöscharbeiten (z. B. Detektion von Glimmnestern, etc.),
- Raumabschluss:
Überprüfung von baulichen Brandschutzmaßnahmen im Stoß- und Fügungsbereichen von Bauteilen sowie Elementen bzgl. der raumabschließenden Funktion,
- Baurechtlichen Vorgaben:
Überprüfung der baulichen Vorgaben des Entwurfes der M-HolzBauRL [11] bei realer Brandbeanspruchung.

KONZEPTION DER BELEGVERSUCHE

Entsprechend der benannten Untersuchungsziele folgte die Ausarbeitung von fünf Belegversuchen mit zwei unterschiedlichen Grundrissen, die in Bild 1 dargestellt werden. Die Gebäudegeometrie der ersten drei Belegversuche (V0 – V2) ist hinsichtlich der Grundfläche angelehnt an die Großbrandversuche im Brandofen zu 20,25 m² festgelegt. Mit zwei zusätzlichen Belegversuche mit einer Grundfläche von 40,50 m² findet eine Bewertung der Skalierbarkeit innerhalb der Belegversuche statt. Jeder Versuchsaufbau ist mit einem 5,0 m hohen, aufgehenden Fassadenschwert ausgestattet. Für beide Geometrien ist der

Öffnungsfaktor von $O = 0,094 \text{ m}^{0,5}$ identisch zu dem Öffnungsfaktor der den repräsentativen Naturbrandkurven [2] zugrunde liegt.

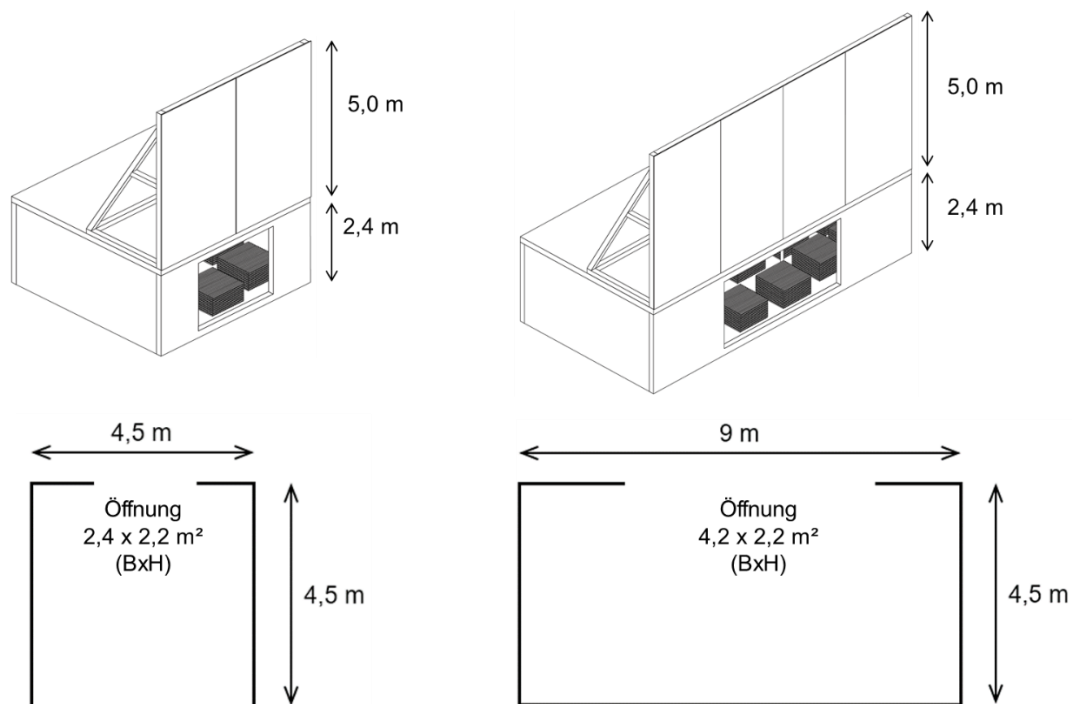


Bild 1 Abmessungen der zwei betrachteten Belegversuchsgeometrien (alle angegebenen Maße sind Innenabmessungen)

In den Belegversuchen wurde mit einer mobilen Brandlastdichte entsprechend dem 90 %-Quantil einer Wohnnutzung gemäß [12] von 1.085 MJ/m^2 vorgesehen. Die mobile Brandlast wird aufgrund der Reproduzierbarkeit über Holzkippen abgebildet, wie Bild 2 zeigt. Die Holzkippen bestehen aus kreuzweise gestapelten und verklammerten Stäben aus sägerauem Kiefernholz der Sortierklasse S10 nach [13]. Die einzelnen Stäbe haben eine Abmessung von $40 \times 40 \times 1000 \text{ mm}^3$ (B x H x L), wodurch die Holzkippe eine Grundfläche von $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ besitzt. Die Klammerung im Kreuzungspunkt der Stäbe erfolgte in zwei Umläufen, außen mit 13×13 Klammern und innen mit 7×7 Klammern. Das Masse-Luft-Verhältnis der Holzkippen entspricht dabei 1:1. Es erfolgte keine klimatische Konditionierung des Feuchtegehaltes der Holzkippen. Zur Entzündung der Brandlast werden in zwei Holzkippen jeweils zwei Zündwannen $39 \times 39 \times 1200 \text{ mm}^3$ (B x H x L) mit je 200 ml Isopropanol (Propan-2-ol) verwendet.

Die angesetzte Brandlastdichte ergibt unter Annahme eines Heizwertes von $17,28 \text{ MJ/kg}$, einer Holzfeuchte von 14 M.-% und einer Holzdichte von 580 kg/m^3 eine Brandlastbelegung von ca. 74 kg/m^2 , welches bei einer Grundfläche von $20,25 \text{ m}^2$ ein Gesamtgewicht der Holzkippen von 1,5 t (bei $40,5 \text{ m}^2 \rightarrow 3 \text{ t}$) entspricht.

Die Verteilung der mobilen Brandlast bzw. Holzkippen ist in Bild 3 ersichtlich. Die rot dargestellten Holzkippen stellen die beiden Holzkippen mit Zündwannen

BAUTEILAUFBAUTEN

Zur Darstellung von relevanten baupraktischen Ausführungen im Holzbau als auch der Untersuchung der baulichen Anforderungen der Bauordnungen (z. B. [11]) wurden unterschiedliche Wand- und Deckenkonstruktionen erarbeitet. Hierbei erfolgten neben der Verwendung der bisherigen erzielten Erkenntnisse des Forschungsvorhabens TIMpuls auch Abstimmungen mit den beteiligten Partnern aus der Praxis sowie das Heranziehen der bewährten Datenbank für klassifizierte Holzbauteile dataholz.eu [14]. In Tabelle 1 ist die Versuchsmatrix der Belegversuche, mit separater Darstellung der Bauweise des Wand- bzw. Deckenbauteils als auch der Brandschutzbekleidung für jeden Versuch, dargestellt. Die farbliche Hinterlegung gibt einen einfachen Überblick über die ungeschützte Ausführung von Massivholzbauteilen. Die Zuordnung der Wandbezeichnungen ist in Bild 4 abgebildet.

Tabelle 1 Versuchsmatrix der Belegversuche [8]

Versuch	V0	V1	V2	V3	V4
Wand 01	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 02	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 03	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 04	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	-	-	-	-	2 x Stütze 1 x Unterzug
A _{bb} bei t ₀	0 %	35 %*	37 %*	42 %*	58 %*

BSP – Brettsperrholz; HTB – Holztafelbau mit Steinwolle nach [11] gedämmt; BSH – Brettschichtholz; GKF – Gipskarton-Feuerschutzplatte; GF – Gipsfaserplatte; Stütze – 300x300 mm² BSH; Unterzug – 300x320 mm² BSH

* Die Zeile „A_{bb} bei t₀“ beschreibt das prozentuale Verhältnis der Fläche an ungeschützten Holzoberflächen zu Versuchsbeginn (A_{bb}) zur maximal möglichen Fläche an ungeschützten Holzoberflächen ausgenommen dem Fußboden und der Öffnung.

Der Ausgangsversuch V0 diente als Referenzversuch zu einer Bauweise aus nichtbrennbaren Baustoffen. Hierfür ist eine bewusst massive Brandschutzbekleidung raumseitig der Massivholzbauteile aus 2 x 25 mm Gipskarton-Feuerschutzplatten nach [15] angeordnet, um die dahinterliegenden Massivholzbauteile vollständig zu schützen.

Eine Analyse der Branddynamik bei einer Ausführung von Massivholzbauteilen gemäß der baulichen Anforderungen aus [11], in Form einer ungeschützten Decke und die anfänglich geschützten Wände mit 1 x 18 mm Gipsfaserplatten nach [16], folgte in V1. Aufgrund des Ressourcenschutzes wurde der unbeschädigte Versuchsaufbau aus V0 hier wiederverwendet und hinsichtlich der Ausbildung der Brandschutzbekleidung angepasst.

Basierend auf den Erkenntnissen mittelmaßstäblicher Raumbranduntersuchungen [5], die bei zwei gegenüberliegenden ungeschützten Holzflächen aufgrund thermischer Strahlung kein Selbstverlöschten zeigten, folgte in V2 die Analyse dieses Effektes im Realmaßstab. Die Decke und die zwei Wände wurden in diesem Versuch in Holztafelbauweise ausgeführt. Die Brandschutzbekleidungen der anfänglich geschützten Holztafelbauteile waren gemäß der positiven Ergebnisse aus vorangegangenen Untersuchungen mit thermischer Einwirkung gemäß einer repräsentativen Naturbrandkurve mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten nach [16] ausgebildet.

In V3 wurde der Versuchsaufbau so gewählt, dass sich im Brandverlauf ein Selbstverlöschten einstellen soll. Entsprechend war nur die Decke ungeschützt ausgeführt und die Wände mit einer Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm sowie 2 x 12,5 mm Gipsplatten versehen.

Eine Untersuchung der Branddynamik bei einem großen Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Holzflächen sowie des Einflusses der linearen Bauteile fand in V4 statt. Des Weiteren erfolgte hier die Analyse der Wirksamkeit der abwehrenden Maßnahmen durch die Feuerwehr.

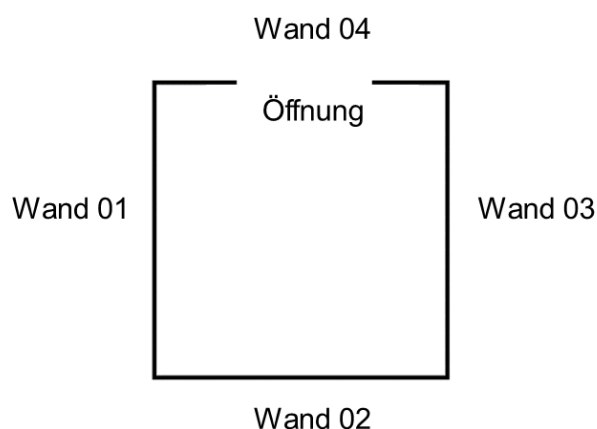
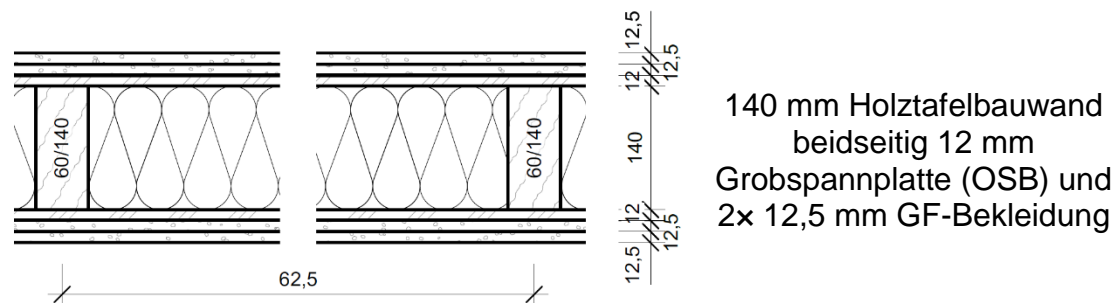
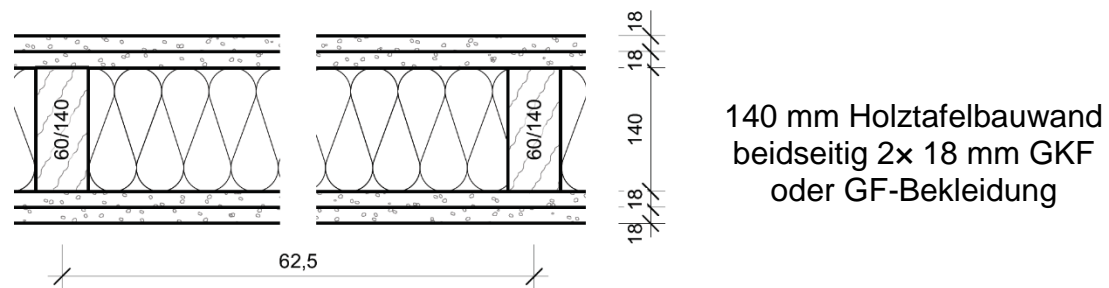
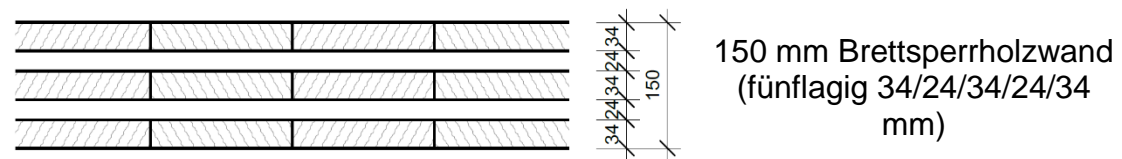
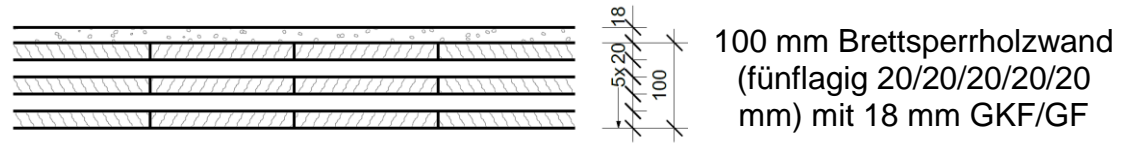


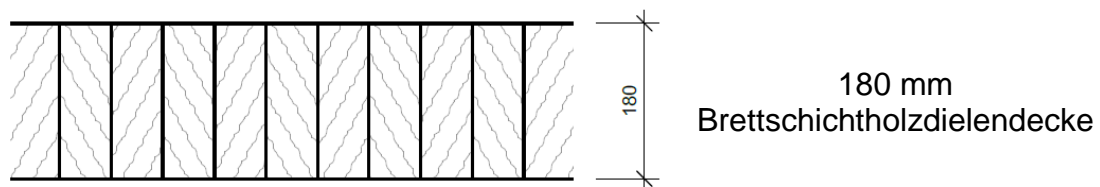
Bild 4: Grundriss mit Zuordnung der Wandbezeichnungen

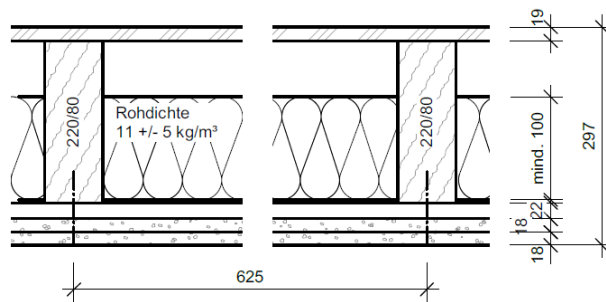
Tabelle 2 Auflistung der unterschiedlichen Wand- und Deckenaufbauten [8]

Wandaufbauten



Deckenaufbauten





220 mm Holztafelbaudecke
mit 22 mm Abhängung und
2x 18 mm GF-Bekleidung

Ergänzend zu den Angaben in Tabelle 1 folgt in Tabelle 2 eine Konkretisierung der untersuchten Wand- bzw. Deckenaufbauten. Die Befestigung der Brandschutzbekleidung wurde gemäß den Herstellerangaben bzw. nach [11] durchgeführt. Ein Verspachteln der Stoßfugen fand nur bei den Brandschutzbekleidungen aus Gipskarton-Feuerschutzplatten statt.

Der Fußbodenaufbau setzte sich aus 120 mm starken Brettschichtholzelementen geschützt mit 3 x 18 mm Gipskarton-Feuerschutzplatten zusammen. Nach jedem Versuchsdurchlauf wurden die zu stark durchwärmten Lagen der Brandschutzbekleidung ausgetauscht.

Die Montage der vorgefertigten Versuchsaufbauten erfolgte erst auf dem Versuchsgelände der Technischen Universität München am Forschungscampus Garching. Für die Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung der Bauteile waren sämtliche Bauteil- oder Elementanschlüsse mit Teilgewindeschrauben im Abstand von 500 mm verschraubt. Zur getrennten Erfassung des Massenverlustes der mobilen Brandlast (Fußboden) und der aufgehenden Konstruktion (Wände + Decke) war der Fußboden entkoppelt gelagert. Dementsprechend stand der Versuchsaufbau auf zwei getrennten, rahmenförmigen Unterbauten.

Die Planung sowie Ausführung der Bauteilanschlüsse und die Elementstöße sind gemäß den gängigen, baupraktischen Vorgaben (inkl. Spaltmaß bis zu 20 mm) als auch den Erkenntnissen aus [17] und [18] vorgenommen. Ein Auszug der Summe an untersuchten Anschlussdetails der Bauteile ist in Bild 5 bzw. für die Elementstöße in Bild 6 gegeben.

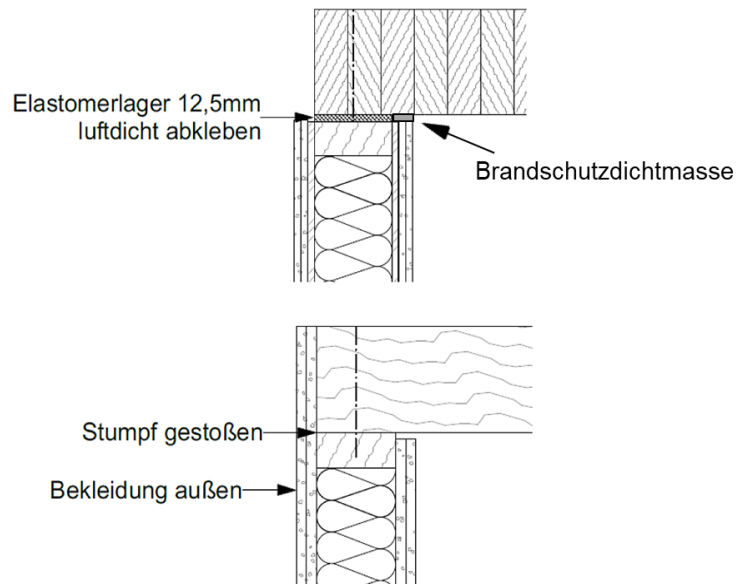


Bild 5 Darstellung von zwei beispielhaften Bauteilanschlüssen (Wand-Decke)

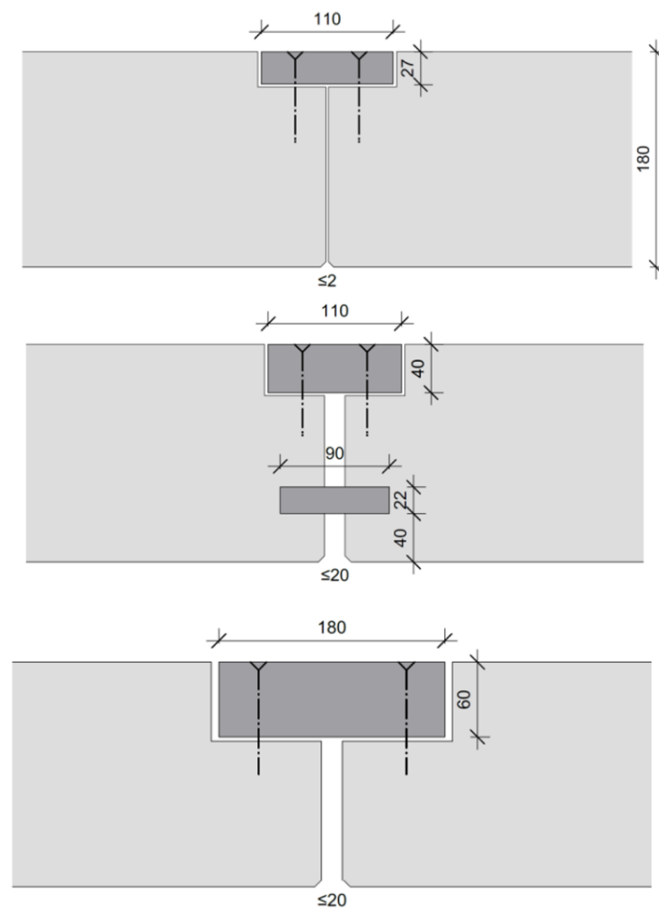


Bild 6 Darstellung von drei beispielhaften Elementstößen der ungeschützten Brettsichtholzdecke

MESSTECHNIK DER BELEGVERSUCHE

Zur Beurteilung der gesetzten Ziele waren die Belegversuche mit einer Vielzahl an unterschiedlicher Messtechnik ausgestattet. Die Erfassung der Bauteiltemperaturen wurde über NiCr-Ni-Thermoelemente vom Typ K mit glassseidenisolierten Signalleitungen realisiert. Während der Vorfertigung fand die Anordnung innerhalb der Bauteilfläche als auch in den Anschluss- und Elementfugen statt. Die Dokumentation der Brandraumtemperaturen erfolgte über vier bzw. sechs Messbäume mit fünf über die Höhe verteilten Mantelthermoelementen vom Typ K sowie jeweils zwei an Decke und Wand 01 angeordnete Plate-Thermoelemente.

Für Aussagen zur Temperaturentwicklung an der Fassade war das Fassadenschwert mit einem Messraster 20 mm vor der Oberfläche ausgestattet. Die verwendeten Mantelthermoelemente (Typ K) waren dabei in unterschiedlichen Höhen und seitlichen Abständen ausgehend von der Öffnungsmitte positioniert.

Infolge der entkoppelten Konstruktion zwischen Fußboden und aufgehendem Gebäude ermöglichten die positionierten Kraftmessdosen die getrennte Erfassung der Massenverluste. Über die aufgezeichneten Massenverluste lassen sich die Massenverlustrate und die Wärmefreisetzungsrate für die mobile und strukturelle Brandlast berechnen.

Die Anordnung von bidirektionalen Sonden zur Erfassung von Differenzdrücken in Kombination mit Mantelthermoelementen (Typ K) zur Temperaturmessung ermöglicht die Berechnung der Strömungsraten. Die Erfassung der Strömungsraten wurde auf der linken und rechten Seite der Öffnung in unterschiedlichen Höhen, im Brandraum an der Decke sowie an Wand 01 und am Fassadenschwert vorgenommen.

Zusammengefasst wurden innerhalb der Belegversuche zwischen 300 und 500 Messsignale pro Versuch mit einer Abtastfrequenz von 1 – 15 Sekunden erfasst und aufgezeichnet.

VERSUCHSAUSWERTUNG

Nachfolgend werden für die fünf Belegversuche (Bild 7) eine Auswertung hinsichtlich der Brandraumtemperaturen, der Massenverlustrate respektive Wärmefreisetzungsrate, der Temperaturentwicklung in den Bauteilen sowie auf der Fassade dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrages wurden die Ergebnisse der Belegversuche noch detailliert ausgewertet. Die hier vorgenommene Auswertung stellt somit einen Zwischenstand der Erkenntnisse der Belegversuche dar.



Bild 7 Aufnahmen während der Versuchsdurchführung von V1 (links) und V4 (rechts)

Brandraumtemperaturen

Eine Gegenüberstellung der Brandraumtemperaturen erfolgt über die Messdaten der Plate-Thermoelemente (PL), welche entsprechend [19] 100 mm unterhalb der Decke angeordnet waren. Bild 8 zeigt die Gegenüberstellung der gemittelten Versuchsdaten der Versuche V0 bis V4, zusätzlich ist die normative Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) zur Einordnung mit dargestellt.

Zunächst wird deutlich, dass die Brandraumtemperaturen der Versuche V0 bis V4 in der Brandentwicklungsphase infolge identischer mobiler Brandlastdichte sowie des gleichen Zündvorgangs nahezu keine Unterschiede aufweisen. Die ab der ca. 10. Versuchsminute einsetzende Vollbrandphase zeigt bis zur 40. Versuchsminute nur geringfügige Unterschiede im Temperaturverlauf ($\Delta T < 150 \text{ K}$) zwischen den Versuchen auf. Der Einfluss der ungeschützten bzw. anfänglich geschützten Holzbauteile ist erst nach der 40. Versuchsminute sichtbar.

Für V0 lässt sich nach der stationären Brandphase die Abklingphase erkennen, welche sich durch das vollständige Umsetzen der mobilen Brandlast (Ausbrand) darstellt. Aufgrund der über alle Versuche gleichbleibenden Randbedingungen - Ventilationsbedingung und mobile Brandlastdichte - endet die Vollbrandphase der mobilen Brandlast im Zeitbereich 40. – 50. Versuchsminute je nach Menge der sich am Brand beteiligten Holzflächen der Versuche. Der Verlauf der Brandraumtemperaturen im Anschluss der Vollbrandphase innerhalb der Abklingphase wird somit primär über die sich am Brand beteiligten Holzflächen (strukturelle Brandlast) definiert.

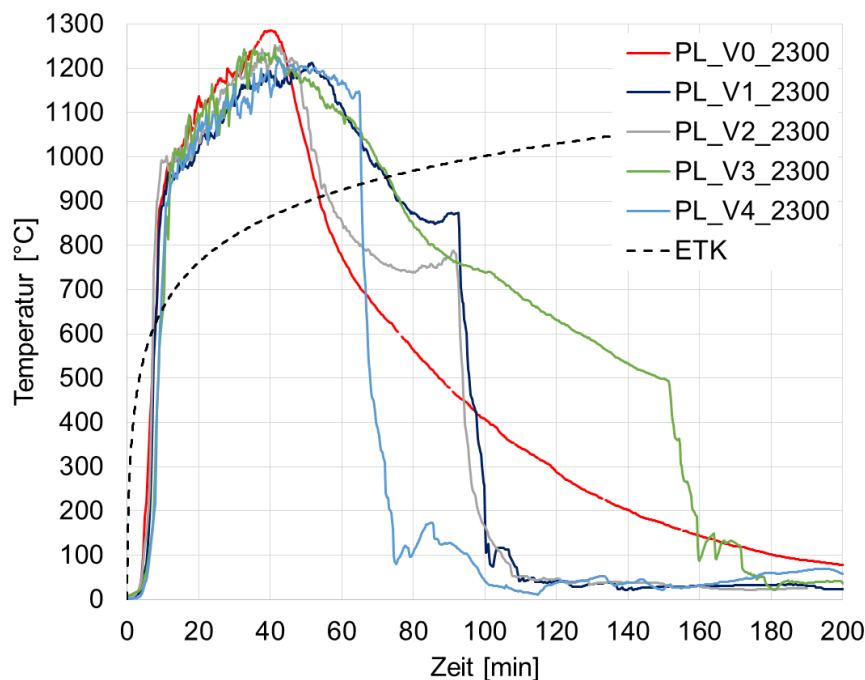


Bild 8 Vergleich der Brandraumtemperaturen der Belegversuche in 2300 mm Höhe

Zu V1 ist anzumerken, dass die Brandschutzbekleidung der Massivholzwände aus 1 x 18 mm Gipsfaserplatten nach ca. 35 Minuten versagt und anschließend ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Wände stattfindet. Als Versagen der Brandschutzbekleidung wird in diesem Beitrag die Überschreitung einer Temperatur von 300 °C in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerkonstruktion definiert, da ab diesem Punkt ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion nicht mehr auszuschließen ist. Die Abklingphase setzte bei V1 ab der 50. Versuchsminute ein. Zur 90. Versuchsminute war ein erneuter Anstieg der Brandraumtemperaturen zu erkennen, welcher nicht für das Eintreten eines Selbstverlöschens spricht. Aufgrund des aus den Temperaturmessungen abgeleiteten reduzierten Restquerschnitts der anfänglich geschützten Wände wurde der Versuch nach 92 Minuten abgebrochen, um ein Standsicherheits-Versagen der Bauteile sicher zu verhindern und die abwehrenden Maßnahmen der Feuerwehr setzen ein.

Mit der ungeschützten Ausführung von zwei gegenüberliegenden Wänden und zweilagiger Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsfaserplatten an den restlichen Bauteilen zeigte sich in V2 bis zur 60. Versuchsminute ein nahezu identischer Verlauf der Brandraumtemperaturen vergleichend zu V0. Mit dem ab dieser Versuchsdauer beginnenden Versagen der Brandschutzbekleidung der Holztafelbauteile war ein erneutes Ansteigen der Brandraumtemperaturen verbunden. Für diesen Versuch lässt sich somit kein Selbstverlösch erwarten. Infolge der nach 92 Minuten einsetzenden Löschmaßnahmen reduzierten sich die Temperaturen.

V3 kennzeichnete, neben einem nahezu identischen Verlauf der Brandraumtemperaturen gegenüber V0, eine sehr langanhaltende und langsam fallende Brandraumtemperatur ab dem Beginn der Abklingphase zur 40. Versuchsminute. Dieses ist zum einen auf das große Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Bauteilflächen mit 42 % sowie zum anderen an dem Versagen der Brandschutzbekleidung und dem damit verbundenen Mitbrennen der anfänglich geschützten Holztafelbauteile zurückzuführen. Der Versuchsabbruch und der Beginn von Löschmaßnahmen erfolgte in der 150. Versuchsminute aufgrund der stark reduzierten Restquerschnitte des Holztafelständerwerks.

Das größte Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Bauteilflächen mit 58 %, bei dem auch die linearen Bauteile (Unterzug + 2 Stützen) ins Verhältnis eingehen, in V4 zeigte bis zum Beginn der Abklingphase keine wesentlichen Unterschiede zu den anderen Versuchen. Zur Analyse der Wirksamkeit von Löschmaßnahmen wurde der Versuch nach der 65. Versuchsminute mit Brandraumtemperaturen oberhalb 1100 °C durch einen einsetzenden Löschangriff der Feuerwehr beendet.

Wärmefreisetzungsrate

Die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate aus den Messdaten des Massenverlustes erfolgte über die Ermittlung der Massenverlustrate sowie unter Annahme eines Heizwertes von 17,28 MJ/kg, einer Holzfeuchte von 14 M.-% und einer Verbrennungseffektivität von 0,9. Aufgrund der stark oszillierenden Messdaten wurde zunächst ein gleitender Mittelwert über 9 Messzyklen (Aufzeichnungsfrequenz 1 s) gebildet. Anschließend folgte für die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate eine Verwendung der Messdaten im 30 s Rhythmus, wobei ein abschließender gleitender Mittelwert über fünf Messdaten (2,5 min) in Bild 9 und Bild 10 dargestellt ist.

Für die berechneten Wärmefreisetzungsraten des Bodens (mobile Brandlasten) in Bild 9 und des Gebäudes (strukturelle Brandlast) in Bild 10 zeigt sich trotz der Maßnahmen zur Glättung eine bestehende starke Oszillation. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in den aufgezeichneten Versuchsdaten der Masse bzw. der ermittelten Massenverlustraten und entsprechend auch in den dargestellten Wärmefreisetzungsraten der Massenverlust aus Dehydratation der Brandschutzbekleidung und des nicht verbrannten Holzes sowie das Abfallen von Bekleidungsteilen enthalten sind. Dies führt dazu, dass die hier bereitgestellten Wärmefreisetzungsraten mit einer nicht benennbaren Unschärfe belastet sind.

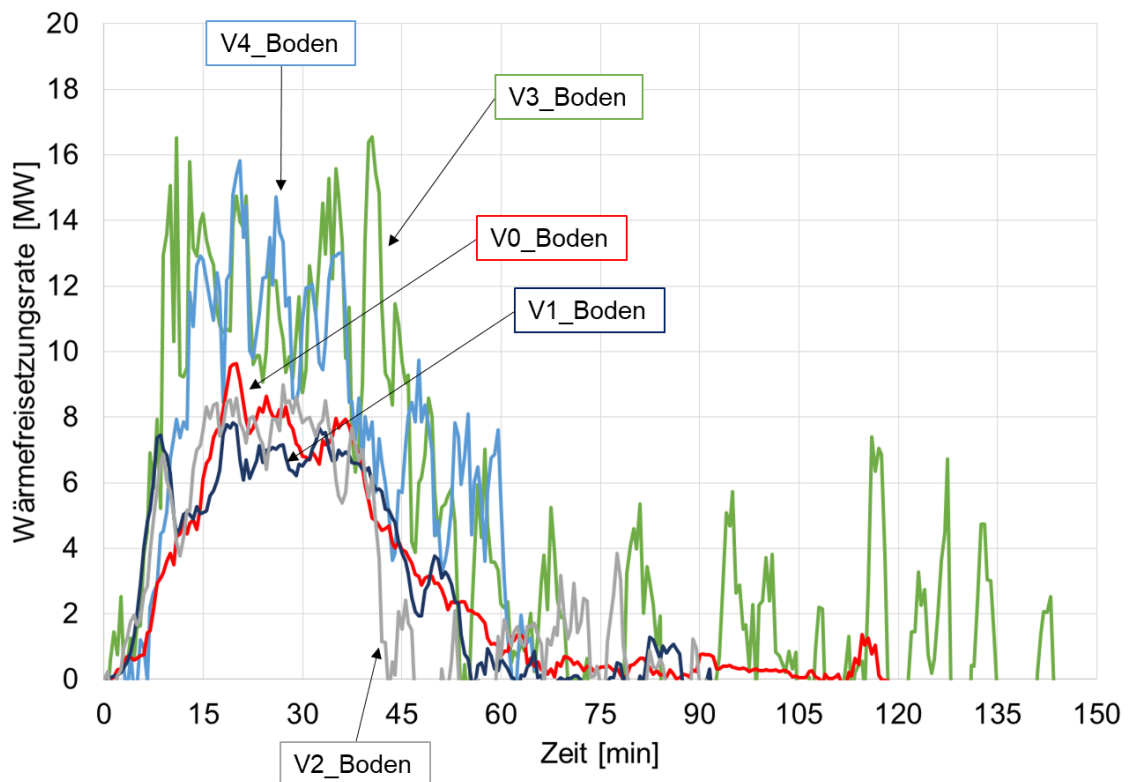


Bild 9 Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für den Boden (mobile Brandlast)

Für V0 lässt sich eine maximale Wärmefreisetzungsrate von ca. 8 MW ermitteln (siehe Bild 9). Wie schon anhand der Brandraumtemperaturen beschrieben beginnt die Vollbrandphase ab der 16. Versuchsminute und geht in der 40. Versuchsminute in die Abklingphase über. Bei den Versuchen V0 bis V2, bei welchen gleichbleibende Randbedingungen bzgl. mobiler Brandlastdichte und Ventilationsbedingung herrschten, ist ein weitestgehend gleicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate zu erkennen. Lediglich der Beginn der Vollbrandphase erfolgte etwas früher, aufgrund der vorhandenen ungeschützten Holzflächen in V1 und V2 zur 8. Versuchsminute mit dem Eintritt eines Flashovers.

In V3 und V4 ergab sich durch die größere Menge an mobiler Brandlast eine höhere maximale Wärmefreisetzungsrate. Die Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des Flashovers zeigte keine Veränderung auf, da die Randbedingungen der mobilen Brandlastdichte und der Ventilationsbedingungen gleichbleibend sind. Im Mittel ist die max. Wärmefreisetzungsrate in der Vollbrandphase mit ca. 13 MW zu benennen. Der Übergang in die Abklingphase weist in Bezug auf den Beginn als auch die Abklingrate eine geringfügige Änderung gegenüber V0 – V2 auf.

Eine Aussage zu den berechneten Wärmefreisetzungsraten für die strukturellen Brandlasten (Gebäude) stellt eine deutlich größere Herausforderung dar, wie Bild 10 zeigt. Für V0 ergibt sich durch die vollständig geschützte Ausführung keine

zusätzliche Wärmefreisetzung aus der Gebäudekonstruktion. In V1 ist vom Brandübersprung auf die ungeschützte Decke (8. Versuchsminute) bis zum Versagen der einlagigen Brandschutzbekleidung der Wände ab der 30. Versuchsminute die Wärmefreisetzung der Decke erkennbar. Anschließend beteiligten sich auch die Umfassungswände am Brandgeschehen bis zum Versuchsabbruch in der 92. Minute. Einen äquivalenten Verlauf hierzu weist die Wärmefreisetzungsrates von V2 auf, da das Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Holzbauteilen vergleichbar ist.

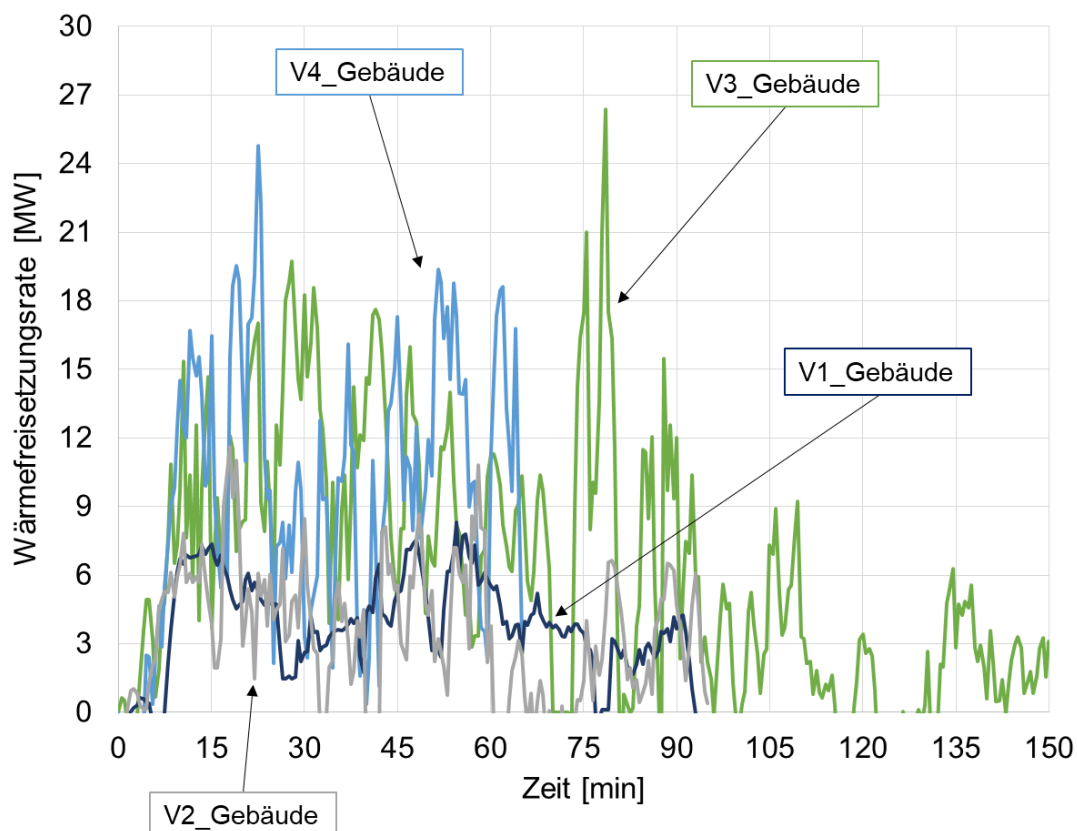


Bild 10 Vergleich der Wärmefreisetzungsrates der Belegversuche für das Gebäude (strukturelle Brandlast)

Infolge des größeren Verhältnisses von ungeschützten zu geschützten Bauteilflächen sowie der Fläche der Umfassungsbauteile in V3 und V4 ergibt sich eine höhere Wärmefreisetzungsrates. In Bezug auf die durchschnittliche Wärmefreisetzungsrates in der Vollbrandphase lassen sich keine signifikanten Unterschiede ausmachen.

Bauteiltemperaturen

Für die Analyse der Bauteiltemperaturen wird sich nachfolgend auf die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Trägerkonstruktion beschränkt. In Bild 11 ist die Position der Thermoelemente vom

Typ K in der Bauteilfläche schematisch dargestellt, welche während der Vorfertigung montiert wurden. Die kurzen Wände (4,5 m Länge) sind mit zwei Achsen und die langen Wände (9,0 m Länge) mit vier Achsen ausgestattet, wobei jeweils vier über die Höhe verteilte Thermoelemente positioniert sind. Äquivalent zur langen Wand besitzt auch die Decke vier Achsen mit jeweils vier über die Länge verteilte Thermoelemente. Für die Wand 04, welche die Öffnung beinhaltet, wurden unabhängig der Wandlänge nur zwei Achsen installiert. Die Lage der Achsen bei den Holztafelbauteilen wurde so gewählt, dass diese entweder in der Mitte eines Gefaches oder auf einem Ständer verlief.

In den weiteren Ausführungen zu den Bauteiltemperaturen erfolgt die Darstellung der Temperaturentwicklung anhand der Mittelwerte (MW) je Achse. Zusätzlich wird die Brandraumtemperatur mit dargestellt, um etwaige Zusammenhänge offen zu legen.

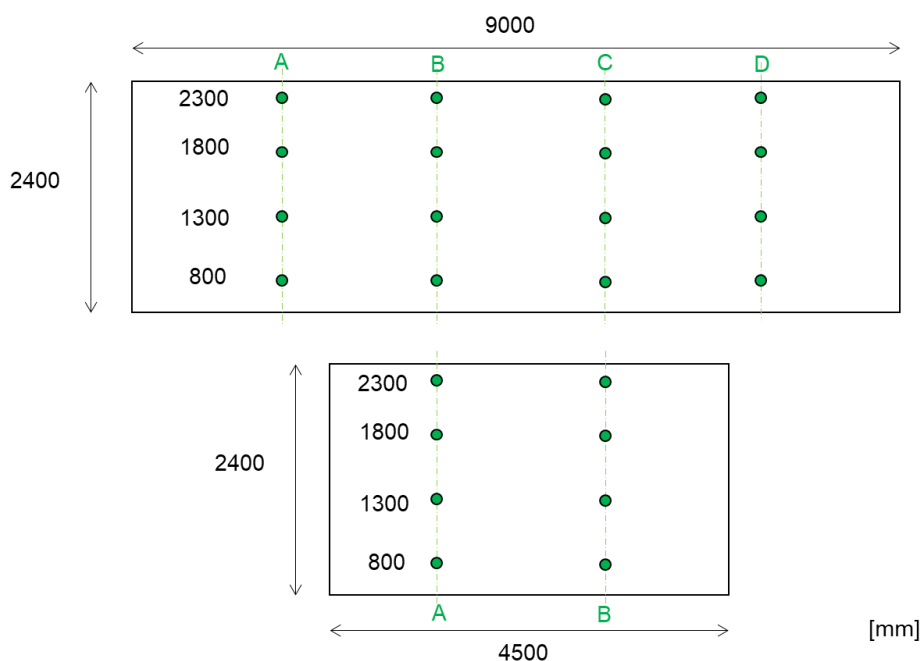


Bild 11 Schematische Darstellung der Temperaturmesspunkte in den Wänden

Bild 12 zeigt die Temperaturentwicklung hinter den 2 x 25 mm Gipskarton-Feuerschutzplatten für V0. Anhand der geringen Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion ($T_{\max} < 120 \text{ °C}$) ist die vollständig geschützte Ausführung erkennbar. Entsprechend zeigt Bild 13 keine Verfärbungen oder Verkohlungen der freigelegten Massivholzflächen.

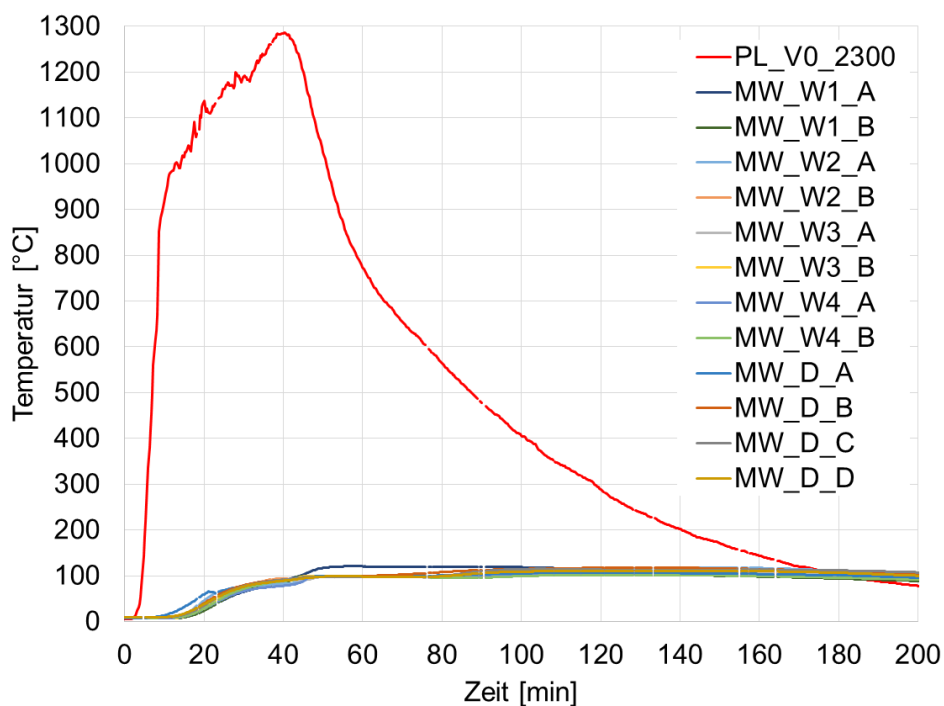


Bild 12 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V0



Bild 13 180° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V0

Die Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung für die Massivholzwände bestehend aus 1 x 18 mm Gipsfaserplatten für V1 ist in Bild 14 ersichtlich. Wie zu erwarten, erfolgte ein Versagen der Brandschutzbekleidung und das anschließende Mitbrennen der anfänglich geschützten Massivholzwände ab der 35. Versuchsminute. Der Verlauf in der Abklingphase zeigt, dass aufgrund des Mitbrennens der strukturellen Brandlast ein Absinken der Brandraumtemperaturen verhindert wird, keine Anzeichen für ein Selbstverlöschen erkennbar sind und damit der Versuchsabbruch zu begründen ist.

Wie aus Bild 8 zu entnehmen, und in Bild 14 verdeutlicht, zeigt sich hier kein signifikanter Anstieg der Brandraumtemperaturen aufgrund des Mitbrennens der anfänglich geschützten Wände ab der 35. Versuchsminute. Der zusätzliche Beitrag aus der strukturellen Brandlast lässt sich erst ab der 40. Versuchsminute sowie in der Abklingphase bzw. im Nachbrandverhalten erkennen.

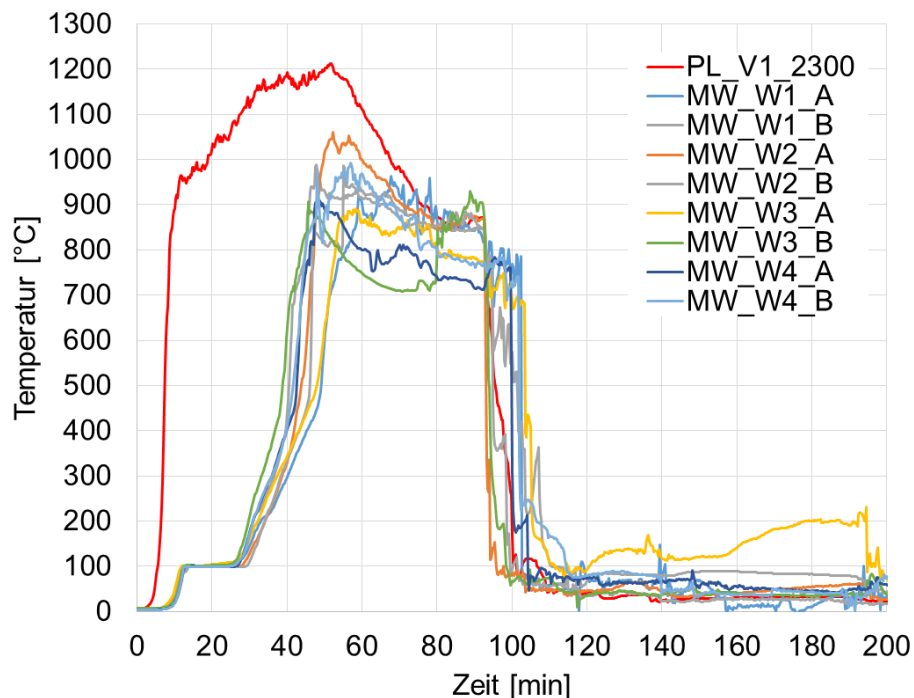


Bild 14 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht von Wand 1 bis 4 (W1-W4) zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V1, Beginn der Löschmaßnahmen nach der 92. Minute

Ab der 92. Versuchsminute begannen die Löschmaßnahmen der Feuerwehr. Für den Löschangriff wurde in allen Versuchen ein klassisches C-Hohlstrahlrohr und als Löschmittel standardmäßig Wasser mit 1 % Netzmittel verwendet. Die Gesamtmenge an Löschmittel betrug in diesem Versuch ca. 1.800 l für den Löschangriff inklusive der Nachlöscharbeiten.

Nach Demontage der Bekleidungsreste konnte das in Bild 15 gezeigte Verkohlungsbild der Bauteile festgestellt werden. Die Abbrandtiefe im ungestörten Bereich der ausgekühlten Wandbauteile beträgt durchschnittlich 35 mm und für die ungeschützt ausgeführte Decke 80 mm.



Bild 15 180° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V1

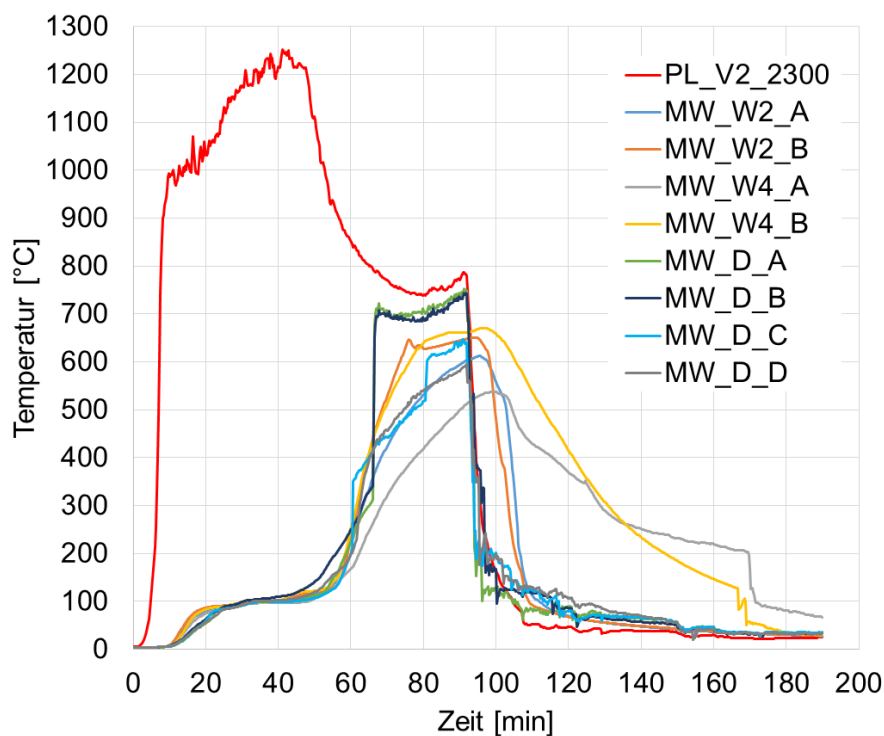


Bild 16 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht der bekleideten Wände 2 und 4 (W2 und W4) sowie der Decke (D) zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V2, Beginn der Löschmaßnahmen nach der 92. Minute

Die Entwicklung der Temperaturen in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für den Versuch V2 ist in Bild 16 dargestellt. Die Brandschutzbekleidung der Decke und der Wände W2 und W4 bestehen aus einer Kombination von 2 x 18 mm Gipsfaserplatten. Das Versagen der Brandschutzbekleidung und ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion ist ab der 60. Versuchsminute ersichtlich. Wie schon

bei V1 führte auch in V2, zusammen mit dem Beitrag der zwei ungeschützten Bauteile, das Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktionen dazu, dass die Brandraumtemperaturen zur 80. Versuchsminute erneut anstiegen. Die zur 92. Versuchsminute beginnenden Löscharbeiten der Feuerwehr, welche eine Löschmittelmenge (inkl. Nachlöscharbeiten) von ca. 1.600 l erforderten, beendeten den Versuch. Aufgrund des aus den Temperaturmessungen abgeleiteten reduzierten Restquerschnitts der anfänglich bekleideten Wände wurde der Versuch nach 92 Minuten abgebrochen, um ein Standsicherheitsversagen der Bauteile sicher zu verhindern und die abwehrenden Maßnahmen der Feuerwehr setzen ein.

Nach Abschluss der Löscharbeiten, der Demontage der Bekleidungsreste und dem Entfernen der Gefachdämmung zeigte sich das in Bild 17 dargestellte Verkohlungsbild. Die beim Rückbau durchschnittliche festgestellte Abbrandtiefe der ungeschützten Wände betrug ca. 75 mm. Für das Ständerwerk der anfänglich geschützten Holztafelbauteile konnte eine Abbrandtiefe von ca. 30 mm festgestellt werden.



Bild 17 180° Dronenaufnahme der Bauteiloberflächen nach Demontage der Brandschutzbekleidung und Gefachdämmung für V2

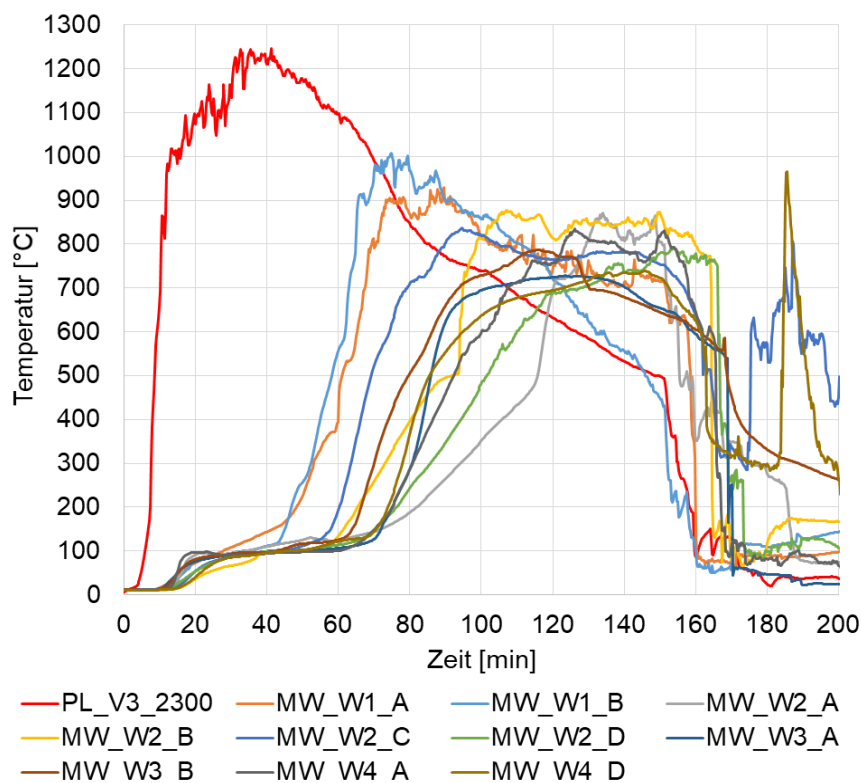


Bild 18 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht der bekleideten Wände 1 bis 4 (W1 bis W4) zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V3, Beginn der Löschmaßnahmen nach der 150. Minute

Aus Bild 18 ist die Temperaturentwicklung hinter der Brandschutzbekleidung der Holztafelbauteile in Versuch V3 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass die Bekleidung von Wand 1 (W1) aus 2 x 12,5 mm Gipsfaserplatten und der Wände 2 – 4 (W2 – W4) aus 2 x 18 mm Gipsfaser- bzw. Gipskarton-Feuerschutzplatten bestehen. Erwartungsgemäß fand das Versagen der 2 x 12,5 mm Bekleidung bereits nach der 50. Versuchsminute statt, während die 2 x 18 mm Bekleidung erst ab der 60. Versuchsminute ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion zuließ. Erkennbar ist auch ein deutlich größeres Streuband innerhalb der Aufheizphase der Messdaten der 2 x 18 mm Bekleidungen, welches sich im Temperaturbereich von 300 °C über einen Zeitraum von 30 Minuten erstreckt. Als Begründung hierfür sind zum einen die Lage der Achse (auf Ständer, OSB Platte oder auf Gefachdämmung) und zum anderen der Verlauf der Stoßfugen der Brandschutzbekleidungen zu benennen. Der Beitrag der strukturellen Brandlast aus der ungeschützten Decke und dem Anteil der anfänglich geschützten Wände zeigt sich erst in der Abklingphase durch eine sehr langsam sinkende Brandraumtemperatur.

Der Versuchsabbruch erfolgte in der 150. Versuchsminute aufgrund der geringen verbleibenden Restquerschnitte der tragenden Konstruktion. Die ungeschützte Massivholzdecke wies zu diesem Zeitpunkt kein Mitbrennen mehr auf. Für den Löschangriff und die Nachlöscharbeiten wurde eine Löschmittelmenge von ca.

1.500 l benötigt. Wie aufgrund des Temperaturverlaufs in Bild 18 bereits erkennbar, gestalteten sich die Nachlöscharbeiten durch das Mitbrennen der Holztafelbauteile (siehe Bild 19) etwas aufwendiger, da ein Großteil der Brandschutzbekleidung sowie die nichtbrennbare Gefachdämmung zuerst entfernt werden musste.

Die Abbrandtiefe der ungeschützten Massivholzdecke konnte nach Versuchsdemontage mit 90 mm ermittelt werden. Für das Ständerwerk der Holztafelwände betrug die Abbrandtiefe im Mittel 100 mm.



Bild 19 Belegversuch V3 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen

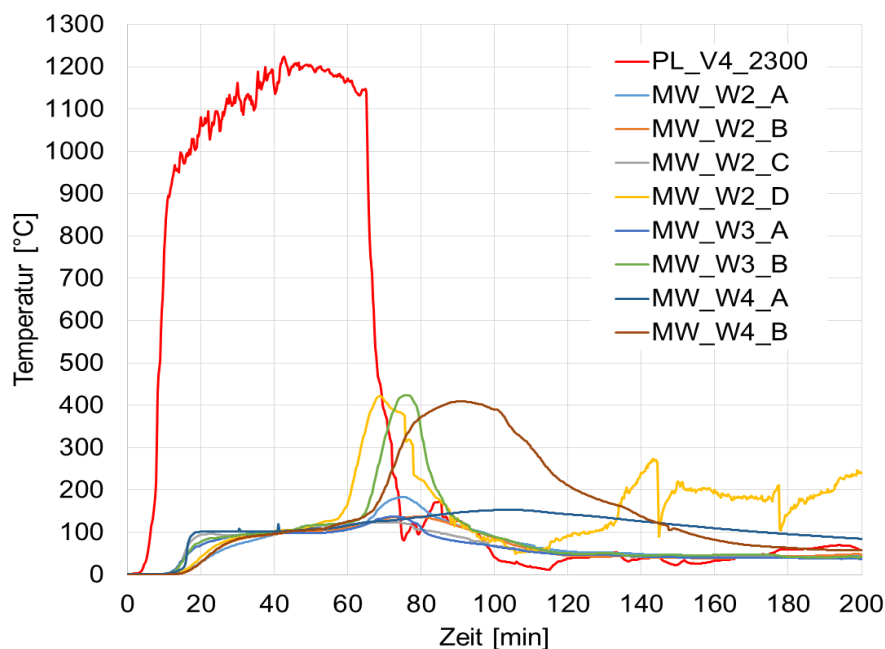


Bild 20 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht der bekleideten Wände 2 bis 4 (W2 bis W4) zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V4, Beginn der Löschmaßnahmen nach der 62. Minute

Bild 20 stellt die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V4 dar. Das Versagen der Schutzwirkung der Bekleidung (2 x 18 mm Gipsplatten) ist zur 60. Minute ersichtlich. Der Zeitpunkt des Versagens der Brandschutzbekleidung ist im Vorfeld für den Beginn der Löschmaßnahmen festgelegt worden. Entsprechend weisen die anfänglich geschützten Bauteile kein Beitrag zum Brandgeschehen auf.



Bild 21 Versuch V4 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen

Für den Löschangriff wurde eine Löschmittelmenge von 1.500 l verwendet, während die Nachlöscharbeiten weitere 2.000 l benötigen. Ein zusätzlicher Grund für den großen Löschmittelbedarf ist, neben der hohen Brandraumtemperatur, die erschwerte Löscharbeit der Holzkrippen, welche zu diesem Zeitpunkt erst zu ca. 70 % umgesetzt waren. Bild 21 zeigt den Brandraum von Versuch V4 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen, wobei die verbleibende Restmenge der Holzkrippen erkennbar ist.

Die anfänglich geschützten Bauteiloberflächen wiesen nur eine lokale, geringfügige Verfärbung auf. Die nach Versuchsende gemessene Abbrandtiefe der ungeschützten Decke lag durchschnittlich bei 60 mm. Vergleichend dazu betrug die mittlere Abbrandtiefe der ungeschützten Wand bei 50 mm.

Fassadentemperaturen

Aufgrund der stark oszillierenden Messdaten der Mantelthermoelemente vor der Fassade, durch die aus der Öffnung schlagenden Flammen sowie den Wettereinflüssen der Freibrandversuche, wurde eine Glättung mittels gleitenden Mittelwert über 30 s vorgenommen. Die in Bild 22 und Bild 24 dargestellten Temperaturen vor der Fassade beziehen sich auf eine vertikale Messachse mittig

der Öffnung. Von den über die Höhe verteilten Thermoelementen werden hier nur die Messdaten in 0,5 m, 3,0 m und 5,0 m oberhalb der Oberkante der Brandraumöffnung (Sturz) betrachtet.

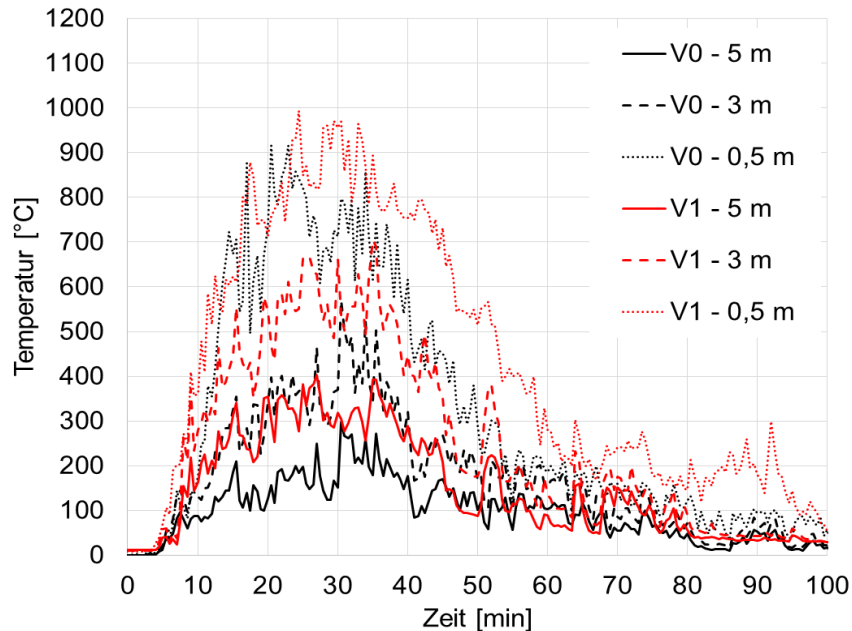


Bild 22 Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V0 und V1 in verschiedenen Höhen



Bild 23 Aufnahmen während der Versuchsdurchführung (Vollbrandphase) von V0 (links) und V1 (rechts)

Aus Bild 22 lässt sich der zusätzliche Beitrag der strukturellen Brandlast auf die Temperaturentwicklung vor der Fassade ablesen. Für den Versuch V0 mit vollständig geschützten Bauteilen werden geringere Temperaturen in 0,5 m

($\Delta T \approx 100 \text{ K}$) und 3,0 m ($\Delta T \approx 200 \text{ K}$) Höhe gemessen, im Gegensatz zu Versuch V1, welcher eine ungeschützte Decke zu Brandbeginn aufwies. An der Messstelle in 5,0 m Höhe zeigt sich der Einfluss der strukturellen Brandlast erst ab dem Versagen der Brandschutzbekleidung (1 x 18 mm GF) der Wände zur 35. Versuchsminute.

Eine visuelle Gegenüberstellung der aus der Öffnung schlagenden Flammen der Versuche V0 und V1 ist in Bild 23 ersichtlich. Ein signifikanter Unterschied der Flammenlängen auf der Fassade lässt sich nicht feststellen.

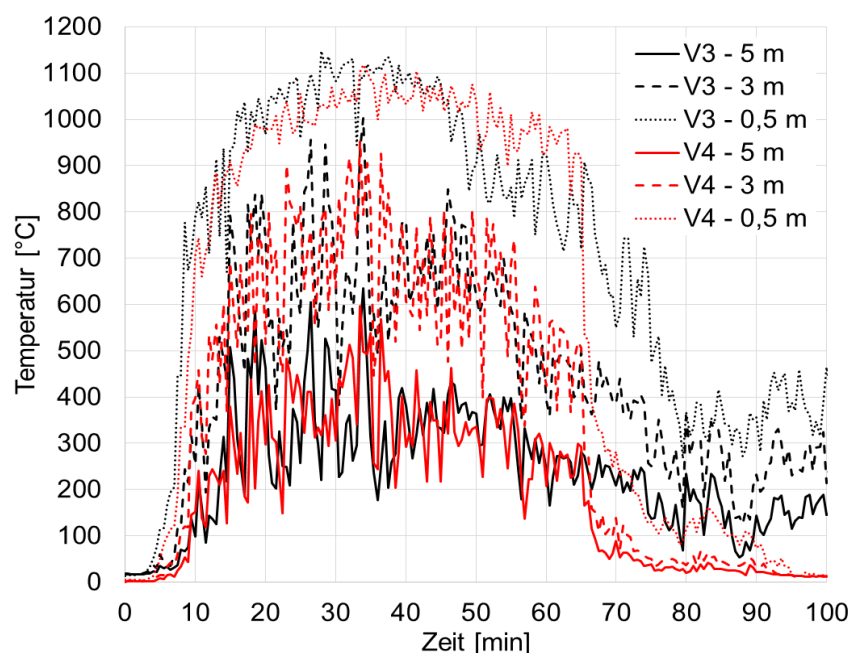


Bild 24: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V3 und V4 in verschiedenen Höhen

Die Gegenüberstellung der Temperaturen vor der Fassade in Bild 24 zeigt, dass bei unterschiedlichem Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Holzbauteilen (V3 \rightarrow 42 % und V4 \rightarrow 58 %) sich in diesen Messwerten kein wesentlicher Unterschied einstellt.

Gegenüberstellung der Brandlastdichten

Es gilt bei der abschließenden Bewertung der Ergebnisse zu beachten, dass mit der Verwendung der 90 %-Quantile der mobilen Brandlast aus [12] die Wärmefreisetzungsrate infolge der mobilen Brandlast den strukturellen Anteil teilweise erheblich übersteigt. Dieses lässt sich anhand der Versuchsdaten Brandraumtemperatur, Wärmefreisetzungsrate oder der Brandlastdichten wie Tabelle 3 zeigt, erkennen. Bei Betrachtung des gesamten Brandverlaufes dominiert die Wärmefreisetzung der mobilen Brandlasten den Zeitbereich bis etwa zur 40. Minute (vgl. Bild 9 und Bild 10). Nach diesem Zeitpunkt wechselt die „Dominanz“ auf die Wärmefreisetzung der strukturellen Brandlasten über. Bei

internationalen Raumbrandversuchen z. B. [20], [21], [22] und [23] wurden für die mobile Brandlastdichte Größenordnungen von 500 MJ/m² bis 890 MJ/m² verwendet. Hierbei stellt sich der Anteil der strukturellen Brandlast als maßgebender Teil heraus.

Mit der vereinfachten Annahme der Verbrennungsparameter äquivalent zur mobilen Brandlast sowie den hier benannten Abbrandtiefen der strukturellen Brandlast bezogen auf die mitbrennenden Holzoberfläche lassen sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Brandlastdichten bestimmen. Für die strukturelle Brandlastdichte (bezogen auf die Grundfläche) sei hier vermerkt, dass dies eine überschlägige Betrachtung darstellt.

Tabelle 3: Vergleich der Brandlastdichten aus mobilem und strukturellem Anteil

Versuch	Mobile Brandlastdichte [MJ/m ²]	Strukturelle Brandlastdichte [MJ/m ²]
V0	1.085	0
V1	1.085	980
V2	1.085	500
V3	1.085	740
V4	1.085	530

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des TIMpuls Verbundforschungsvorhaben wurden auf Grundlage von klein-, mittel- und großskaligen Untersuchungen Erkenntnisse zum Brand- / Feuerwiderstandsverhalten von Holzbaukonstruktionen erarbeitet. Die Planung und Realisierung von abschließenden Belegversuchen diente dazu, die Erkenntnisse und Lösungsansätze der innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Brandschutz für mehrgeschossige Holzgebäude zu belegen. Dabei wurden bautypische, im mehrgeschossigen Holzbau übliche Kombinationen aus Massivholz- und Holztafelbauweise berücksichtigt. Die Ausführung der Bauteile erfolgte als vollständig bzw. anfänglich durch eine Brandschutzbekleidung geschützt sowie ungeschützt. Die Belegversuche sollen für alle Interessensvertreter/innen aufzeigen, wie sich eine Gesamtkonstruktion in Holzbauweise im Brandfall und während eines Löschvorgangs durch die Feuerwehr verhält. Dementsprechend umfangreich waren die Untersuchungsschwerpunkte und -ziele der Belegversuche.

Der Einfluss des Beitrages von strukturellen Brandlasten ist innerhalb dieser Versuche deutlich in den berechneten Wärmefreisetzungsraten des Gebäudes

und in den Temperaturmessungen im Brandraum und vor der Fassade sichtbar. Bezogen auf die Brandraumtemperaturen zeigt sich der Einfluss a) durch einen geringfügig früheren Eintritt des Flashover und b) in Form eines intensiveren Nachbrandverhaltens während der Abklingphase. Die Menge der am Brand beteiligten strukturellen Brandlast ist ebenfalls als ein Einflussparameter auf das Nachbrandverhalten und eines möglichen Selbstverlöschens zu nennen. Dies zeigen die Messdaten der Brandraumtemperaturen und die gemessenen Wärmefreisetzungsdaten.

Das Versagen der Brandschutzbekleidung und das damit verbundene Mitbrennen der anfänglich geschützten Holzbauteile erfolgte in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke nach unterschiedlichen Beanspruchungsdauern. Das Mitbrennen begann bei einer Bekleidung aus 1 x 18 mm Gipsplatten nach ca. 35. Minuten, bei einer Bekleidung aus 2 x 12,5 mm Gipsplatten nach ca. 50 Minuten und bei einer Bekleidung aus 2 x 18 mm nach ca. 60. Minuten Naturbrandbeanspruchung.

Wirksame Löscharbeiten waren bei den Versuchen V1 bis V4 unabhängig der jeweiligen Holzbauweise zielführend und ohne besondere Maßnahmen möglich. Ein Mehraufwand bei den Nachlöscharbeiten in V4 ist auf die Brandlast aus Holzkrippen zurückzuführen, welcher auch bei einer nichtbrennbaren Bauweise vorliegen würde. Hinsichtlich der benötigten Löschmittelmenge lag diese, entsprechend dem Stadium des Brandes zu Beginn der Löscharbeiten, zwischen 1.500 l und 3.500 l für den Löschangriff inkl. etwaiger Nachlöscharbeiten.

Im Zuge der anstehenden weiteren Auswertung der Summe an Messdaten können vertiefte Erkenntnisse zum Brandverhalten von Holzkonstruktionen gewonnen werden, die entsprechend veröffentlicht und in den Fachkreisen diskutiert werden sollen. Für numerische Ansätze in Berechnungsmodellen für die Brandeinwirkung als auch thermischen Bauteilanalysen unter Naturbrandbeanspruchung bieten die erfassten Daten eine fundierte Validierungsgrundlage.

Unter www.timpuls.tum.de [1] können unter dem Reiter - Aktuelles - die Videoaufzeichnungen der Versuche abgerufen werden. Unter Berücksichtigung der Versuchsbeschreibung können diese Interessierten weitere Aufschlüsse liefern. Des Weiteren wird auf der gemeinsamen Projektseite regelmäßig auf neue Ergebnisse und Veröffentlichungen der Forschergruppe verwiesen.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei allen beteiligten Industriepartnern für die stets konstruktive und zielführende Zusammenarbeit während der Planung und Umsetzung der Belegversuche. Vor allem möchten wir uns bei dem Holzbauunternehmen Gump & Meier und der Werkfeuerwehr der TU München in Garching bedanken, ohne deren logistische und tatkräftige Hilfestellung diese Versuche so nicht möglich gewesen wären.

LITERATUR

- [1] <https://www.timpuls.tum.de> Webseite des Forschungsvorhaben TIMpuls; (abgerufen am: 25.07.2021).
- [2] Winter, S.; Zehfuß, J.; Engel, T.; Brunkhorst, S.; Werther, N. (2019): Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage vom 25. – 26. September 2019 in Braunschweig. ISBN 978-3-89288-220-6.
- [3] Engel, T.; Moosmüller, K.; Werther, N. (2020): Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000076>.
- [4] Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Werther, N. (2020): TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau – Abbrandraten, Schutzzeiten von Bekleidungen und Nachbrandverhalten von Holz. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>.
- [5] Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2019): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbränden mit immobilen Brandlasten. Tagungsband des SYMPOSIUM 2019 Heißbemessung - Structural Fire Engineering am 24. September 2019 in Braunschweig.
- [6] 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.
- [7] Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Brunkhorst, S.; Steeger, F. (2021): TIMpuls - Forschungsvorhaben zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen zur erweiterten Anwendung des Holzbaus. Tagungsband der 67. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes, Münster, 10.-12.05.2021.
- [8] Engel, T.; Werther, N.; Kurzer, C. (2021): TIMpuls – Erkenntnisse aus den abschließenden Realbrandversuchen. Tagungsband der 67. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes, Münster, 10.-12.05.2021.

- [9] Butscher, D.; Neske, M. (2021): TIMpuls – Erkenntnisse für den abwehrenden Brandschutz. Tagungsband der 67. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes, Münster, 10.-12.05.2021.
- [10] Engel, T.; Kurzer, C.; Werther, N.; Brunkhorst, S.; Winter, S. (2021): Aus der Forschung: TIMpuls - mehrgeschossige Holzbauten unter Feuer. Tagungsband FeuerTrutz Brandschutzkongress, Nürnberg, 18. und 19.10.2021.
- [11] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2020) Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL). Fassung Mai 2020.
- [12] 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.
- [13] DIN 4074-1:2012-06: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz.
- [14] Rauch, M.; Werther, N.; Kurzer, C.; Winter, S.; Kaufmann, H. et. al (2019): dataholz.de – Abschlussbericht zum Forschungsprojekt dataholz.de. Dezember 2019; Technische Universität München. www.dataholz.eu
- [15] DIN EN 520:2009-12: Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 520:2004+A1:2009.
- [16] ETA-03/0050: fermacell Gipsfaserplatten - Gipsfaserplatten für die Beplankung und Bekleidung von Bauteilen.
- [17] Suttner, E.; Werther, N.; Dumler, P. (2020): Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20566.80964>.
- [18] Dederich, L.; Rüther, N.; Sudhoff, P.; Kampmeier, B.; Suttner, E. Werther, N.; Winter, S. (2021): Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5 (Schriftenreihe R3-T5-F2 holzbau handbuch des Informationsdienst Holz). ISSN 0466-2114.
- [19] DIN EN 1363-1: 2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil:1 Allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung EN 1363-1:2012.
- [20] Su, J.; Lafrance, P.-S.; Hoehler, M. et al. (2018): Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. NFPA, Gaithersburg.
- [21] Zelinka, S.; Hasburgh, L.; Bourne, K. et al. (2018): Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building – General Technical Report FPL-GTR-247. USDA, Madison.

- [22] Brandon, D.; Sjöström, J.; Hallberg, et al. (2021): Fire safe implementation of visible mass timber in tall buildings - compartment fire testing. Summary Report, RISE Report 2020:94. Sweden. ISBN:978-91-89167-79-7.
- [23] McNamee, R.; Zehfuss, J.; Bartlett, A.; Heidari, M.; Robert, F.; Bisby, L. (2020): Enclosure Fire Dynamics with a Combustible Ceiling. Fire and Materials, 2020;1-11. <https://doi.org/10.1002/fam.2904>.