

Thomas Engel
Sven Brunkhorst
Felix Steeger
Stefan Winter
Jochen Zehfuß
Björn Kampmeier
Norman Werther

TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau

Abbrandraten, Schutzzeiten von Bekleidungen und Nachbrandverhalten von Holz

Im Rahmen dieses Beitrages wird das Forschungsprojekt TIMpuls vorgestellt und erste Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen und Brandversuche präsentiert. Der Fokus liegt hierbei auf Untersuchungen zum Abbrandverhalten von Holz, der Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen und dem Nachbrandverhalten von Bauteilen aus Holz. Mittels Kleinbrandversuchen wurden Abbrandraten für verschiedene Holzarten unter Normbrandbeanspruchung bestimmt. In den Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen werden, neben den Grundlagen zur Ausbildung und Klassifizierung, Ergebnisse kleinskaliger Brandversuche dargestellt, mit deren Hilfe eine Bewertung der Leistungsfähigkeit ermöglicht wird. Weiterhin werden erste Erkenntnisse zum Nachbrandverhalten von Bauteilen aus Holz vorgestellt. Hierbei werden Randbedingungen zum Erreichen des Selbstverlöschens in Brandräumen, Erfahrungen zum Löschvorgang und konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Hohlraumbränden diskutiert.

Keywords: Holzbau; Brandschutz; Abbrandrate; Brandschutzbekleidung; Nachbrandverhalten

TIMpuls basic research on fire protection in timber construction - Charring rate, protection times of claddings and post-burning behaviour of timber This paper presents excerpts from first results and experiments within the TIMpuls research project on charring rate of timber, the performance of fire protection claddings and the post-burning and extinguishing behaviour of timber components. By means of small-scale tests, charring rates for various types of timber under standard fire exposure were determined. The investigations of the performance of fire protection systems comprise the state of the art in application and the classification criteria's. Based on this, an explanation of the small-scale test setup and the experimental test results is given. Based on the test results an evaluation of the performance of the fire protection claddings is presented. Furthermore the behavior of timber structures in the decay phase of a fire is investigated. Here, boundary conditions for achieving self-extinguishing in a fire compartment, experiences with the extinguishing process and constructive measures to avoid cavity fires are discussed.

Keywords timber construction; fire safety; charring rate; fire protection systems; post-fire behaviour

1 Das Forschungsvorhaben TIMPuls

1.1 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. In dem Verbundforschungsvorhaben TIMPuls [1] der Technischen Universität München, Technischen Universität Braunschweig, Hochschule Magdeburg-Stendal und dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge wird ein wissenschaftlich begründeter Nachweis erarbeitet, mit dem die unbedenkliche Verwendbarkeit tragender und raumabschließender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze gezeigt wird. Die hierzu erforderlichen Grundlagen zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Brandschutzregelungen für die erweiterte Anwendung des Holzbaus werden auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen erarbeitet.

1.2 Ziele und Strategien des Forschungsvorhabens

Für die bauordnungsrechtliche Anwendbarkeit der Holzbauweise in der Gebäudeklasse 5 werden verschiedene Strategien zum Nachweis der Erfüllung des brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus verfolgt. Einhergehend mit dem erweiterten Einsatz der Holzbauweise ist nachzuweisen, dass durch die zusätzliche Brandlast aus der tragenden und aussteifenden Gebäudestruktur das bauaufsichtlich geforderte Sicherheitsniveau im Hinblick auf den Brandschutz nicht bzw. allenfalls nur auf ein gesellschaftlich akzeptierbares Niveau gesenkt wird. Eine Form des Nachweises kann über die Gleichwertigkeit der Holzbauweise gegenüber den konventionellen, nichtbrennbaren Bauweisen erbracht werden. Hierbei werden unterschiedliche Aspekte und Lösungswege verfolgt, wie der Nachweis über eine Naturbrandbemessung, das Selbstverlöschten von Bauteilen, die Kapselung der Bauteile und die Bewertung der Leistungsfähigkeit der abwehrenden und anlagentechnischen Maßnahmen. Innerhalb der themenbezogenen Risikobetrachtung werden so alle beeinflussenden Parameter des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes berücksichtigt und ganzheitliche Maßnahmen für sichere mehrgeschossige Konstruktionen in Holzbauweise erarbeitet.

Das Ziel ist die Bereitstellung eines vollständigen, wissenschaftlich begründbaren Konzepts, um die Verwendbarkeit von Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden, auch unter teilweiser Verwendung sichtbarer Bauteiloberflächen, bis zur Hochhausgrenze in ganz Deutschland geregelt zu ermöglichen.

Kerngebiete stellen hierbei die Themenfelder Branddynamik im Brandraum, Tragfähigkeit und Raumabschluss

der Konstruktion dar [7]. Maßgebend für diese drei Kerngebiete sind insbesondere Themen wie Abbrandraten von Holzbauteilen, Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen und das Selbstverlöschen. In diesem Artikel werden erste Erkenntnisse aus Versuchen zu diesen drei Themenfeldern dargestellt.

2 Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung und parametrischer Brandbeanspruchung

2.1 Versuchsbeschreibung

Für die brandschutztechnische Beurteilung von Holzbauteilen ist die, durch das jeweilige Einwirkungsszenario hervorgerufene, Abbrandtiefe und Temperaturverteilung im verbleibenden Bauteilquerschnitt maßgebend [2]. Abbrandraten unter Normbrandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) sind auf Basis zahlreicher Untersuchungen für verschiedene Materialien und Gruppierungen von Holzarten in der DIN EN 1995-1-2 [3] aufgeführt. Insbesondere in Bezug auf die Holzarten ist diese Liste jedoch noch nicht vollständig, da mit dem klimatischen Wandel der Waldstruktur neue, bisher im Ingenieurholzbau nicht genutzte Holzarten zur Anwendung kommen. Erkenntnisse zum Abbrand und zur Temperaturverteilung bei Naturbrandbeanspruchungen liegen nur in einem begrenzten Umfang vor. Infolge des unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus in der Aufheiz- und Abkühlphase liegt zusätzlich keine zeitliche Konstanz der Abbrandrate wie bei Normbrandbeanspruchung vor [2]. Auf Basis von Brandversuchen wurden daher weiterführende Untersuchungen zum Abbrand- und Erwärmungsverhalten von Holz unter Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung durchgeführt.

2.2 Aufbau und Umsetzung der durchgeführten Untersuchungen

Insgesamt wurden 42 Versuchskörper aus neun verschiedenen Materialien im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [4] unter Einbezug der messtechnischen Randbedingungen nach DIN EN 1363-1 [5] betrachtet. Es wurde sowohl der einseitige als auch der mehrseitige Abbrand untersucht. In diesem Beitrag werden auszugweise nur die Prüfkörper für den eindimensionalen Abbrand beschrieben.

Die Prüfkörper wiesen Abmessungen von $L \times B = 545 \text{ mm} \times 545 \text{ mm}$ auf. Die Dicke der Versuchskörper richtete sich nach dem jeweiligen untersuchten Material, bzw. den verfügbaren Materialdicken und lag zwischen 104 – 129 mm für den einseitigen Abbrand. Die jeweiligen Rohdichten und Holzfeuchten sind in Tab. 1 aufgeführt.

Jeder Prüfkörper setzen sich aus zwei Hälften zusammen. Die isolierten Drahtthermoelemente vom Typ K (2 x 0,5 mm) wurden in den unteren Teil des Prüfkörpers eingebracht, sodass die Messstellen mittig in der Versuchsfläche

lagen, vgl. Bild 1. Es wurden in jedem Versuchskörper zwei Messbäume angeordnet. Die Platzierung der Thermoelemente erfolgte vorzugsweise in 6 mm Abständen über die Dicke der Prüfkörper in Bohrungen (\varnothing 2 mm) parallel zur Isotherme. Die Verklebung der Versuchskörper erfolgte unter Verwendung eines Phenol-Resorcin-Formaldehydklebers. An den Schmalseiten der Prüfkörper wurden Gipsfaserplatten umlaufend angebracht, um seitliche Strömungswege und Durchbrände zu vermeiden [6].

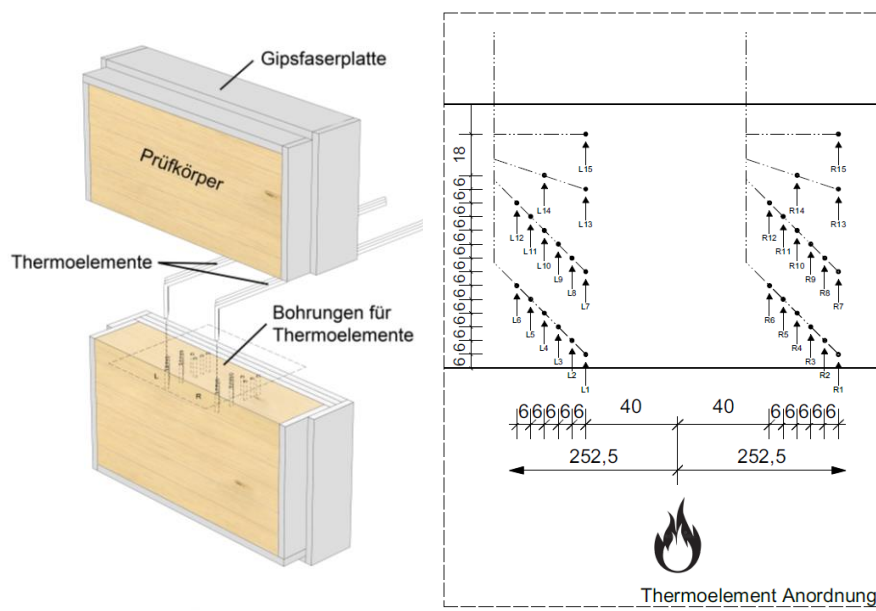


Bild 1 Darstellung der Prüfkörper (Sprengisometrie) und Anordnung der Thermoelemente

Test specimen (explosive isometry) and arrangement of the thermocouples

Die Prüfkörper wurden im Brandofen mit den in Bild 2 dargestellten drei Brandkurven beansprucht, die als repräsentative Einwirkzenarien erarbeitet wurden [8]. Für die ETK [5] wurde eine Branddauer von 90 min gewählt.

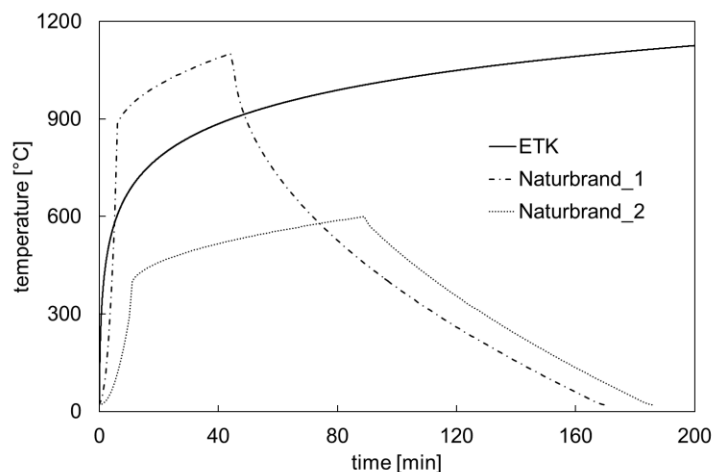


Bild 2 Die drei Soll-Brandofen-Temperaturverläufe der Brandversuche

The three temperature curves of the fire tests

Zur Messung der Temperaturen im Brandofen wurde je ein Platten- (PL) sowie ein Mantel-Thermometer (MT) gemäß DIN EN 1363-1 [5] bzw. DIN 4102-8 [4] vor den Prüfkörpern im Brandraum angeordnet. Zusätzlich diente ein weiteres Mantelthermoelement (\varnothing 1 mm) zur Erfassung der Temperaturen direkt auf der brandbeanspruchten Oberfläche [6].

Weiter wurde die Gaskonzentration und der Druck im Brandraum gemessen. Alle Restquerschnitte wurden nach dem Versuche messtechnisch und fotografisch erfasst sowie einem Oberflächen-Scanning, zur flächigen Bestimmung der Restquerschnitte unterzogen, vgl. Bild 3.



Bild 3 Prüfkörper Vollholz Eiche (v.l.n.r.) Holzkohleschicht, gebürstet, 3D-Scan

Test specimen solid wood

oak (from left to right) charcoal layer, brushed, 3D scan

2.3 Versuchsergebnisse

Auszugsweise werden die Ergebnisse für die Prüfkörper unter eindimensionaler Beanspruchung nach der ETK dargestellt. Durch die Thermoelemente in den Prüfkörpern kann der Abbrand über die Versuchszeit ausgewertet werden. Als Lage der Abbrandgrenze wurde die Position der 300°C – Isotherme gemäß DIN EN 1995-1-2 [3] angenommen. Bild 4 und Bild 5 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem rechten und linken Messstrang) im Prüfkörper zur 30. und 90. Minute dar. Zwischen rechten und linken Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf.

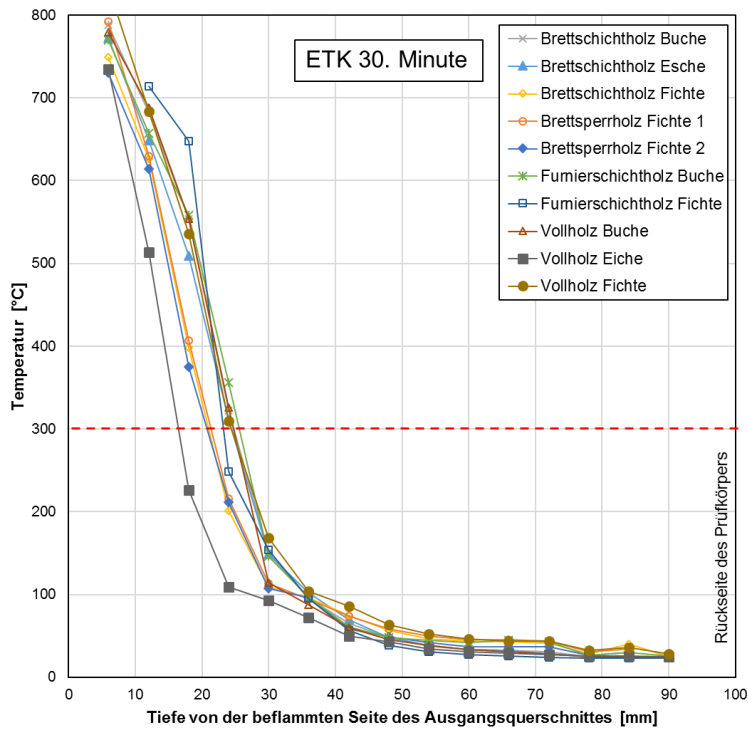


Bild 4 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK-Beanspruchung zur 30. Minute
specimens under standard fire exposure at 30 minutes

Temperature distribution in the test

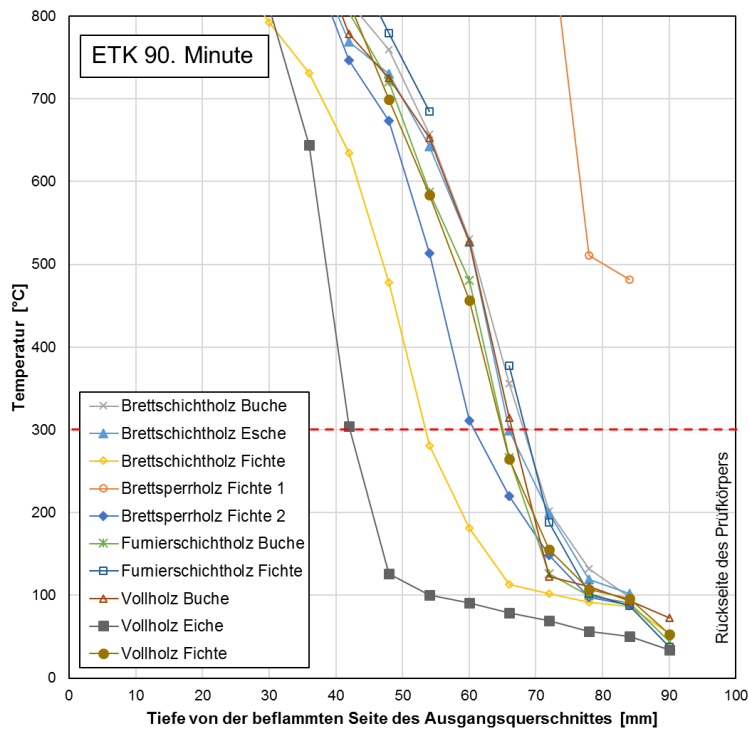


Bild 5 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK-Beanspruchung zur 90. Minute
in the test specimens under standard fire exposure at 90 minutes

Temperature distribu-

Mit Blick auf die 300°C – Isotherme und die daraus ermittelten Abbrandraten in Tab. 1 wird deutlich, dass die Abbrandrate keine zeitlich konstante Größe ist und mit zunehmender Beanspruchungsdauer für Vollholz, Brettschichtholz und Furnierschichtholz abnahm. Die maßgebenden Werte für die Abbrandrate ergaben sich somit in der Regel nach 30 Minuten. Anders verhält sich das für Bauteile, bei denen infolge des konstruktiven Aufbaus ein plötzlicher Verlust der anhaftenden Holzkohleschicht („char fall-off“) und damit einhergehend eine Zunahme der Abbrandrate auftreten kann. Aus diesem Grund werden die ermittelten Werte für Brettsperrholz im Kleinprüfstand, der dieses Phänomen nicht berücksichtigt, in diesem Artikel nicht weiter dargestellt.

Vergleicht man die Holzarten untereinander lässt sich festhalten, dass Vollholz (VH) Eiche die geringste Abbrandrate aufweist, gefolgt von Brettschichtholz (BSH) aus Fichte. BSH Buche, BSH Esche, VH Fichte, VH Buche, Furnierschichtholz (FSH) Buche und FSH Fichte liegen bezogen auf die Abbrandrate unter Berücksichtigung der jeweils gewählten Rohdichten (vgl. Tab. 1) im vergleichbaren Wertebereich von maximal ± 13 Prozent.

Die ermittelten eindimensionalen Abbrandraten über die 300°C Isotherme nach 30 min ETK-Prüfdauer aus den Versuchen fallen im Durchschnitt um ca. 27% höher als die Werte für β_0 (Abbrandrate für eindimensionalen Abbrand) nach DIN EN 1995-1-2 [3] aus. Besonders auffallend ist hierbei das erhöhte Abbrandverhalten von Esche gegenüber den Werten aus [3]. Um die Abweichungen gegenüber [3] weiter zu untersuchen wurden in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen im Prüfofen genauer untersucht.

Betrachtet man das Temperaturniveau auf den Prüfkörpern, das durch ein Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche gemessen wurde, wird deutlich, dass dieses über der eigentlichen ETK liegt, vgl. Bild 6. Ursächlich dafür ist der Mitbrand des Prüfkörpers während der Versuchszeit, der über das Platten-Thermoelement im Brandraum nicht adäquat erfasst wird und aus dem hohen Sauerstoffgehalt im Brandraum resultiert. Um Abbrandraten unter reiner ETK-Beanspruchung zu erhalten, die sich aus ventilationsgesteuerten Brandverläufen ableiten [16], müssen folglich die Abbrandraten ohne das erhöhte Temperaturniveau ermittelt werden.

Zusätzlich ist anzumerken, dass infolge der Messtechnik nach DIN EN 1363-1 im Vergleich zur DIN 4102-2 durch die Verwendung des Plate Thermometers höhere thermische Beanspruchungsniveaus resultieren.

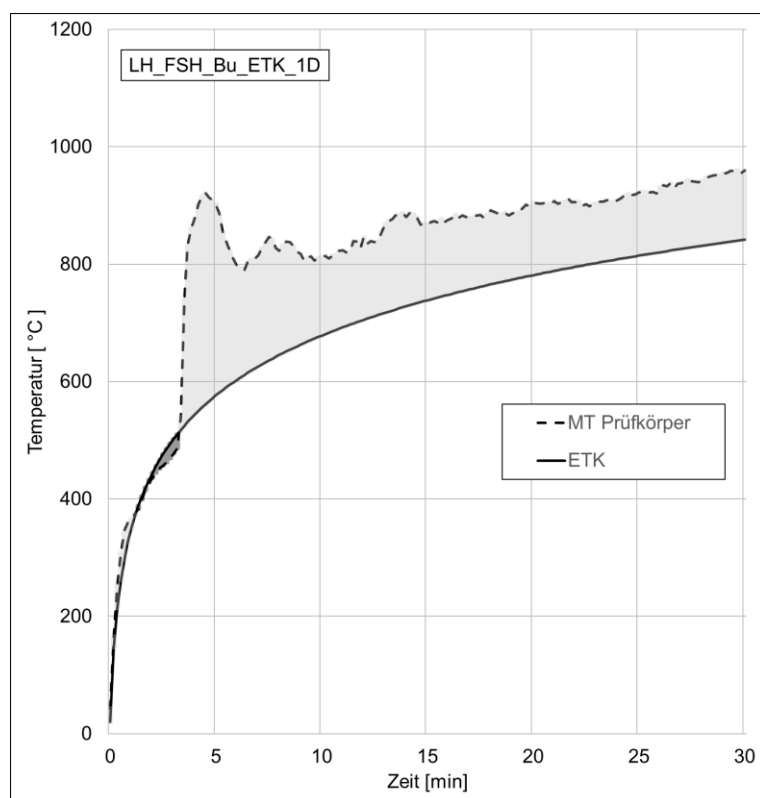


Bild 6 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche im Vergleich zur ETK beim Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperaturdifferenz Temperature-time diagram for the sheath thermocouple on the specimen surface in comparison to the standard fire exposure - temperature difference

Um das erhöhte Temperaturniveau auf der Prüfkörperoberfläche messtechnisch exakt zu bestimmen, ist es notwendig die Temperatur-Zeit-Kurve des Mantelthermoelements auf der Prüfkörperoberfläche mit der des Mantelthermoelements, das am Plattenthermoelement oberhalb des Prüfkörpers angebracht wurde, zu vergleichen. Dadurch ist sichergestellt, dass es zu keinen messtechnischen Abweichungen durch Betrachtung unterschiedlicher Messeinrichtungen kommt.

Um die Temperatur-Zeit-Kurven der beiden Mantelthermoelemente zu vergleichen wird die Differenz des Integrals beider Kurven bestimmt, vgl. Bild 7.

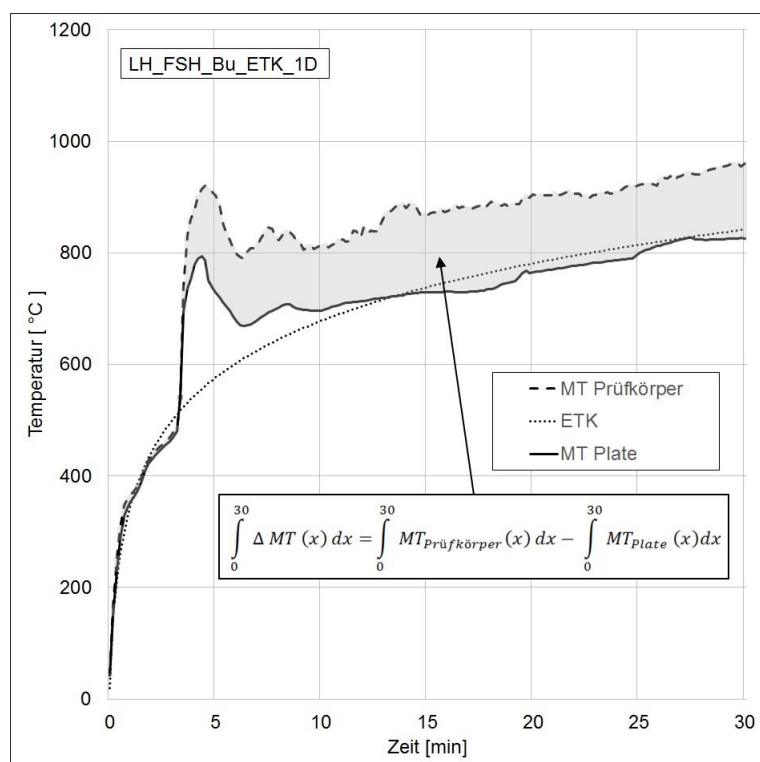


Bild 7 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche und für das Mantelthermoelement im Brandraum Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperatur-Zeit Differenz beider Kurven Temperature-time diagram for the sheath thermocouple on the test specimen surface and for the sheath thermocouple in the furnace for fire tests with beech plywood - temperature-time difference of both curves

Mit Hilfe der Differenz beider Intergrale lässt sich in einem ersten Schritt näherungsweise eine Anpassung der Abbrandrate durch eine Äquivalenzbetrachtung mit der ETK erzielen. Das heißt, die Fläche der Differenz beider Integrale wird mit einer gleich großen Fläche unterhalb der ETK verglichen und dafür der Wert in Minuten auf der x-Achse bestimmt, vgl. Bild 8.

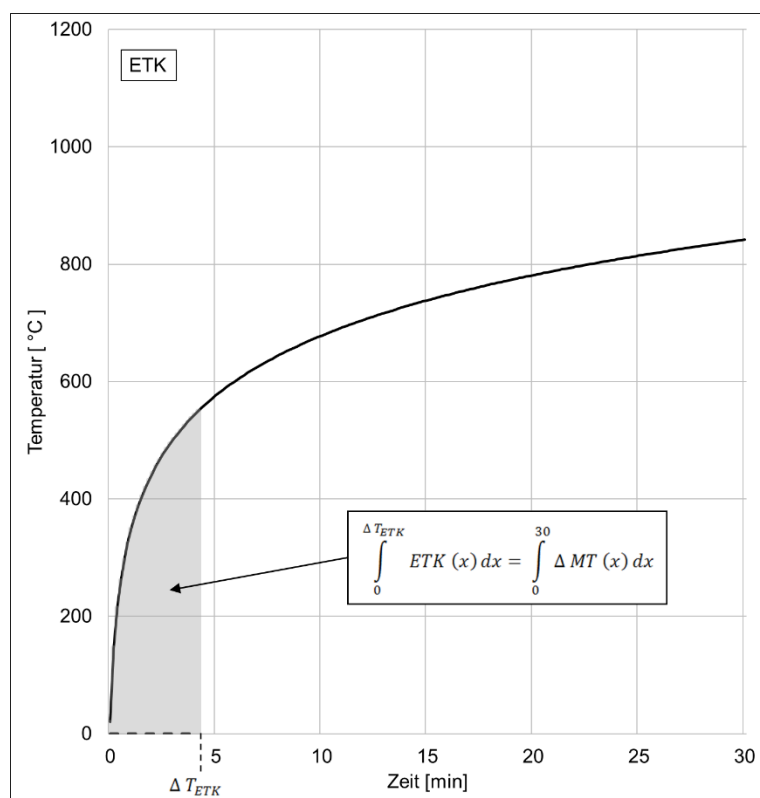


Bild 8 Integral unter Einheitstemperatur-Zeitkurve zur Ermittlung ΔT_{ETK} Integral underneath standard temperature-time curve to determine ΔT_{ETK}

Der Wert ΔT_{ETK} liefert die näherungsweise zusätzlich zu berücksichtigende Zeitspanne um die Abbrandrate zu bestimmen. Die Abbrandraten werden anschließend durch zusätzlich zu berücksichtigende Zeit bestimmt.

Es ergeben sich folglich die in Tab. 1 dargestellten Abbrandraten.

Tab. 1 Rohdichte, Abbrandrate ermittelt über 300°C – Isotherme, Abweichung zu DIN EN 1995 und angepasste Abbrandrate Bulk density, charring rate based on 300°C - Isotherm, deviation to DIN EN 1995 and adapted charring rate

	Roh-	Holz-	Prüf-	Abbrandrate		β_0 aus	Max. Abwei-	Abbrandrate	Abwei-
	dichte	feuchte	körper	300°C Isotherme		[3]	chung zu β_0	angepasst	chung zu β_0
			Dicke				[3]		[3]
				30 min	90 min			30 min	
	[kg/m ³]	[%]	[mm]	[mm/min]	[mm/min]	[mm/min]	[%]	[mm/min]	[%]
BRETTSCHICHTHOLZ BUCHE	767	12,1	104	0,83	0,76	0,65	28	0,72	11
BRETTSCHICHTHOLZ ESCHE	560	12,7	104	0,83	0,73	0,50	66	0,75	50
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	507	11,8	118	0,70	0,59	0,65	8	0,64	-2
FURNIERSCHICHTHOLZ BUCHE	802	8,3	122	0,87	0,72	0,65	34	0,72	11
FURNIERSCHICHTHOLZ FICHTE	607	10,0	129	0,77	0,76	0,65	18	0,65	0
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	115	0,83	0,74	0,65	28	0,73	12
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	117	0,53	0,47	0,50	6	0,46	-9
VOLLHOLZ FICHTE	485	12,0	114	0,83	0,72	0,65	28	0,72	11

2.4 Ausblick

Im Verlauf der weiteren Bearbeitung werden die Ergebnisse zum Abbrandverhalten und zur Temperaturverteilung bei Naturbrandbeanspruchungen und bei mehrseitiger Beanspruchung weiter aufbereitet.

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die normativen Werte für den Abbrand nach [3] im Fall von Esche modifiziert werden sollten, der Sachverhalt wird weiter untersucht.

3 Leistungsfähigkeit von brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen

3.1 Stand der Technik

Zum Schutz der Entzündung von Holzbauteilen in der Gebäudeklasse 4 wird in [9] die Anordnung einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (Brandschutzbekleidung) gefordert. Eine Konkretisierung der Anforderungen an die Brandschutzbekleidung erfolgt in [10]. Die nicht brennbare Brandschutzbekleidung muss nach [10] während eines Zeitraumes von 60 Minuten unter Brandbeanspruchung nach ETK ein Entzünden der tragenden und aussteifenden Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen verhindern und eine K₂60 Klassifizierung gemäß [11]

besitzen. Die Grundlagenuntersuchung zur Erarbeitung der Anforderungen und Konstruktionsdetails in [10] erfolgte durch [12] und wurde in [13] weiter konkretisiert.

3.2 Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen

Die normative Prüfung der Brandschutzfunktion (K) erfolgt nach DIN EN 14135 [14] über eine Klassifizierungszeit gemäß DIN EN 13501-2 [11] von 10, 30 oder 60 Minuten. Als Leistungskriterien dienen gemäß [11] zum einen die Temperaturerhöhung gegenüber der Ausgangstemperatur in der Grenzsicht Brandschutzbekleidung – Trägerplatte (Holzoberfläche), welche im Mittel auf 250 K und an beliebiger Stelle auf 270 K begrenzt ist. Zum anderen darf nach der Brandprüfung kein verbranntes oder verkohltes Material an beliebiger Stelle der Trägerplatte oder an beliebiger Stelle der brandabgewandten Seite der Brandschutzbekleidung auftreten. Zur Anforderung „keine Verkohlung“ liegen keine einheitlichen Bewertungskriterien europäischer Prüfanstalten vor.

Entsprechend [13] wurde für die Erfüllung der Leistungskriterien, über eine Beflammungsdauer von 60 Minuten nach ETK, eine Kombination aus zwei Lagen 18 mm Gipsplatten Typ DF (Typ DF) nach DIN EN 520 als Brandschutzbekleidung empfohlen. Äquivalent dazu ist die Verwendung von Gipsfaserplatten (GF) gemäß DIN EN 15283-2 möglich.

In der Regel ist die Anforderung „kein verbranntes / verkohltes Material“ ausschlaggebend für die Klassifizierung und nicht das Kriterium der Temperaturerhöhung. Beispielsweise führt der erhöhte Wärmeeintrag über die stiftförmigen, metallischen Verbindungsmittel (VM), zur Befestigung der Brandschutzbekleidung bereits bei Temperaturen in der Grenzsicht von ca. 200 °C zu Verfärbungen auf der Trägerplatte im Bereich der VM [15]. Des Weiteren sind hier auftretende Verkohlungen im Bereich der Plattenstöße zu nennen [13].

Die aktuellen experimentellen Erkenntnisse des Forschungsvorhabens TIMPuls zeigen, dass die Leistungsfähigkeit einer Kombination aus 2 x 18 mm Typ DF, zur Verhinderung einer Entzündung des Holzbauteils, bei einer Brandbeanspruchung nach ETK über 60 Minuten noch nicht ausgeschöpft ist. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden systematische Untersuchungen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Kombinationen von Brandschutzbekleidungen durchgeführt, mit dem Ziel eine Entzündung der anfänglich geschützten Holzoberfläche bei einer Brandbeanspruchung nach ETK und Naturbrandbeanspruchung zu verhindern. Eine Analyse der Leistungsfähigkeit erfolgte durch die Betrachtung der Temperaturentwicklung in der Grenzsicht sowie des Verkohlungsbildes der Trägerplatte bis zu einer Beanspruchungsdauer von 90 Minuten unter ETK bzw. über den gesamten Verlauf der Naturbrandbeanspruchung.

3.3 Versuchskörper und Versuchsablauf

Für die Brandversuche zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen wurden kleinskalige Versuchskörper hergestellt, vgl. Bild 9. Die Versuchskörper bestanden aus einem Fichtenholzrahmen, welcher umlaufend mit einer Trägerplatte verschraubt war. Als Trägerplatte wurde eine 19 mm Norm-Trägerplatte (Spanplatte) nach [14] sowie eine 15 mm OSB/3-Platte gemäß DIN EN 300 verwendet. Auf die Trägerplatte wurde eine Brandschutzbekleidung aufgeschraubt. In den Untersuchungen wurden Gipsplatten Typ DF nach DIN EN 520 und Gipsfaserplatten gemäß DIN EN 15283-2 in unterschiedlichen Dicken und Kombinationen als Brandschutzbekleidungen verwendet.

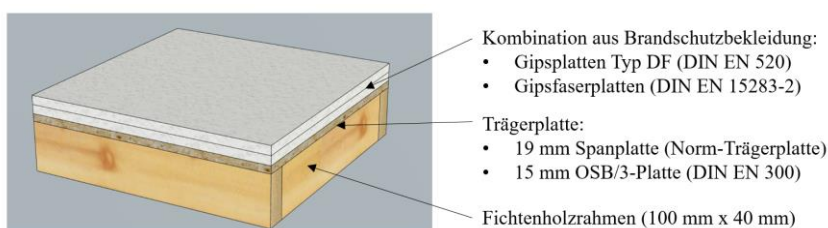


Bild 9 Darstellung des Versuchskörpers mit Benennung der Komponenten. Representation of the test specimen with designation of the components.

Zur Dokumentation der Temperaturentwicklung bei der Brandbeanspruchung wurden die Versuchskörper mit Thermoelementen vom Typ K ausgestattet, vgl. Bild 10. Zusätzlich fand eine Anordnung von Verbindungsmitteln (Indikator-Schraube und Indikator-Klammer) in der Fläche statt. Diese dienten dazu die Verkohlungen und den Temperatureintrag durch die metallischen VM vergleichend zu [13] und [15] zu analysieren.

Die Brandversuche wurden in einem Brandofen gemäß [4] durchgeführt. Insgesamt erfolgten 13 Versuche mit 26 Versuchskörper unter Brandbeanspruchung nach ETK, wobei je Brandversuch zwei Versuchskörper parallel untersucht wurden.

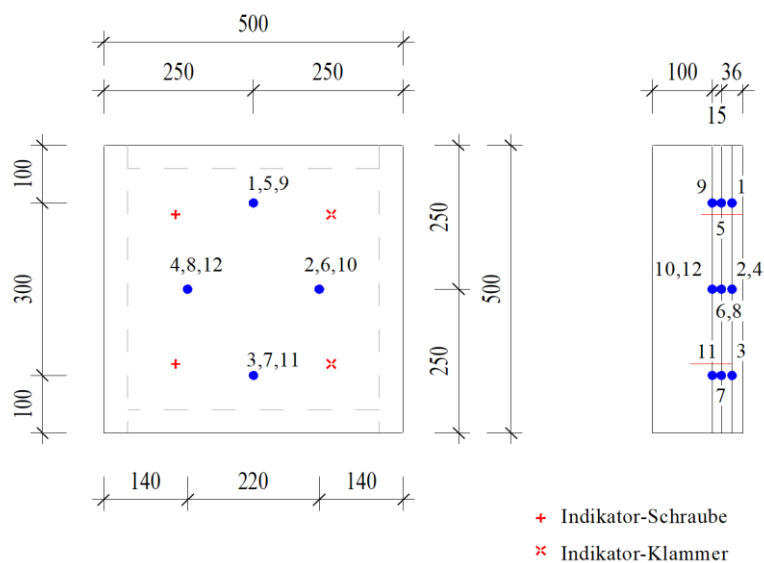


Bild 10 Messstellenanordnung des Versuchskörpers. Measuring point layout of the test specimen.

3.4 Analyse der Versuchsergebnisse

Im Ergebnis wurde die mittlere Temperaturentwicklung sowie das Verkohlungsbild der Trägerplatte unter Beanspruchung nach ETK analysiert. Einen Vergleich der gemittelten Temperaturentwicklung in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung-Trägerplatte für unterschiedliche Bekleidungsstärken zeigt Bild 11. Der Verlauf zeigt deutlich die Schutzwirkung infolge der Dehydratation der Gipsplatten (100°C-Plateau), welche die Erhöhung der Grenzschichttemperatur verzögert. Erst ab Überschreiten des 100°C-Plateaus ist ein annähernd linearer Anstieg der Temperatur in der Grenzschicht zu verzeichnen. In Abhängigkeit der Dicke der Brandschutzbekleidung ergibt sich eine unterschiedliche Dauer des Dehydratationsvorganges. Unter Beachtung des Temperaturerhöhungskriteriums nach [11] von $\Delta T \leq 250 \text{ K}$ ist eine vergleichende Bewertung der Leistungsfähigkeit der Kombinationen von Brandschutzbekleidungen bis zu einer Beanspruchungsdauer von 90 Minuten möglich. Bei Bekleidungsstärken von 12,5 mm werden 270 °C in der Grenzschicht bereits nach 27 Minuten Brandbeanspruchung erreicht, während Bekleidungsstärken von 2 x 18 mm die 270 °C erst nach ca. 100 Minuten überschreiten. Folgend lässt sich für dickere Brandschutzbekleidungen eine längere Schutzdauer der Trägerplatte vor einer Entzündung und selbstständigem Weiterbrennen feststellen. Die mittlere Ausgangstemperatur konnte versuchsübergreifend zu $T_0 \approx 20 \text{ °C}$ ermittelt werden. Wie in Bild 12 erkennbar ist, weisen die Trägerplatten bei einer maximal gemessenen Temperatur in der Grenzschicht von $270 \text{ °C} \pm 15 \text{ K}$ bereits sichtbare Verkohlungen in vergleichbarer Intensität auf. Eine Entzündung der Trägerplatte konnte bei diesem Grad der Verkohlungen jedoch nicht festgestellt werden.

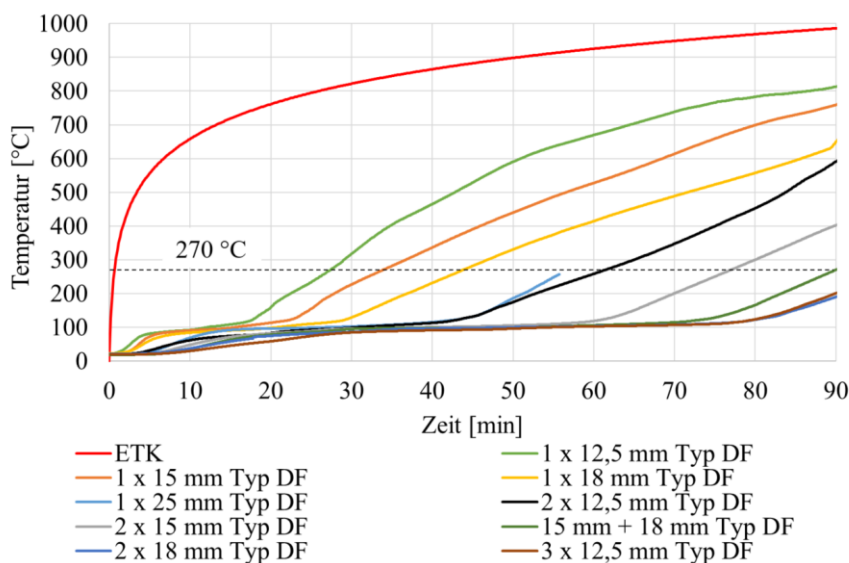


Bild 11 Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß ETK.

Temperature development for various protection thickness in the interface at standard fire exposure.

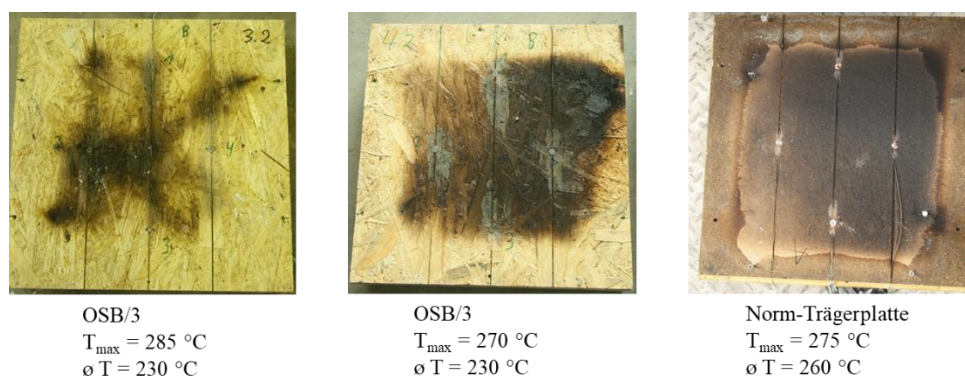


Bild 12 Vergleich von Verkohlungsbilder bei unterschiedlicher Trägerplatte und Brandbeanspruchung gemäß ETK.

Comparison of charring patterns with different backing board at standard fire exposure.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse dieser kleinmaßstäblichen Brandversuche aufgrund der Skalierbarkeit und Orientierung nicht direkt auf den Realmaßstab übertragbar sind. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens TiM puls zurzeit durchgeführten Großbrandversuche im Realmaßstab scheinen vorgenannte Erkenntnisse zu bestätigen, eine detaillierte Auswertung steht noch aus.

4 Nachbrandverhalten von Holz

4.1 Bauordnungsrechtliche Grundlagen

Den brandschutztechnischen Anforderungen der Bauordnung liegt die Bauteilklassifizierung unter ETK zugrunde. Mit dieser kann der Feuerwiderstand der Bauteile für einen vollentwickelten Raumbrand abdeckend bestimmt

werden. Das Abklingen des Brandes und das Nachbrandverhalten des Bauteils, z. B. das Bauteilverlöschen, werden dabei nicht berücksichtigt, sodass das Bauteil unmittelbar nach Überschreiten der vorgegebenen Prüfdauer versagen darf.

Darüber hinaus fordert die Musterbauordnung [9] für feuerbeständige Bauteile (Tragfähigkeit/Raumabschluss über 90 Minuten), dass die tragenden und aussteifenden Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Bei raumabschließenden, feuerbeständigen Bauteilen wird außerdem eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen gefordert. Damit wird indirekt angenommen, dass sich diese Bauteile nicht am Brand beteiligen und der reale Brand, der bei üblichen Brandlasten in etwa der Intensität des Brandverlaufs einer 60- bis 70-minütigen ETK-Beanspruchung entspricht [24], auch ohne Löschangriff der Feuerwehr überstanden wird.

Alternativ bietet DIN EN 1991-1-2 zusammen mit dem Nationalen Anhang [17] die Möglichkeit, den Brandschutznachweis auch auf Grundlage eines sogenannten Naturbrandes zu führen. Diese Nachweisführung setzt voraus, dass das Bauteil über den kompletten Brandverlauf, einschließlich der Abklingphase, seine Funktionen erhält. Ein Selbstverlöschen der Bauteile ist bei dieser Nachweisform folglich notwendig.

4.2 Brandversuche zum Selbstverlöschen von Holz

Zur Untersuchung des Nachbrandverhaltens von Holz wurden zunächst Laborbrandversuche im Cone-Kalorimeter in Anlehnung an ISO 5660-1 [18] durchgeführt. Die Holzprobekörper (100 mm x 100 mm, 50 mm hoch) wurden mit einem elektrischen Heizstrahler erwärmt. Entsprechend der möglichen Einbausituationen von Holz wurden ungeschützte Holzprobekörper (Bild 13) und anfänglich durch eine Gipsfaserplatte geschützte Holzprobekörper (Bild 14) unterschieden.

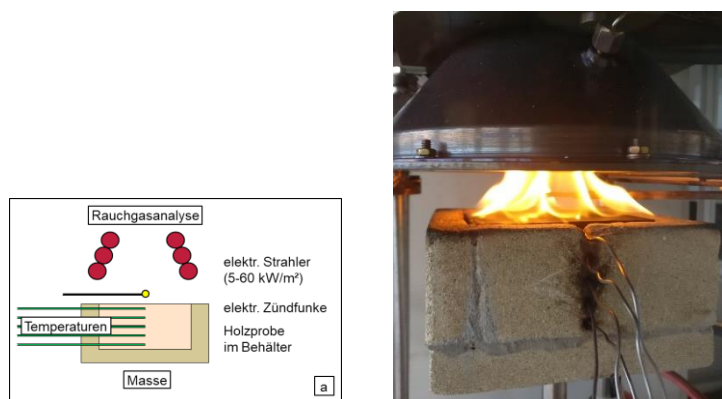


Bild 13 Versuchsaufbau a) und Durchführung b) ungeschützter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter. Test setup a) and image of test b) of an unprotected wood specimen in cone-calorimeter

Die ungeschützten Holzprobekörper wurden mit unterschiedlichen Wärmestromdichten zwischen 5 kW/m² bis 60 kW/m² direkt bestrahlt. Bei ausreichender Bildung von Pyrolysegasen wurde durch einen elektrischen Zündfunken ein Flammenbrand ausgelöst. Nach einer vorher festgelegten Begrenzung der Massenabnahme um 10, 30 oder 50 M.-% des Holzprobekörpers wurde die Wärmebestrahlung beendet und der weitere Verlauf des Brandes untersucht. Dabei wurden die Rauchgase (Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid) analysiert und der Massenverlust des Probekörpers aufgezeichnet. Außerdem wurden fünf Temperaturmessstellen in der vertikalen Mittelachse des Probekörpers in 5, 15, 25, 35 und 45 mm Tiefe im Holz angeordnet.

Auf allen Probekörpern fanden Flammenbrände statt, welche entweder aufgrund einer sich bildenden Holzkohleschicht oder innerhalb von 1 bis 2 Minuten nach Abschalten des Heizstrahlers selbstständig erloschen. Bereits 2 bis 3 Minuten nach Abschalten des Heizstrahlers betrug die Massenänderungen des Holzes weniger als 1 g/min, das entspricht weniger als 0,5 M.-%/min. Da die Temperaturlaufzeichnung zu diesem Zeitpunkt noch Temperaturen über 300°C feststellte, wurde die Massenänderung als ungeeignetes Kriterium zur Bewertung eines Selbstverlöschens identifiziert.

Die Temperaturlaufzeichnungen dokumentieren außerdem ein Abkühlen der Probekörper auf unter 50 °C nach 78 bis 113 Minuten. Trotz dieser langen Abkühlphase ist der nachträgliche Holzabbrand, nach dem Abschalten des Heizstrahlers, bei allen Versuchen geringer als 13 mm.

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Zeit der Abkühlung der Probekörper auf unter 50 °C mit anfänglich höherer Wärmestromdichte und längerer Bestrahlungsdauer zunimmt. Diese Ergebnisse wurden durch die Rauchgasanalyse bestätigt.

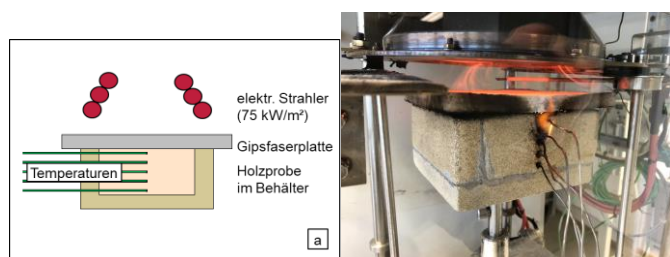


Bild 14 Versuchsaufbau a) und Durchführung b) bekleideter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter. Test setup a) and image of test b) of protected wood specimen in cone-calorimeter

Die unter einer 12,5 mm Gipsfaserplatte anfänglich geschützten Holzprobekörper wurden mit einer Wärmestromdichte von 75 kW/m² auf der Oberseite der Gipsfaserplatte für 60 Minuten bestrahlt, siehe Bild 14. Auf-

grund des zusätzlichen Einflusses der Gipsfaserplatte wurde auf die Rauchgas- und Massenaufzeichnung verzichtet, die Anordnung der Temperaturmessstellen im Holz entspricht denen der ungeschützten Holzprobekörper. Untersucht wurden in dieser Anordnung Nadel- und Laubvollhölzer sowie OSB und Spanplatten.

Auf das Abschalten des Heizstrahlers folgte stets eine kurze Nacherwärmung des Holzprobekörpers, aufgrund der Wärmespeicherung in der Gipsfaserplatte und Holzkohleschicht und der verzögerten Durchwärmung des Probekörpers. Die oberste Temperaturmessstelle, 5 mm tief im Holz unter der Gipsfaserplatte, zeichnete zu diesem Zeitpunkt Temperaturen von 550 bis 620 °C auf. Die Oberflächen der Holzprobekörper waren zu diesem Zeitpunkt bereits stark verkohlt. Anschließend kühlten alle Probekörper vollständig ab. Die vollständige Abkühlung der Probekörper auf unter 50 °C erfolgt nach 119 bis 176 Minuten. Der nachträgliche Holzabbrand, bzw. die weitere Verkohlung der Holzprobe in der Abkühlphase, nach dem Abschalten des Heizstrahlers, war bei keinem Versuch größer als 10 mm.

Nach dem Abschalten des Heizstrahlers wurden keine Flammen- oder Glimmbrände unter den Gipsfaserplatten festgestellt. Diese Untersuchungen sind für realmaßstäbliche Holztafelelemente, aufgrund ihrer vergleichsweise aufwändigen Branddetektion und -bekämpfung, von besonderem Interesse. Die Versuchsergebnisse im Labormaßstab deuten darauf hin, dass flächige Holzwerkstoffe unterhalb einer Bekleidung infolge ihrer Entzündung zum Selbstverlöschen ohne Glimmbrände neigen. Diese Beobachtung wird in großmaßstäblichen Brandversuchen, unter Berücksichtigung weiterer konstruktiver Einflüsse, beispielsweise den Plattenfugen der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen und der Holzwerkstoffplatten, weiter untersucht.

4.3 Selbstverlöschen von Holzbauteilen

In den dargestellten Brandversuchen konnte nachgewiesen werden, dass Holz im Labormaßstab, unter Berücksichtigung der aufgeführten Randbedingungen, selbstverlöschend ist. Aufbauend auf den Ergebnissen im Labormaßstab wird das Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen von Holzbauteilen weiterhin in mittleren und großmaßstäblichen Brandversuchen untersucht. Die Erkenntnisse aus diesen Brandversuchen sind eine wesentliche Grundlage für die, im Rahmen des Forschungsvorhabens TIMPuls, entwickelten Bauteilaufbauten und ganzheitlichen Musterkonzepte zur Verwendung von Holzbauweisen in der Gebäudeklasse 5.

Maßgebend für das Selbstverlöschen ist die Energiebilanzierung des Verbrennungsvorganges. Grundlegende, theoretische Ansätze und Untersuchungen zum Entzünden und Verlöschen von Feststoffen bestehen bereits seit Jahrzehnten [19-20]. Eine vollumfängliche Quantifizierung der Rahmenbedingungen des Selbstverlöschens ist bisher

allerdings nicht möglich. Die Wärmefreisetzung des Flammenbrandes und seine untere Explosions-, bzw. Zündgrenze sind von der Zusammensetzung der brennbaren Gase abhängig und dieses ist nicht vollständig vorhersagbar. Weiterhin wird der Wärme- und Gastransport durch die sich zunehmend bildende und nur unzureichend prognostizierbare Holzkohleschicht gestört.

Betrachtet man das Selbstverlöschten von Holz nicht nur auf einer einzelnen Oberfläche, sondern als raumbildendes Bauteil (Wände und Decken) im Brandraum, ergeben sich weitere maßgebende Einflüsse auf das Selbstverlöschten. Mit zunehmender Menge an brennbaren Oberflächen im Brandraum erhöht sich die insgesamt freigesetzte Wärmeenergie in diesem, dies wirkt sich in der Nachbrandphase entscheidend auf das Selbstverlöschten der Bauteile aus.

In internationalen Forschungsarbeiten und Großbrandversuchen [20-23] wurde festgestellt, dass Brandräume in Holzbauweise mit nur einer ungeschützten brennbaren Oberfläche, die anderen Wände bzw. die Decke wiesen nichtbrennbare Oberflächen auf, nach dem Aufbrauchen der mobilen Brandlast selbst verloschen. Werden mehrere Bauteiloberflächen brennbar ausgeführt, besteht die Gefahr, dass sich durch die Wärmestrahlung der brennenden Oberflächen diese gegenseitig beeinflussen (Kreuz- oder Rückstrahlung) und somit kein Selbstverlöschten eintritt. Da die Messung der Luftvolumenströme auf der Oberfläche von Bauteilen in Brandräumen bisher nicht erfolgte, liegen nur unzureichende Erkenntnisse über die konvektive Kühlwirkung oder das Wiederentzünden brennbarer, schwelender Bauteiloberflächen (aufgrund der erhöhten Sauerstoffzufuhr) vor. Weiterhin muss die jeweilige Ausführung der konstruktiven Details im Hinblick auf das Selbstverlöschens berücksichtigt werden. Daher lassen sich nur wenige der in der Literatur dokumentierte Großbrandversuche bezüglich des Selbstverlöschens auswerten.

5 Fazit

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen einen ersten Auszug von Erkenntnissen zu Abbrandraten von Holzbauteilen, zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen und zum Selbstverlöschten. Diese Themen haben direkte Einflüsse auf die Kerngebiete Branddynamik im Brandraum, Tragfähigkeit und Raumabschluss der Konstruktion. Für die Abbrandraten von Holz konnten die bisher bekannten normativen Werte unter Normbrandbeanspruchung in einem ersten Schritt bestätigt und ergänzt werden. Maßgebend für die Abbrandrate ist, neben Einflüssen wie Holzfeuchte und Einwirkungsszenario der Brandbeanspruchung, die jeweilige Holzart und die damit einhergehenden Parameter. Insbesondere für die Holzart Esche zeigten sich größere Abweichungen zu den bis dato normierten Abbrandraten. Weitere Untersuchungen sollen Aufschluss zu diesem Sachverhalt und zum Abbrandverhalten bei

Naturbrandbeanspruchungen und bei mehrseitiger Beanspruchung liefern.

Der Abbrand kann jedoch auch durch brandschutztechnisch wirksame Bekleidungen verhindert werden. Grundsätzlich wurde hierzu festgestellt, dass bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 270 °C sichtbare Verkohlungen, jedoch kein Entzünden der Trägerplatte, auftreten. Bei 90-minütiger ETK-Brandbeanspruchung wurde mit einer Kombination von 2 x 18 mm Gipsplatten ein Entzünden der Trägerplatte verhindert.

Damit einhergehend stellt sich die Frage, ob ungeschützte bzw. anfänglich geschützte Konstruktionen, nach Abbrand der immobilen Brandlast, selbstständig verlöschen. Erste Auswertungen von internationalen Großversuchen zum Selbstverlöschen zeigen, dass dieses Phänomen unter bestimmten Randbedingungen auftritt und die Bauteile entsprechend selbstverlöschen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen aus den Kleinversuchen werden diese und eine Reihe weiterer Punkte im Rahmen der ganzheitlichen Betrachtung in Großbrandversuchen und Realbrandversuchen weiter untersucht. Die am Ende des Vorhabens geplanten vier Realbrandversuche sollen abschließend die Erkenntnisse unter realen Randbedingungen und natürlichen Brandlasten nachweisen.

Fördernachweis

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.

Literatur

- [1] Technische Universität München (2020) Forschungsvorhaben *TIMPuls* [online]. München: Technische Universität München. <https://www.timpuls.tum.de>
- [2] WERTHER, N. (2016) *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren* [Dissertation]. Technische Universität München. München
- [3] DIN EN 1995-1-2:2012-12 (2012) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Beuth, Berlin.
- [4] DIN 4102-8:2003-10 (2003) *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand*. Beuth, Berlin.

- [5] DIN EN 1363-1:2012-10 (2012) *Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Beuth, Berlin.
- [6] HEUMANN, F.; ENGEL, T. (2020) *Versuchsbericht Nr. 01-08-19 - Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung (ETK) und parametrischer Brandbeanspruchung*. München: Technische Universität München. Internes Dokument
- [7] KOJI, K.; WERTHER, N. (2017) *State-of-the-art about how real fires may be influenced by structure*. Book of abstracts of COST FP 1404 MC and WG meeting; Prague 2 – 3 February 2017.
- [8] WINTER, S., ZEHFUß, J.; BRUNKHORST, S. ET AL.: *Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus*. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage vom 25. – 26. September 2019 in Braunschweig.
- [9] MUSTERBAUORDNUNG (MBO). Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016.
- [10] MUSTER-RICHTLINIE ÜBER BRANDSCHUTZTECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN HOCHFEUERHEMMENDE BAUTEILE IN HOLZBAUWEISE (M-HFHHOLZR). Fassung Juli 2004.
- [11] DIN EN 13501-2:2016-12: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*; Deutsche Fassung EN 13501-2:2016. 2016.
- [12] HOSSER, D.; WESCHE, J.; ZEHFUß, J.; BECKER, K.; TICHELMANN, K.: *Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 in Holzbauweise; Stufe 3: Empfehlungen und Umsetzung*. Abschlussbericht 2001.
- [13] ROHLING, A.; PAUL, T.: *Erarbeitung von Konstruktionsdetails zur Kapselung tragender Bauteile für die neue Gebäudeklasse 4 der MBO*; Abschlussbericht 2007.
- [14] DIN EN 14135:2004-11: *Brandschutzbekleidungen – Bestimmung der Brandschutzwirkung*. Deutsche Fassung EN 14135:2004.
- [15] HOSSER, D.; KAMPMEIER, B., KRUSE, D. UND RÜTHER, N. (2010) *Optimierung der Konstruktion und der Herstellungsprozesse von hochfeuerhemmenden Holztafelementen unter sicherheitsrelevanten, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Optimierung K60)*. Abschlussbericht 2010.

- [16] SCHMID, J.; BRANDON, D.; WERTHER, N.; KLIPPEL, M (2018) *Technical note - Thermal exposure of wood in standard fire resistance tests*, Fire Safety Journal, Volume 107, July 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.02.002>
- [17] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 (2015) *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Beuth, Berlin.
- [18] ISO 5660-1:2015-03 (2015) *Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzungs- Rauchentwicklungs- und Masseverlustrate - Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung)*. Beuth, Berlin
- [19] RASBASH, D.J.; DRYSDALE D. D.; DEEPAK, D. (1986) Critical heat and mass transfer at pilot ignition and extinction of a material, in: Fire Safety Journal 10, Elsevier, Amsterdam, S. 1-10.
- [20] BARTLETT, A. I. (2018) *Auto-Extinction of Engineered Timber* [Dissertation], The University of Edinburgh
- [21] BARTLETT, A. I.; HADDEN, R. M.; HIDALGO J. P. ET AL. (2017) *Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics*, in: Fire Safety Journal 91, Elsevier, Amsterdam, S. 407-413.
- [22] EMBERLEY, R.; INGHELBRECHT, A.; YU, Z.; TORERO, J. L. (2017) *Self-extinction of timber*, in: Proceedings of the Combustion Institute Volume 36, Issue 2, Elsevier, Amsterdam, S. 3055-3062
- [23] BRUNKHORST, S.; ZEHFUß, J. (2019) *Experimentelle und numerische Analyse zum Brandverlauf von Raumbränden mit immobilen Brandlasten* in: Vortrag Symposium 2019 Heißbemessung. Braunschweig, 24.09.2019
- [24] BRUCH, K. (2016) *Vergleich der Bauteilbemessungen mit ETK und Naturbrandverfahren am Beispiel von Stahlbetonplatten* [Bachelorarbeit]. Hochschule Magdeburg-Stendal und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Autoren

Thomas Engel, M.Sc.

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Arcisstraße 21

80333 München

engel@tum.de

Sven Brunkhorst, M.Sc.

Technische Universität Braunschweig

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Beethovenstraße 52

38106 Braunschweig

s.brunkhorst@ibmb.tu-bs.de

Felix Steeger, M.Eng.

Hochschule Magdeburg-Stendal

Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion

Breitscheidstraße 2, Haus 7

39114 Magdeburg

felix.steeger@h2.de

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

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Arcisstraße 21

80333 München

winter@tum.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß

Technische Universität Braunschweig

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Beethovenstr. 52

38106 Braunschweig

j.zehfuss@ibmb.tu-bs.de

TiMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau

<https://doi.org/10.1002/bate.202000043>

Prof. Dr.-Ing. Björn Kampmeier
Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion
Breitscheidstraße 2, Haus 7
39114 Magdeburg
bjorn.kampmeier@hs-magdeburg.de

Dr.-Ing. Norman Werther
Technische Universität München
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21
80333 München
n.werther@tum.de

Zitieren Sie diesen Beitrag

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 97, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 97–107.

<https://doi.org/10.1002/bate.202000043>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.

Eingereicht: 4. Mai 2020; angenommen: 11. August 2020.

Hinweis

Dies ist die angenommene Version des folgenden Artikels: 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 97, Sonderheft Holzbau, Ausgabe 2, S. 97–107, die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>. Dieser Artikel darf für nicht-gewerbliche Zwecke entsprechend der Wiley Selbstarchivierungs-Richtlinie verwendet werden.