

Brandverhalten von Hohlraumkonstruktionen im modernen Holzbau

Julius Lange, Björn Kampmeier

Hochschule Magdeburg-Stendal, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

1. Einleitung

Der Klimawandel stellt das größte gesellschaftliche Problem unserer Zeit dar. Es gibt verschiedene Ansatzpunkte, um den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß zu reduzieren, und die Bauindustrie bietet hierbei noch erhebliches Potenzial. Weltweit sind 38 % der CO₂-Emissionen auf die Bauindustrie zurückzuführen (UN environment programme, 2020). Eine Möglichkeit, diese Emissionen zu reduzieren, besteht darin, von energieintensiven mineralischen Baustoffen auf nachhaltige Baustoffe umzusteigen, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Der wichtigste unter diesen nachhaltigen Baustoffen ist Holz. Holz bindet Kohlenstoffdioxid während der Anbauphase und speichert dieses während der Nutzungsphase. In kleineren Gebäuden ist der Holzbau dabei sich weiter zu etablieren. Jeder 5. Wohnungsneubau wird in Holz gefertigt. (Holzbau Deutschland Bund deutscher Zimmermeister, 2021). Ein zentrales Problem beim Einsatz von Holz als Baustoff in höheren Gebäuden ist, dass Holz und Holzwerkstoffe der Baustoffklasse „brennbar“ zuzuordnen sind und ihre Anwendung durch bauordnungsrechtliche Beschränkungen begrenzt ist. Die maßgeblichen baurechtlichen Regeln sind die Musterbauordnung und die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL).

Allerdings ist die Brennbarkeit des Holzes nicht allein eine bauaufsichtliche Fragestellung. So wird diskutiert, ob sich durch einen vermehrten Einsatz von Holzkonstruktion zusätzliche Herausforderungen für die Feuerwehren ergeben und wie diese weiterhin beherrscht werden können. Dies wird in dem BMBF geförderten Forschungsvorhaben HoBraTec bearbeitet (Klein, et al., 2023). Durch das Projekt wird eine Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für Gebäude in moderner Holzbauweise angestrebt. Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es eines besseren Verständnisses der zu erwartenden Branddynamik. Da in der Entwicklungsphase eines Brandes mobile Brandlasten aus der Nutzung des Gebäudes die Branddynamik dominieren, unterscheiden sich Gebäude in mineralischer Bauweise und Holzhäuser brandschutztechnisch anfänglich nicht. Wenn allerdings durch bauliche Schwachstellen oder voranschreitende Brandintensität der Brand ins Innere der Holzbauteile eindringen kann, beteiligen sich die immobilen Brandlasten der Konstruktion. Diese besondere Branddynamik im Inneren der Bauteile wurde im Projekt HoBraTec mittels Brandversuchen im mittleren Maßstab untersucht. Im Weiteren wird dieses Versuchskonzept zur Untersuchung des Brandverhaltens von Hohlraumkonstruktionen im modernen Holzbau vorgestellt und näher beschrieben. Zusätzlich werden erste Ergebnisse zweier Versuche der größer angelegten Reihe erörtert.

2. Versuchskonzept

2.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Hohlraumbrandverhaltens wurden 1 x 1 m² große Bauteile in den Normbrandofen (Abbildung 1) eingebaut und einer definierten Brandbelastung ausgesetzt, während die Temperaturentwicklung im Inneren gemessen wurde. Der Bauteilofen wird mittels Gasbrenner befeuert und ist über die Brennerleistung und den Offennendruck regelbar. Zum Einbau der Probekörper verfügt der Bauteilofen über zwei seitliche vertikale und eine obere horizontale Öffnung. Somit ist es möglich, verschiedene Kombinationen aus zwei Wand- und einem Deckenbauteil zu prüfen, wobei die nicht genutzten Öffnungen während des Versuchs mit massiven Blindbauteilen verschlossen werden. Bei der betrachteten Versuchsreihe wurden Kombinationen aus Wand/Wand und Wand/Decke verwendet, wobei die zweite Kombination nur vereinzelt ausgeführt wurde, da keine Bauteilanschlüsse zu untersuchen waren.



Abbildung 1 Bauteilofen H2 mit eingebauten Wandprobekörpern

Die definierte Brandbelastung wurde über die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) realisiert. Diese beschreibt die Standardbrandkurve der deutschen Normung, auf der die bauaufsichtlichen Anforderungen an Bauteile beruhen. So ist ebenfalls eine Vergleichbarkeit zu einer hohen Anzahl von Zulassungsversuchen gegeben. Die Dauer der Prüfung wurde aus dem Wärmestromäquivalent realistischer Naturbrandkurven ermittelt und auf 30 Minuten festgelegt. Dies entspricht einem Raumbrand, welcher eine intensive Brandentwicklung und einen schnellen Übertritt in die Vollbrandphase aufweist, aber von der Feuerwehr rechtzeitig bekämpft wird. Die Probekörper dieser Versuchsreihe wurden bis auf wenige Ausnahmen in Holztafelbauweise konstruiert und variierten in Bezug auf den verwendeten Dämmstoff und den Bekleidungsschichten. Um die durch die Durchwärmung entstehenden Temperaturdifferenzen innerhalb der Probekörper messen zu können, waren alle Probekörper engmaschig mit Thermoelementen Typ NiCr-Ni versehen. Diese lieferten mit einer Abtastrate von 5 Sekunden einen für die Versuchsdauer feinen Temperaturverlauf.

Nach der 30-minütigen Beflammung im Ofen wurden die Probekörper aus dem Brandofen entnommen und oberflächlich abgelöscht. Die Löschwassermenge wurde doku-

mentiert. Danach begann die erste Beobachtungsphase, welche 1-2 Stunden andauerte. In dieser Zeit wurden die Probekörper visuell und weiterhin mittels Thermoelementen, Wärmebildkameras, einem Abgas- und Emissions-Analysator, Mehrgasmessgeräten der Feuerwehr und einer optischen Überwachungskamera beobachtet. Die Messtechnik wurde verwendet, um die Lösch- und Detektionsmaßnahmen der Feuerwehr zu dokumentieren und auf Wirksamkeit zu überprüfen. In einem Teil der Versuche wurde anschließend mit verschiedenen Mitteln ein Löscherfolg erzwungen und das Vorgehen, welches dazu nötig war, dokumentiert. Bei einem Großteil der Versuche durchliefen die Probekörper nach der ersten, auch die zweite Beobachtungsphase. Diese dauerte ca. 20 Stunden an. In dieser Zeit wurde mit reduzierter Messtechnik untersucht, ob und/oder wie die Probekörper einen (Schwel-) Brand innerhalb der Konstruktion ausbilden und wie sich dieser entwickelt.

Auf Grundlage dieses Versuchsaufbaus wurde eine Reihe mit 18 Doppelversuchen durchgeführt.

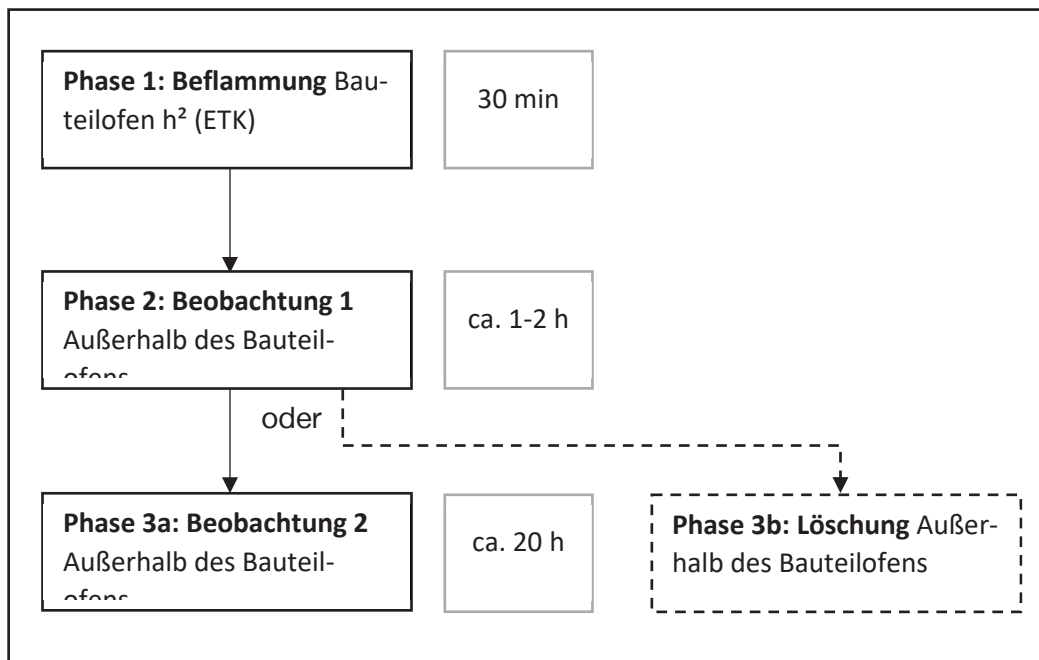


Abbildung 2 Untersuchungsablauf der beschriebenen Versuchsreihe

2.2. Probekörper

Im Weiteren werden die Probekörper der Versuche V220608_6 und V220609_7 aus der skizzierten Versuchsreihe beschrieben. Diese wurden in Holztafelbauweise konstruiert und ähnelten sich in ihrem Grundaufbau. Dieser bestand aus einer Holzkonstruktion aus Konstruktionsvollholz (KVH) und bildete einen Rahmen mit Schwelle, Rähm und Ständern aus. In der Mitte wurde der Rahmen in zwei Gefach unterteilt (Abbildung 3). Verbunden wurden die einzelnen Hölzer mittels Tellerkopfschrauben durch die Stirnseite der Konstruktion. Diese Art der Verbindung ist im Holztafelbau eher unüblich, da die Verbindung zumeist durch die aussteifenden Plattenwerkstoffe realisiert wird. Da sich dieses Verfahren zum Bau von Probekörpern nicht eignet und in den durchgeführten Versuchen nicht auf statische Eigenschaften geprüft wurden, wurde jene besagte Verbindungslösung gewählt.

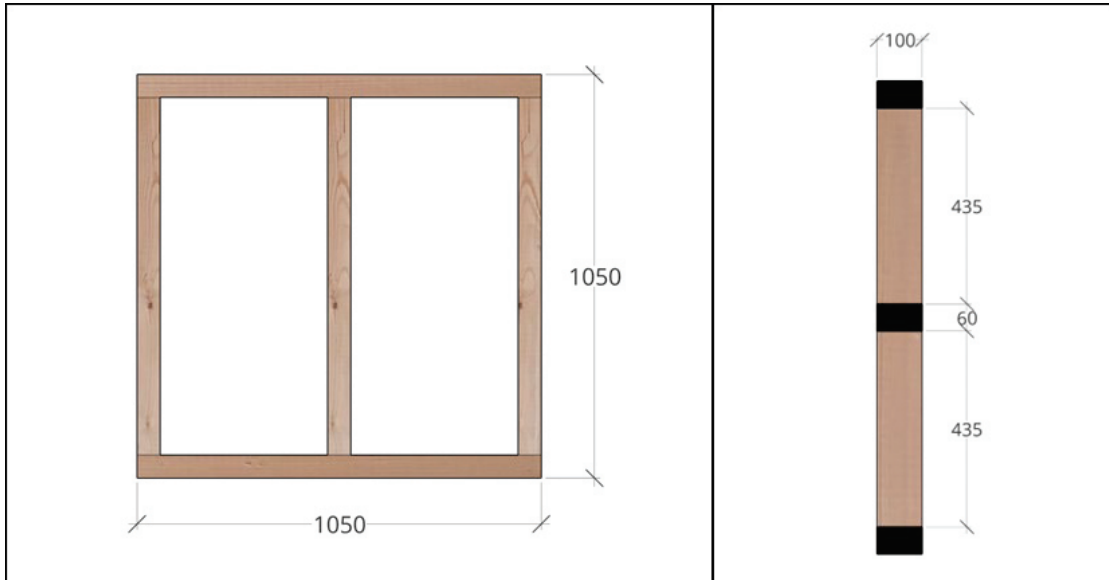


Abbildung 3 Aufbau Probekörper - Rahmen (Bemaßung in mm)

Die Gefache waren 10 cm tief und wurden vollständig mit Dämmstoffmatten ausgefüllt. In der Art des Dämmstoffs und der Beplankungslagen unterschieden sich die Probekörper. Das Wandbauteil A wurde mit Holzfaserdämmstoff (brennbar) und das Wandbauteil B mit Steinwolle (nichtbrennbar, Schmelzpunkt $>1000^{\circ}\text{C}$) versehen. Beplankt wurde der Probekörper A mit einer doppelten Lage aus 2 x 18 mm dicken Gipskartonfeuerschutzplatten (GKF). Beim Probekörper B wurde die innere Lage durch eine 15 mm dicke Holzwerkstoffplatte (OSB) ersetzt (Abbildung 4). In der oberen Mitte eines Gefachs wurde in einem Abstand von 15 cm zum Mittelständer eine Lochöffnung mit dem Durchmesser von 64 mm eingelassen, um eine Schwächung der Gipsplattenbekleidung durch eine Hohlwanddose für Steckdosen zu imitieren. Diese Schwächung wurde bei beiden Probekörpern vorgenommen.

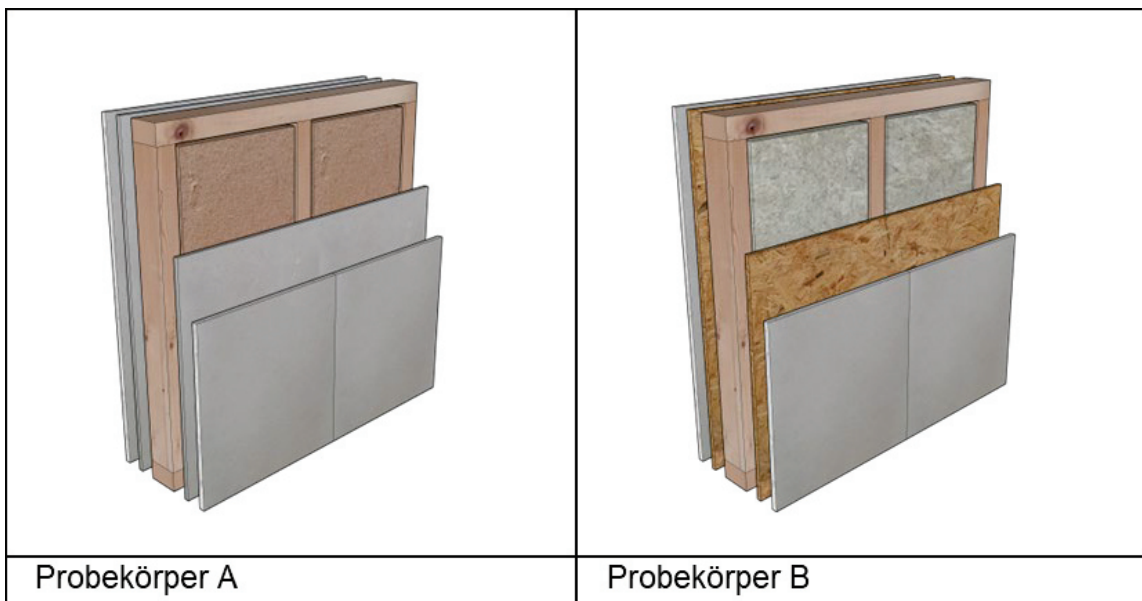
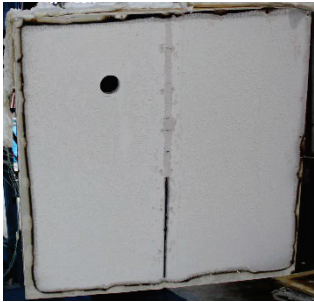







Abbildung 4 Schematischer Aufbau der Probekörper

4. Ergebnisse

Während den Beobachtungsphase 1 und 2 bildeten sich in beiden Probekörpern selbständige Verbrennungsprozesse innerhalb der Bauteile aus. Wie erwartet dominierte der Holzfaserdämmstoff in Probekörper A und die OSB-Platte in Probekörper B das jeweilige Brandverhalten. Nach Beendigung der Beobachtungsphasen durch Demontage der Probekörper wurde deutlich, dass beide Verbrennungsprozesse noch anhielten und sich weiter ausbreiteten. Demnach kam es nicht zum Selbstverlöschen. In den Abbildungen der Tabelle 1 ist zu erkennen, dass sich im Gegensatz zu Probekörper B der Brand in Probekörper A in dem durch die Öffnung der Hohlwanddose beschädigten Gefach gehalten und langsam ausgebreitet hat. Bei Probekörper B hingegen konnte sich der Brand vom beschädigten zum unbeschädigten Gefach über die OSB-Platte ausbreiten.

Tabelle 1 Bilder der Probekörper zu verschiedenen Zeitpunkten

	Probekörper A	Probekörper B
Direkt nach Ofenentnahme		
Nach ca. 20 h		
Nach ca. 20 h (ohne Brandschutzbekleidung)		

Darüber hinaus entzündete sich in Probekörper B die Holzkonstruktion über die OSB-Platte so weit, dass die untere rechte Anschlussstelle vom Brand vollständig verzehrt wurde. Bei Probekörper A wurde hingegen nur der Mittelständer an der Innenseite oberflächlich verkohlt. Ein weiterer wichtiger Aspekt, in dem sich die Probekörper unterschieden war die Entstehung von sichtbarem Rauch. Bei Probekörper A konnte über

beide Beobachtungsphasen hinweg kein sichtbarer Rauch detektiert werden, wo hingegen der Probekörper B eine nahezu konstante gut sichtbare Rauchfahne ausprägte.

Durchwärmung während der Ofenphase

Während der Beflammungsphase wurden die Temperaturverläufe hinter den Bekleidungsschichten auf der brandzugewandten Seite mittel verbauten Thermoelementen aufgezeichnet und in Abbildung 5 abgebildet. Das Diagramm zeigt die Mittelwerte der

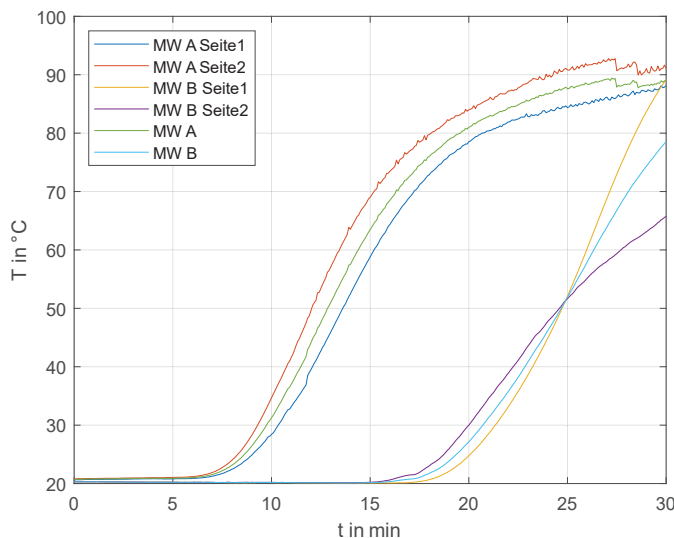


Abbildung 5 Temperaturverlauf hinter den Bekleidungsschichten auf der brandzugewandten Seite

jeweiligen Gefachseiten, wobei die Seite 1 das unbeschädigte Gefach beschreibt. Die Graphen ohne Zuschreibung einer Seite sind die Mittelwerte des gesamten Bauteils. Es wird deutlich, dass der Probekörper A etwa 10 Minuten eher anfängt sich bis zum Dämmstoff hin zu durchwärmen, sodass nach 15 min Beflammung bereits eine gemittelte Temperaturdifferenz von ca. 45 K zwischen den beiden betrachteten Probekörpern vorlag. Diese Differenz wurde allerdings

über die gesamte Beflammungsdauer auf gemittelte 10 K aufgeholt, sodass der Probekörper B eine insgesamt steiler Durchwärmungsverlauf aufweist als der Probekörper A. Zu erklären wäre dies durch die unterschiedlichen Wärmeleiteigenschaften und das spezifische Brandverhalten der verwendeten Baustoffe. Der Baustoff Gips bindet bei Beflammung Energie, da sich durch die Dehydratation des chemisch und physikalisch gebundenen Wassers unter Wärmebeaufschlagung eine temporäre Grenztemperatur zwischen 90°C und 100°C einstellt. Dieser Mechanismus ist in den Graphen des Probekörpers A gut zu erkennen. In Probekörper B ist dieser Mechanismus hingegen weniger deutlich zu erkennen. Die verzögerte Durchwärmung kann in diesem Fall durch die signifikant schlechtere Wärmeleitfähigkeit der OSB-Platte von $0,13 \frac{W}{m \cdot K}$ im Vergleich zu $0,51 \frac{W}{m \cdot K}$ bei Gips erklärt werden (Holzmann & Wangelin, 2009). Es kann festgehalten werden, dass die OSB-Platte die Durchwärmung verzögert und damit Konstruktion und Dämmstoff gerade in der Brandentstehungsphase schützt. Wenn diese allerdings als Ersatz einer hinteren Brandschutzbekleidung aus Gips verwendet wird, ist zu sagen, dass sich dann die thermische Schutzwirkung durch Dehydration weniger stark ausprägt, da absolut weniger Kristallwasser in der Platte chemisch gebunden ist. Dementsprechend unterscheiden sich zwar die Wärmeleitprozesse der unterschiedlichen Bekleidungslösungen der Probekörper A und B, das Ergebnis der Schutzwirkung ist allerdings gut vergleichbar.

Hohlraumbranddynamik

Wie bereits beschrieben entwickelten sich in beiden Probekörpern Brände innerhalb der Konstruktion, welche jeweils über 18 Stunden anhielten. In Abbildung 6 sind Wärmebildaufnahmen beider Probekörper gegen die Zeit aufgeführt, welche den Verlauf des Hohlraumbrandes qualitativ abbilden. Das jeweils erste Bild zeigt die brandzugewandte Seite der Probekörper direkt nach Ofenentnahme und oberflächlicher Kühlung mittels Kübelspritze. Dabei ist bei beiden Probekörpern zu erkennen, dass die Abkühlung der lediglich durchwärmten Bereiche, in welchen sich anfänglich kein Hohlraumbrand ausgebildet hat, nach 3 Stunden nahezu abgeschlossen ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Fläche des Bereichs von dem aus sich der Brand entwickelt bei beiden Probekörpern um die Öffnung herum zu verorten ist und ungefähr die gleiche Größe aufweist. Unterscheiden lassen sich beide Probekörper in diesem Aspekt durch die Brandintensität. Nach 6 Stunden bewirkt der Hohlraumbrand bei Probekörper A eine maximale Oberflächentemperatur von 60°C. Wo hingegen bei Probekörper B im gleichen Zeitraum eine maximale Oberflächentemperatur von über 200°C gemessen wurde. Aus den Temperaturverläufen und den in der Literatur beschriebenen Materialeigenschaften, kann die vorherrschende Branddynamik für den jeweiligen Probekörper charakterisiert werden. Bei Probekörper A setzt ein Schwelprozess ein, der sich durch Unterventilation, vergleichsweise niedrige Temperaturen und ein flammen- und glimmloses auszeichnet (Sudhoff, 2022). In Probekörper B liegt eine komplexere Dynamik vor, welche Schwel-, Glimm- und Flammenbrände inkludiert.

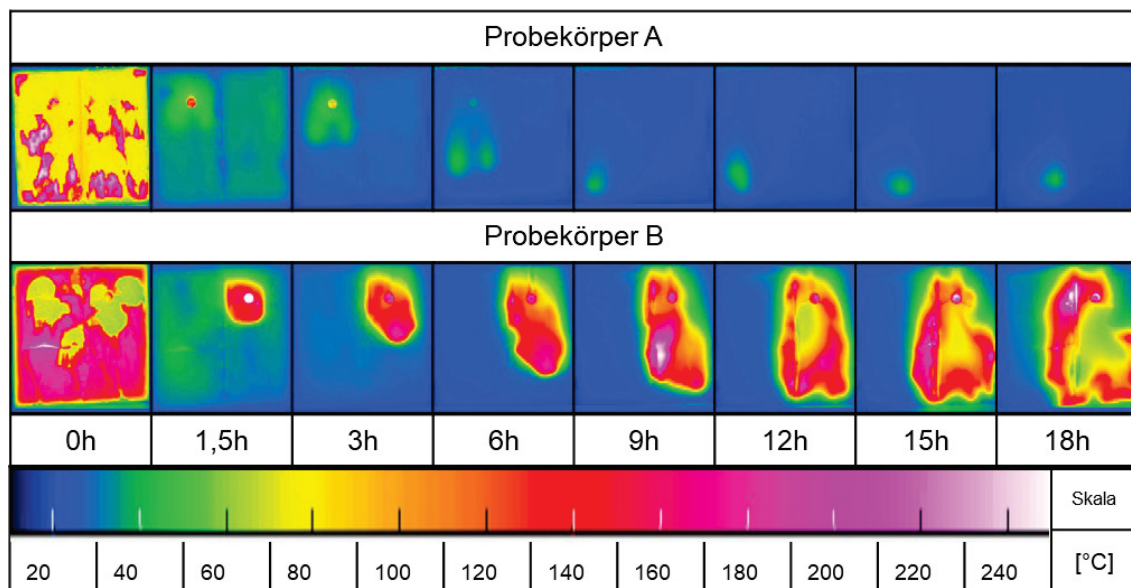


Abbildung 6 Wärmebildaufnahmen der brandzugewandten Seiten 0-18 Stunden nach Oberflächenkühlung

Bei Vergleich der zwei Probekörper fällt weiterhin auf, dass sich beide Brände mit ähnlicher Geschwindigkeit zwischen der dritten und neunten Stunde nach Bauteilkühlung in Richtung der unteren äußeren Ecke hin ausbreiten. Der große Unterschied liegt dann allerdings wieder in der Brandintensitätsdifferenz, welche in Probekörper B eine Weiterleitung in das zweite Gefach bewirkt. Zu erklären ist die anfängliche Ausbreitung nach Unten und Außen durch die vorherrschenden Ventilationsbedingungen.

Durch den sich entwickelnden Verbrennungsprozess entstehen Abgase, welche sich in Hohlräumen der Bauteile sammeln und nicht effizient nach außen hin abgeführt werden. Zusätzlich kann der für den Brand benötigte Luftsauerstoff nur durch die Fugen zwischen den Beplankungen und dem Rahmen ins Bauteil eindringen. Daraus ergibt sich der Sauerstoff als brandlimitierender Faktor. Daraus folgend entwickelt sich der Brand in die Richtung der effektivsten Sauerstoffzufuhr, welche sich an einer äußeren Schwell-Ständer Anschlussstelle ausbildet.

5. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die beschriebenen Probekörper unter den vorliegenden Bedingungen Hohlraumbrände ausbilden und diese sich während einer Langzeitbeobachtung ausbreiten. Das Durchwärmungsverhalten unterscheidet sich aufgrund der verwendeten Baustoffe in der Beflammungsphase in seinem Verlauf deutlich, die Endtemperaturen in der Konstruktion sind schlussendlich vergleichbar. Die Analyse der Temperaturverläufe während der Langzeitbeobachtung ergibt für die zwei Probekörper unterschiedliche Branddynamiken. Diese unterscheiden sich vor allem in ihrer Intensität, aber nur wenig in ihrer Brandausbreitungsrichtung. Abschließend ist zu sagen, dass eine tiefergehende Untersuchung des Brandverhaltens der OSB-Platte erforderlich ist, da sich diese zum einen positiv auf den Schutz einer dahinter liegenden Dämmung auswirkt, aber auf der anderen Seite unter bestimmten Randbedingungen auch einen Beitrag zur Brandweiterleitung darstellen kann. Bestandteil dieser Untersuchung sollte vor allem die komplexe Branddynamik der OSB-Platte in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen darstellen, da diese möglicherweise einen relevanten Einflussfaktor auf das Ausbreitungsverhalten und die Brandintensität darstellen. Weiterhin können die Ergebnisse der Versuchsreihe aufzeigen, welche Detektions- und Löschmaßnahmen der Einsatzkräfte der Feuerwehren wirksam und für diese Fälle anzuwenden sind. Um diese nächsten Auswertungsschritte zu tätigen und die beschriebenen Ergebnisse zu validieren, müssen die Versuche noch im Gesamtkontext der Reihe ausgewertet werden und um Versuche in größeren Maßstäben erweitert werden.

Literatur

- Holzbau Deutschland Bund deutscher Zimmermeister. (2021). *Lagebericht 2021*. Berlin.
- Holzmann, G., & Wangelin, M. (2009). *Natürliche und pflanzliche Baustoffe*. Wiesvadeb : Vieweg+Teubner.
- Klein, K., Wellisch, A., Butscher, D., Wegner, S., Neske, M., Lange, J., & Kampmeier, B. (04 2023). Abwehrender Brandschutz im Holzbau - Techniken und Taktiken für Brände innerhalb der Konstruktion. *BRANDSchutz - Zeitschrift für das gesamte Feuerwehrwesen, für Rettungsdienst und Umweltschutz*, S. 259-265.
- Sudhoff, P. (2022). PYROPROBID: ENTWICKLUNG EINES PYROLYSE-PROGNOSEMODELLS FÜR DÄMMSTOFFE AUS NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN. *8th Symposium Structural Fire Engineering – TU Braunschweig 2022*, (S. 252-276). Braunschweig.
- UN environment programme. (2020). *Global Status Report for buildings and construction*.